



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE MATEMATICHE - DIISM

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

CARATTERIZZAZIONE DI CAMPIONI IN CEMENTO TRAMITE TECNICA ULTRASONORA

CHARACTERIZATION OF CONCRETE BY ULTRASONIC TECHNIQUE

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Gian Marco Revel**

Correlatore:

Ing. **Giuseppe Pandarese**

Tesi di Laurea di:

Antonio Colasanto

A.A. 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	1
OBIETTIVI E METODI	2
CAPITOLO 1 - PRINCIPI FISICI DI BASE	5
1.1 Definizione e caratteristiche principali degli ultrasuoni	5
1.2 Riflessione e rifrazione degli ultrasuoni.....	9
1.3 Modulo elastico dinamico	10
1.4 Trasduttori piezoelettrici: generazione onde sonore.....	12
CAPITOLO 2 - ESECUZIONE DELLA PROVA E STRUMENTI UTILIZZATI	13
2.1 Procedimento e tecniche impiegate.....	13
2.2 Dpr300 e pundit: i due pulser-receivers	15
2.3 Approfondimento sui pulser-receivers e presentazione del segnale	16
CAPITOLO 3 - CALCESTRUZZO	19
Premessa.....	19
3.1 Malte cementizie.....	19
3.2 Provini.....	20
3.3 Compositi aggiunti	22
CAPITOLO 4 - MATURAZIONE DEI PROVINI	23
Introduzione.....	23
4.1 Stagionatura iniziale.....	23
4.2 Assorbimento igroscopico	24

CAPITOLO 5 - RACCOLTA DATI SPERIMENTALI	27
Introduzione.....	27
5.1 Influenza dei trattamenti sui provini.....	28
5.2 Confronto tra famiglie di provini	38
5.3 Confronto tra miscele.....	38
5.4 Analisi dei provini fratturati	44
CONCLUSIONI	46
BIBLIOGRAFIA	48

INTRODUZIONE

Nel settore delle costruzioni risulta sempre più frequente l'esigenza di monitorare periodicamente le infrastrutture di ogni tipo, soprattutto quelle civili, per verificarne lo stato di integrità e di conformità alle leggi vigenti.

E' noto che ogni tipo di struttura va incontro ad inevitabile deterioramento: infatti, tutti i materiali da costruzione, per varie cause, sia intrinseche che estrinseche, si degradano, ovvero perdono le loro caratteristiche originali sia da un punto di vista fisico che meccanico.

Talvolta questo deterioramento, se non adeguatamente controllato, può determinare criticità riguardanti parte o l'intera struttura, fino a comportare il cedimento strutturale della stessa.

In base a quanto appena esposto, si intuisce quale fondamentale importanza rivesta il continuo e costante monitoraggio delle strutture. In virtù di queste esigenze, vengono utilizzati sempre più frequentemente i controlli non distruttivi, o Non Destructive Testing (NDT), di cui la prova ultrasonora rappresenta un valido esempio.

I controlli non distruttivi sono così definiti perché, diversamente dalle classiche prove utilizzate in ambito civile, non alterano il materiale testato, non prevedendo la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura per effettuare una diagnosi.

Uno dei materiali più utilizzati nell'ambito delle costruzioni civili è il calcestruzzo e, vista la sua enorme importanza, sono sempre più frequenti gli studi e le analisi inerenti il suo sviluppo, il suo utilizzo e il suo relativo monitoraggio nel tempo.

A tal proposito è stato avviato il progetto EnDurCrete, che ha come obiettivo principale lo sviluppo di un nuovo calcestruzzo armato, sostenibile ed economicamente vantaggioso, per applicazioni a lungo termine e a valore aggiunto. La finalità di questo progetto è ottenere l'integrazione in un nuovo cemento a basso contenuto di clinker, compresi sottoprodotti industriali, di nuove nanotecnologie, microtecnologie e sistemi ibridi che assicurino alle future strutture elevate proprietà meccaniche, maggiore durata e una migliorata sostenibilità, con capacità intrinseche di autodiagnosi e autocontrollo,[1].

Nell'ambito del suddetto progetto, il lavoro, oggetto di questa tesi, è stato quello di effettuare test NDT con onde ultrasonore, su vari provini di materiale cementizio, per valutarne le caratteristiche fisico/meccaniche e la loro possibile variazione nel tempo.

OBIETTIVI E METODI

I controlli non distruttivi comprendono tutte quelle tipologie di test e prove fisiche che hanno come fine ultimo quello di stabilire lo stato di degrado e di conformità di un materiale, ricercandone eventuali difetti, senza necessariamente distruggere o compromettere la funzionalità della struttura.

In effetti, la maggior parte di queste prove viene eseguita direttamente in situ e, se effettuate nei tempi e nei modi corretti, permettono di individuare i difetti più critici prima che questi ultimi si propaghino a tutta la struttura, determinandone ulteriori e gravi danni.

Risulta evidente, quindi, che l'utilità di questo genere di prove ne stia promuovendo l'utilizzo sempre più frequente in associazione ai classici test distruttivi che prevedono, invece, il prelievo di vari campioni dalla struttura per successive analisi chimico-fisiche da effettuare in laboratorio. E' comunque bene ricordare che le prove distruttive rimangono ad oggi obbligatorie per legge, mentre i controlli non distruttivi si effettuano, ad integrazione, per ottenere un numero maggiore di informazioni e, avere così, una situazione complessivamente molto più chiara ed esaustiva.

Attualmente, nel campo delle costruzioni e in particolar modo nell'edilizia, si hanno a disposizione diverse tipologie di NDT che sfruttano vari approcci metodologici: alcuni test utilizzano liquidi penetranti, altri si avvalgono di controlli radiografici o magnetoscopici, alcuni sfruttano correnti indotte e altri si servono di onde ultrasonore.

Il test non distruttivo di cui ci si è avvalsi per condurre le prove nel nostro studio è stato proprio quello relativo all'utilizzo di onde ultrasonore.

Questo tipo di controllo si basa sulla propagazione di onde elastiche di tipo meccanico ad alta frequenza (ultrasuoni) all'interno di solidi, liquidi o gas.

Le onde ultrasonore, inviate nel sistema da esaminare, vengono attenuate dalla materia che incontrano e sono riflesse o assorbite da eventuali discontinuità presenti lungo il loro tragitto.

La ricerca di difetti e/o imperfezioni presenti in un materiale è uno dei principali motivi per cui si utilizzano gli ultrasuoni. In effetti, questi ultimi si rivelano un ottimo strumento per evidenziare precocemente difetti o inclusioni nei materiali prima di procedere con l'esecuzione di test distruttivi direttamente in laboratorio. Essi, infatti, propagandosi ad alta velocità nel mezzo (UPV, ultrasonic pulse velocity) permettono di correlare questa velocità e le sue

variazioni alle caratteristiche del mezzo attraversato, fornendoci preziose notizie in relazione allo stato funzionale di quest'ultimo.

Un numero sempre più crescente di studi effettuati con gli ultrasuoni riguarda il cemento, materiale che, date le sue caratteristiche meccaniche, ben si presta come oggetto di studio mediante questa tecnica.

Essendo il cemento un materiale largamente utilizzato nelle costruzioni edili, emerge sempre più prepotentemente la necessità di un suo monitoraggio strutturale continuo e specifico. Una risposta efficace a questa esigenza si ottiene utilizzando, come parametro investigativo, la tecnica ultrasonora che, sfruttando la velocità degli ultrasuoni, permette di ottenere informazioni in tempo reale sullo stato fisico e meccanico del materiale, senza danneggiarlo.

Ampi e solidi studi in letteratura dimostrano che la velocità degli ultrasuoni, variando in funzione della tipologia di cemento esaminato (tipologia di malta, aggregati aggiunti durante il processo di fabbricazione, e così via), della sua età di maturazione, della sua porosità, della sua lavorabilità e del suo rapporto acqua/cemento, permette di caratterizzarne lo stato,[2],[3],[4].

E' stata dimostrata, altresì, una correlazione diretta tra le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (in primis modulo dinamico e resistenza a compressione) e la UPV.

E' stato dimostrato, inoltre, che la velocità degli ultrasuoni è direttamente proporzionale all'età del calcestruzzo, mentre risulta inversamente proporzionale al volume dei pori in esso presenti.

Queste proprietà permettono anche di individuare le diverse fasi di cambiamento strutturale a cui va incontro il calcestruzzo nel corso della sua vita utile.

Nel campo dell'edilizia, inoltre, è in continua evoluzione lo sviluppo e la ricerca di nuovi materiali strutturali con l'aggiunta di filler, specie in carbonio, atti a consentire un "self monitoring" della struttura. Sfruttando la loro elevata capacità di conduzione elettrica, si è giunti fino ad oggi ad utilizzare, per questo scopo, sempre più frequentemente fibre e nanoparticelle conduttive.

Sulla scorta di queste evidenze e grazie alla disponibilità di nuovi materiali che la moderna tecnologia ci mette a disposizione, è stato implementato il progetto EnDurCrete che ha come obiettivo la messa a punto di un nuovo calcestruzzo creato inserendo in una matrice cementizia, nanoparticelle di carbonio (char), fibre di carbonio riciclate e una combinazione delle due in modo tale da avere una capacità di autodiagnosi per il monitoraggio strutturale nel tempo. Il monitoraggio tradizionale presenta, attualmente, limiti di applicazione poiché non fornisce una chiara interpretazione dei fenomeni nel loro complesso, ma solo informazioni parziali e

circoscritte. Si è reso necessario, quindi, creare materiali cosiddetti "intelligenti", capaci cioè di rispondere efficacemente ad un'azione impartita dall'esterno. Posizionando questi materiali all'interno delle strutture sarà possibile, di conseguenza, una "autodiagnosi" riguardo lo stato di deformazione e di tensione. Per permettere di combinare capacità portanti e capacità diagnostiche è fondamentale utilizzare materiali compositi.

La capacità di autodiagnosi dei materiali cementizi, la "self-sensing", è data dall'aggiunta, all'interno della matrice, di materie conduttive con specifiche proprietà elettriche. Tale effetto si può ottenere, ad esempio, utilizzando fibre di carbonio e/o filler carboniosi. Le eccellenti caratteristiche meccaniche di queste fibre unite alla capacità di condurre energia elettrica, le rendono una valida soluzione per la realizzazione di strutture con capacità di "self-monitoring".

I filler carboniosi modificano le caratteristiche elettriche delle matrici cementizie in cui sono inseriti e permettono di rilevare lo stato di deformazione. I filler sono, inoltre, nanoparticelle caratterizzate da una elevata superficie specifica che le rende particolarmente attive dal punto di vista chimico. In particolare, caricando la matrice cementizia con una certa quantità di fibre di carbonio, è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di un danneggiamento. Misurando, quindi, la variazione di risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'insacco e l'evoluzione del danneggiamento,[5].

Nell'ambito del suddetto progetto EnDurCrete, il nostro apporto è stato quello di caratterizzare le prestazioni di questa nuova malta cementizia, strutturata con diversi contenuti di filler, attraverso un'indagine ultrasonica.

Si sono studiate le caratteristiche di ogni tipo di malta contenente questi materiali compositi per capire le differenze correlate tra loro.

In particolar modo si è posto un maggior focus sulla velocità degli ultrasuoni nei vari tipi di cemento e sul suo cambiamento nel tempo, correlandola, quindi, alle sue caratteristiche meccaniche del momento.

Si è cercato anche di capire l'importanza degli ultrasuoni come strumento investigativo nell'eventuale ricerca di difetti o inclusioni a livello microscopico confrontando tra di loro i vari spettri dei segnali ottenuti dalle prove.

CAPITOLO 1 - PRINCIPI FISICI DI BASE

1.1 DEFINIZIONE E CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEGLI ULTRASUONI

Gli ultrasuoni sono onde sonore meccaniche generate ad una frequenza maggiore di 20 kHz, valore che rappresenta una frequenza di molto superiore a quella percepibile dall'orecchio umano (stimata tra i 2 kHz e i 5 kHz). Da qui deriva l'etimologia del nome "ultrasuono", ovvero "ciò che è al di là del suono". In fisica, il suono è un'oscillazione compiuta dalle particelle in un mezzo fisico di propagazione.

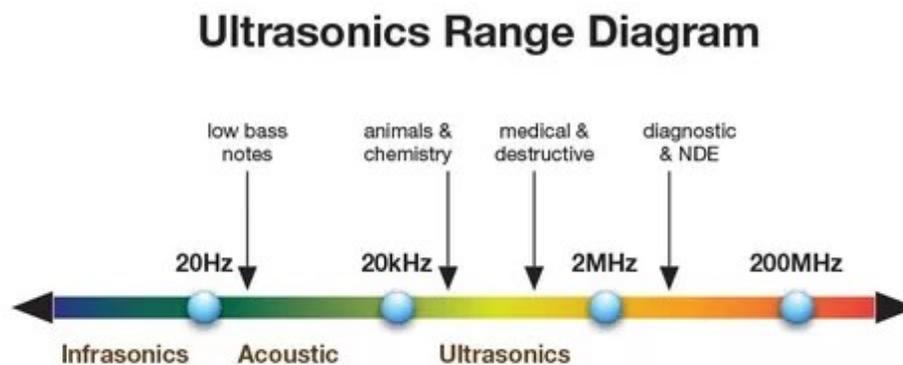


Figura 1.1. Range frequenze sonore

Tutti i materiali hanno una struttura più o meno complessa composta da particelle (atomi e molecole) che, al passaggio di una fonte di energia sprigionata da una sorgente nota, iniziano a vibrare. Tutte le molecole subiscono degli spostamenti microscopici rispetto alla loro posizione di equilibrio iniziale e, muovendosi all'unisono, producono un'onda meccanica; a sua volta, il corpo, vibrando, trasmetterà queste onde al mezzo che lo circonda.

L'aspetto importante da sottolineare è che i suoni necessitano di un mezzo per propagarsi (solido, liquido, gas), ovvero, a differenza delle onde luminose, non possono esistere in assenza di materia, cioè non si propagano nel vuoto.

Un'onda si dice meccanica se la perturbazione avviene attraverso un mezzo che può essere solido, liquido o gassoso. In questo caso sono le caratteristiche di elasticità e di rigidità del mezzo che determinano il modo in cui ne avviene la propagazione.

Le singole particelle di un materiale elastico si muovono con oscillazioni di tipo elastico, generando un'onda anch'essa di tipo elastico. L'utilizzo della tecnologia ultrasonora si avvale esclusivamente di onde elastiche.

In un solido, un'onda si propaga sempre in una determinata direzione e le relative oscillazioni trasmesse procedono anch'esse nella stessa direzione, definita, appunto, direzione di propagazione. In base alla loro direzione di propagazione si possono avere differenti tipi di onde.

In generale le onde sonore possono essere di quattro tipologie diverse: onde longitudinali, onde di taglio, onde superficiali e onde piatte o Lamb.

Nell'ispezione ultrasonica le onde maggiormente utilizzate sono soprattutto longitudinali e di taglio; meritano una menzione anche le onde superficiali, usate, però, solo in situazioni particolari.

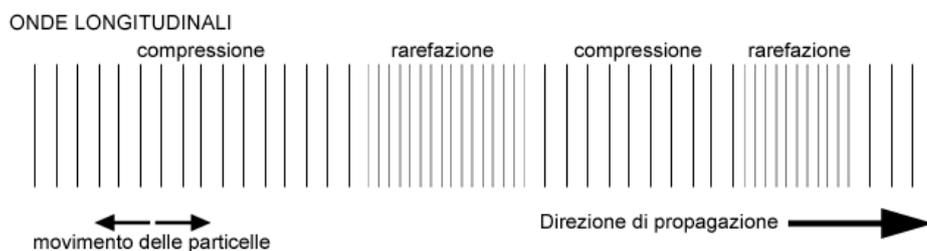


Figura 1.2. Rappresentazione di un'onda longitudinale, detta anche "di pressione"

Onde longitudinali. Un'onda si dice longitudinale quando le oscillazioni delle particelle si verificano in una direzione parallela rispetto alla direzione di propagazione dell'onda: i versi delle due direzioni coincidono. Ne sono un esempio generale le onde sonore. Le onde longitudinali sono chiamate anche onde di pressione (o di compressione). Le particelle elementari disposte su un piano ideale aumentano e diminuiscono ciclicamente la loro distanza rispetto al piano successivo creando contemporaneamente zone di pressione e di depressione: una particella investita da un'onda di energia trasmetterà alla successiva l'oscillazione con un certo ritardo creando, così, delle zone di pressione e delle zone di rarefazione. Da qui il nome di onda di pressione. Queste onde si propagano tipicamente nei mezzi solidi, liquidi e aeriformi, e rappresentano la tipologia di onda più utilizzata per le ispezioni ultrasonore e sono, chiaramente, le stesse di cui ci siamo serviti nelle nostre prove.

Onde trasversali. Un'onda si dice trasversale quando le oscillazioni sono ortogonali rispetto alla direzione di propagazione. Ogni piano di particelle vibra parallelamente a se stesso essendo sottoposto a una tensione di taglio. A differenza di quelle di pressione, le onde trasversali si propagano esclusivamente nei solidi perché liquidi e gas non sono in grado di trasmettere forze di taglio. Vengono utilizzate quasi esclusivamente per l'ispezione ultrasonora di giunzioni saldate.

Onde Superficiali. Si generano quando la vibrazione avviene secondo orbite ellittiche, combinando sia un movimento longitudinale che un movimento trasversale. Ogni particella trasmette l'oscillazione alla successiva in maniera elastica generando, così, un moto ondoso.

Si propagano solo negli strati più esterni del materiale e all'interfaccia tra due mezzi differenti.

Avendo la particolarità di seguire perfettamente l'andamento della superficie del materiale esaminato, rilevandone facilmente possibili difetti, le onde superficiali sono largamente utilizzate per ispezionare anche aree difficilmente raggiungibili con altri tipi di onde.

Come tutte le onde, anche gli ultrasuoni sono caratterizzati da parametri fondamentali quali: frequenza (f), periodo (T), ampiezza, lunghezza d'onda (λ), velocità di propagazione (V), intensità (I).

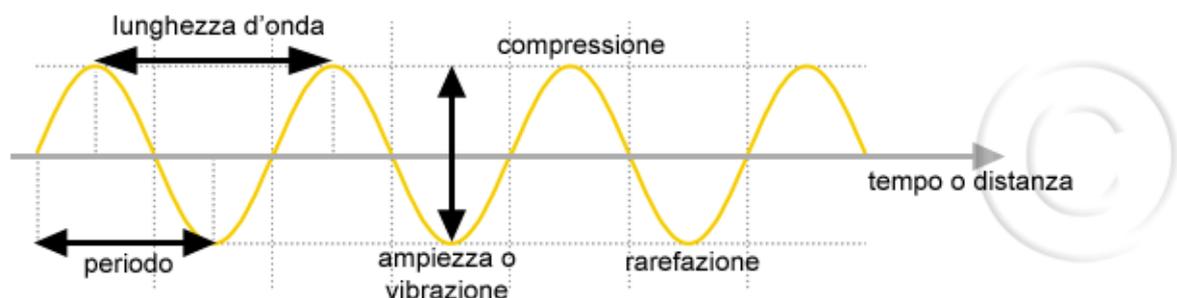


Figura 1.3. Caratteristiche fondamentali delle onde ultrasonore

La **frequenza**, normalmente indicata con la lettera f , indica il numero di oscillazioni compiute in un intervallo di tempo pari ad un secondo. Si calcola con la seguente formula:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Ha come unità di misura l'hertz (Hz). Le onde percepibili dall'orecchio umano hanno una frequenza inclusa nell'intervallo 20-20000 Hz; gli ultrasuoni, invece, spaziano dagli oltre 20 kHz fino ad arrivare a 200 MHz.

Il **periodo T** è l'intervallo di tempo impiegato per compiere un'oscillazione.

Si indica in secondi, s.

L'**ampiezza** rappresenta il massimo spostamento compiuto dalle molecole rispetto alla posizione di equilibrio. All'ampiezza è legata la pressione sonora che rappresenta la forza per unità di superficie esercitata perpendicolarmente al fronte d'onda; questo parametro è direttamente misurabile con gli strumenti dato che l'ampiezza dei picchi e la pressione sonora sono direttamente proporzionali.

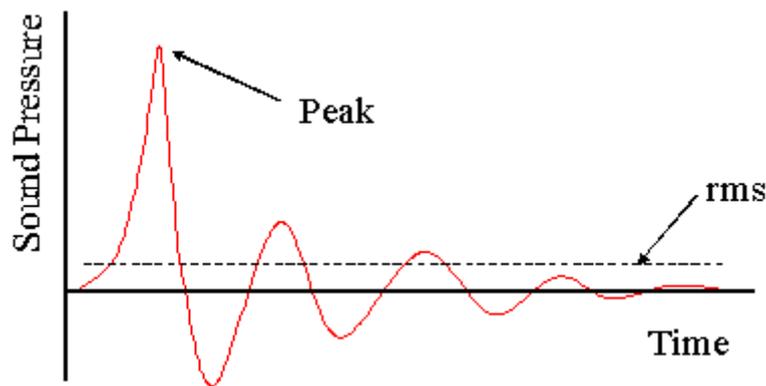


Figura 1.4. Rappresentazione dell'ampiezza rms sullo spettro d'onda

La **lunghezza d'onda** è la distanza percorsa dall'onda nel periodo considerato; graficamente rappresenta la distanza tra due massimi. Viene espressa tramite la relazione qui sotto riportata:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

ed è il rapporto tra la velocità di propagazione e la frequenza.

Si misura in metri (m).

La **velocità di propagazione V** indica lo spazio percorso dal fronte d'onda nell'unità di tempo.

E' indipendente dalla frequenza, ma è correlata esclusivamente alle caratteristiche del materiale.

Si misura in m/s.

E' il parametro calcolabile indirettamente tramite la tecnica ultrasonora e verrà trattata in seguito molto più dettagliatamente.

L' **intensità** (I) è definita come il flusso dell'energia trasportata dall'onda nell'unità di tempo attraverso una superficie di aria unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

1.2 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DEGLI ULTRASUONI

I principi fisici di **attenuazione**, **riflessione**, **trasmissione** e **rifrazione** sono i principi fondamentali su cui si basa il metodo ultrasonoro per la ricerca di difetti, imperfezioni o disomogeneità. Di seguito una loro breve descrizione.

Attenuazione. Un'onda che viaggia attraverso un mezzo materiale è destinata inevitabilmente ad estinguersi; la sua ampiezza diminuirà con il tempo fino ad annullarsi.

Oltre al normale fenomeno di diffusione dell'onda, in un materiale avvengono dei fenomeni naturali di scattering e di assorbimento che indeboliscono il suono, un effetto combinato dei due fenomeni produce l'attenuazione.

Lo scattering è il riflesso del suono in direzioni diverse dalla sua direzione originale di propagazione.

L'assorbimento è la conversione dell'energia sonora in altre forme di energia.

Questi due fenomeni sono entrambi dovuti alla presenza di irregolarità e di dislocazioni interne inerenti il materiale in esame,[6].

Riflessione e trasmissione. E' ormai risaputo che un'onda incidente sulla superficie di separazione tra due mezzi viene in parte trasmessa, attraversa, cioè, l'ostacolo, e in parte riflessa, rimbalza sulla superficie.

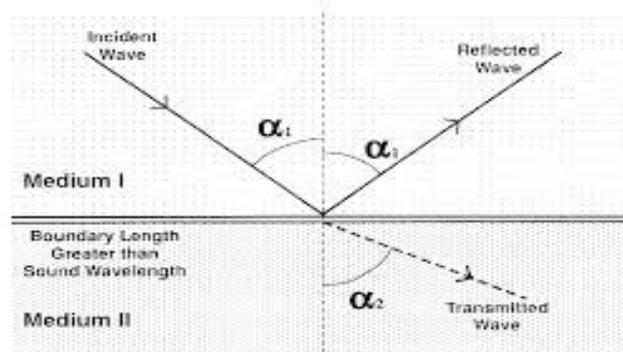


Figura 1.5. Rappresentazione del fenomeno di riflessione e trasmissione delle onde

L'angolo α_1 compreso tra la normale al piano d'incidenza e l'onda riflessa è chiamato angolo di riflessione ed è uguale all'angolo di incidenza (compreso tra la normale al piano e l'onda incidente).

Invece l'angolo α_2 viene nominato angolo di trasmissione.

Altro fenomeno d'interesse che governa il cammino di un'onda ultrasonora attraverso un mezzo è la **rifrazione**. In ottica la rifrazione avviene quando un'onda luminosa passa da un mezzo a un altro avente un indice di rifrazione diverso. Sul bordo dei due mezzi, la velocità di fase dell'onda è modificata, cambia direzione e la sua lunghezza d'onda è aumentata o diminuita.

Il fenomeno della rifrazione è governato dalla legge di Snell.

1.3 MODULO ELASTICO DINAMICO

In meccanica un corpo deformabile sottoposto ad una forza subirà un cambiamento di forma; la forza applicata (che può essere intesa semplicemente come una sollecitazione esterna statica o dinamica) crea uno stato di sollecitazione che induce nella struttura una deformazione.

Senza scendere troppo nel particolare, ci limiteremo a considerare solo il caso in cui la sollecitazione sia monodirezionale e perpendicolare alla superficie di applicazione.

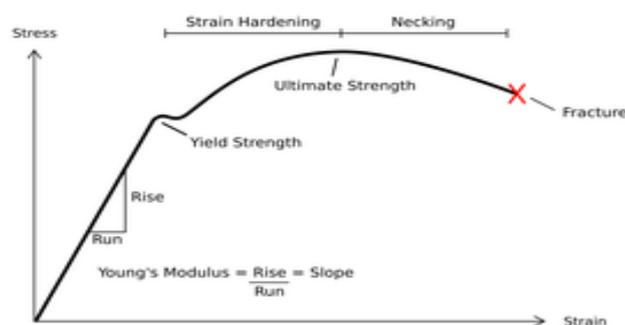


Figura 1.6. Diagramma sforzo-deformazione

Tenendo presente che lo sforzo (σ) è definito come il rapporto tra la forza applicata e la superficie su cui agisce e la deformazione (ϵ), invece, è definita come il rapporto tra la variazione della lunghezza subita (Δl) e la lunghezza iniziale (l), un materiale si dirà “a comportamento elastico” se, sottoposto ad una forza modesta, si deforma in modo reversibile e, alla rimozione del carico, riacquista la sua forma iniziale senza subire deformazioni.

Solo in questo caso, per la maggior parte dei materiali conosciuti, ci sarà una stretta correlazione tra la forza applicata e la deformazione: le deformazioni misurate risulteranno direttamente proporzionali alla sollecitazione applicata.

Possiamo così introdurre la costante elastica E , definita come il rapporto tra la tensione specifica e la deformazione relativa specifica:

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Come si intuisce, il modulo di elasticità è una proprietà meccanica molto importante perché, caratterizzando la resistenza di un materiale ad una presunta deformazione, ne determina il grado di elasticità.

Generalmente, il modulo di elasticità viene ricavato per mezzo di prove di trazione che richiedono, però, la rottura del materiale. Nel nostro caso, invece, abbiamo calcolato E ricorrendo ad un test NDT utilizzando la prova ultrasonora.

Il valore di E può essere calcolato studiando la propagazione delle onde di tipo elastico all'interno dei materiali, essendo il valore della velocità delle onde ultrasonore strettamente correlato alle caratteristiche elastiche del materiale (modulo E e modulo di Poisson dinamici) e con la sua densità tramite la formula:

$$V = \sqrt{\frac{E(1+\mu)}{p(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (4)$$

dove:

E = modulo elastico sopra definito

μ = costante elastica o modulo di Poisson

p = densità del materiale in esame

In un materiale sottoposto ad una sollecitazione monodirezionale longitudinale definiamo la costante elastica μ come il rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale (deformazione lungo la direzione di carico).

Con le prove ultrasonore otteniamo indirettamente la velocità di propagazione delle onde V e così riusciamo a ricavare, usando la formula inversa della (4), il modulo elastico dinamico E .

1.4 TRASDUTTORI PIEZOELETTRICI: GENERAZIONE ONDE SONORE

Le sonde ultrasonore sono dei trasduttori che convertono impulsi elettrici in vibrazioni meccaniche e, viceversa, vibrazioni meccaniche in energia elettrica. Sono costituite da un materiale attivo avente capacità piezoelettriche, consistente in una lamina di materiale polarizzato (cosiddetto perché composto da molecole aventi cariche opposte).

Se viene applicata una tensione elettrica alle superfici opposte della lamina, generando così un campo elettrico, le molecole polarizzate si allineano parallelamente al campo stesso, seguendone la direzione, in modo da poter formare un dipolo. Questo allineamento porterà il materiale ad espandersi, trasformando così l'energia elettrica trasferitagli in energia meccanica, che risulterà essere equivalente all'energia spesa per ottenere la sua deformazione.

Per questi materiali vale anche il fenomeno inverso, ovvero, sottoponendo la lamina di materiale ad uno sforzo di trazione o di compressione, capace di deformarla, tra le superfici opposte si genererà un campo elettrico. Dunque sarà avvenuta una trasformazione di energia meccanica, quella trasferita al cristallo attraverso l'azione di deformazione, in energia elettrica.

Il fenomeno appena descritto, caratteristico di alcuni materiali specifici, è conosciuto con il nome di effetto piezoelettrico ed è alla base del comportamento di tutte le sonde usate nel metodo ultrasonoro.

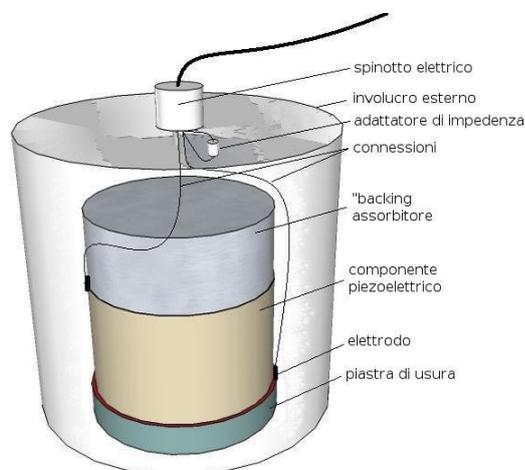


Figura 1.7. Componenti di un trasduttore piezoelettrico

CAPITOLO 2 - ESECUZIONE DELLA PROVA E STRUMENTI UTILIZZATI

2.1 PROCEDIMENTO E TECNICHE IMPIEGATE

Ci sono due principali tecniche di controllo, mediante ultrasuoni, utilizzate per acquisire dati sul materiale:

- Tecniche “**through transmission**” (metodo “**in trasmissione**”)
- Tecniche “**pulse-eco**” (“**eco-impulso**” o conosciuta anche come metodo “**in riflessione**”)

La tecnica d’indagine da noi utilizzata è stata quella “in trasmissione”.

E' da notare che questo tipo di tecnica comporta tre modalità differenti di conduzione dell'ispezione ultrasonora sul materiale esaminato e cioè, trasmissione diretta, semi-diretta o indiretta.

Seguendo la norma di riferimento attualmente in vigore, la UNI EN 12504-4: 2005, usata per la determinazione del modulo elastico dinamico tramite indagini ultrasoniche, nel nostro lavoro si è scelto di utilizzare la tecnica in trasmissione diretta per ispezionare i provini in calcestruzzo.



Figura 2.1. Esecuzione della tecnica in trasmissione diretta su un provino parallelepipedo



Figura 2.2 Esecuzione della tecnica in trasmissione diretta su un provino cubico

Questo metodo prevede l'utilizzo di due sonde disposte su superfici opposte dell'elemento strutturale da esaminare, accuratamente allineate tra loro per ottenere una corretta esecuzione.

In particolare le due sonde utilizzate, pur basandosi entrambe sull'effetto piezoelettrico, svolgono funzioni diverse ai fini dell'indagine: una sonda (trasduttore emittente) trasmette un fascio di onde ultrasonore, l'altra (sonda ricevente), situata in posizione opposta, riceve lo stesso fascio dopo che esso ha attraversato il provino lungo il suo spessore.

In virtù delle sue caratteristiche, la prima sonda genera onde sonore seguendo uno schema di base ben preciso: uno specifico strumento, il pulser-receivers, applica una tensione elettrica di breve durata (impulso) alla lamina di materiale polarizzato che, deformandosi, inizia a vibrare, fino a generare un fascio di onde ultrasonore. Il treno di onde sonore così generato viene trasmesso al materiale in esame per semplice contatto.

La sonda utilizzata come ricevitrice, inizialmente in quiete, appoggiata sulla superficie opposta del materiale in esame, riceve, sempre per contatto, il treno di onde generato iniziando così a vibrare (questo accade solo quando le frequenze di vibrazione delle sonde coincidono). Contrariamente a quanto avvenuto in precedenza, la lamina di materiale polarizzato, vibrando, produrrà degli impulsi di tensione che saranno questa volta trasmessi, tramite cavo, al pulser-receivers.

Il segnale così captato dalle sonde fornisce tutte le informazioni fondamentali sul materiale in esame; però, prima di poter essere visualizzato su un display, deve essere elaborato dagli strumenti "pulser-receivers", fondamentali sia nel "creare" il fascio ultrasonoro che nel "riceverlo".

2.2 DPR300 E PUNDIT: I DUE PULSER-RECEIVERS

Nel nostro studio le indagini sono state condotte ripetendo ogni prova ultrasonora sui provini in trasmissione con due coppie di sonde caratterizzate da una frequenza differente e collegate ognuna ad un diverso tipo di elaboratore di segnale. La prima coppia di sonde aveva una frequenza caratteristica di 50 kHz ed era collegata al PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester), la seconda coppia aveva una frequenza di 500 kHz ed era collegata al DPR300.

Il pundit lavora con basse frequenze ed è progettato soprattutto per lavorare con sonde particolari (le stesse utilizzate nel nostro esperimento), il DPR300, invece, è un generatore di impulsi generico ad alte frequenze. Il DPR300 ha un range di frequenza che va da 35 MHz con opzione fino a 50 MHz, l'ampiezza va da 100V a 475V (con un massimo di 900V). Il PUNDIT, invece, ha un range di frequenza che va da 200 kHz a massimo 1 MHz e ha una potenza massima in emissione di 40 Volt r.m.s.

Tramite il valore del tempo impiegato dall'impulso per percorrere la distanza tra le due superfici opposte dell'oggetto, ricavabile manualmente dal grafico mostrato dai due strumenti, è possibile risalire al valore della velocità ultrasonora, parametro investigativo fondamentale del nostro lavoro.



Figura 2.3. Dpr300, Pulser-Receivers utilizzato nelle nostre prove



Figura 2.4. Pundit, Pulser-Receiver utilizzato nelle prove

2.3 APPROFONDIMENTO SUI PULSER-RECEIVERS E PRESENTAZIONE DEL SEGNALE

I pulser-receivers sono strumenti di elaborazione del segnale che, abbinati alle sonde piezoelettriche e ad un computer (o, in mancanza di quest'ultimo, ad un semplice oscilloscopio), costituiscono l'attrezzatura di base impiegata per l'ispezione ultrasonora.

Nell'immagine sottostante è mostrato in maniera molto semplificata lo schema di base dell'attrezzatura impiegata in un'indagine ultrasonora, condotta tramite tecnica pulse-echo, che si avvale, a differenza della tecnica da noi usata, di un'unica sonda funzionante sia come trasmittente che come ricevente; nonostante queste differenze, il principio di funzionamento alla base del pulser-receivers è lo stesso.

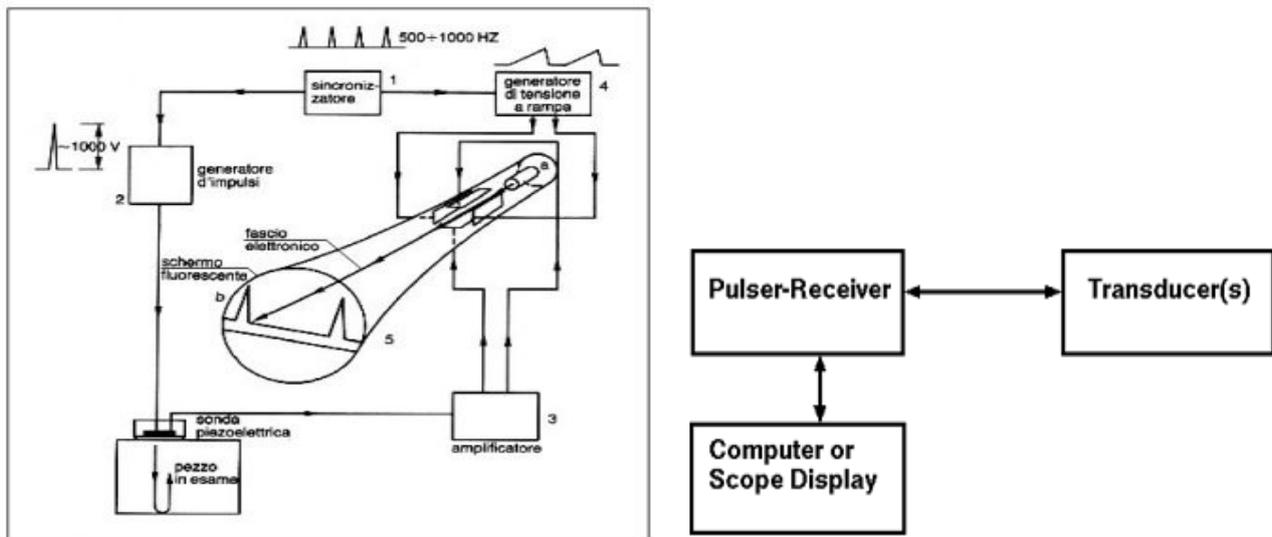


Figura 2.5. Schema di base dei Pulsar-Receiver

Nell'immagine si vede che il pulsar-receivers è composto da due sezioni (da cui il nome che ne deriva) una Pulsar section e una Receiver section,[6].

La Pulsar-section fornisce impulsi elettrici di energia di grande ampiezza che, tramite un apposito cavo, vengono inviati al trasduttore (sonda emittente) per essere trasformati in onde ultrasonore. Sia l'energia dell'impulso (intesa come tensione applicata al trasduttore) che la sua durata possono essere modificate agendo tramite delle apposite manopole presenti sul pannello di controllo dello strumento.

La Receiver-section, invece, accoglie i segnali di tensione inviati dal trasduttore (sonda ricevente) e li amplifica (tramite apposito amplificatore) così da renderlo disponibile in uscita come radiofrequenza (RF), pronta per essere visualizzata, tramite programma dedicato, sullo schermo del computer (o su quello dell'oscilloscopio).

Nelle tecniche di controllo il segnale digitalizzato può essere presentato graficamente in tre diverse modalità: A-scan, usata dal nostro sistema, B-scan e C-scan.

La presentazione A-scan, notevolmente più impiegata delle altre, mostra la quantità di energia ultrasonora ricevuta in funzione del tempo; in breve, il segnale ultrasonoro è rappresentato, come visibile (Figg.2.6, 2.7), secondo una scala temporale nella quale la quantità di energia (intesa come un impulso di tensione e quindi misurato come un'ampiezza) viene mostrata lungo l'asse verticale mentre il valore temporale è raffigurato lungo l'ascissa. Il valore in ascissa corrispondente al picco iniziale di frequenza del segnale rappresenta il tempo cercato.

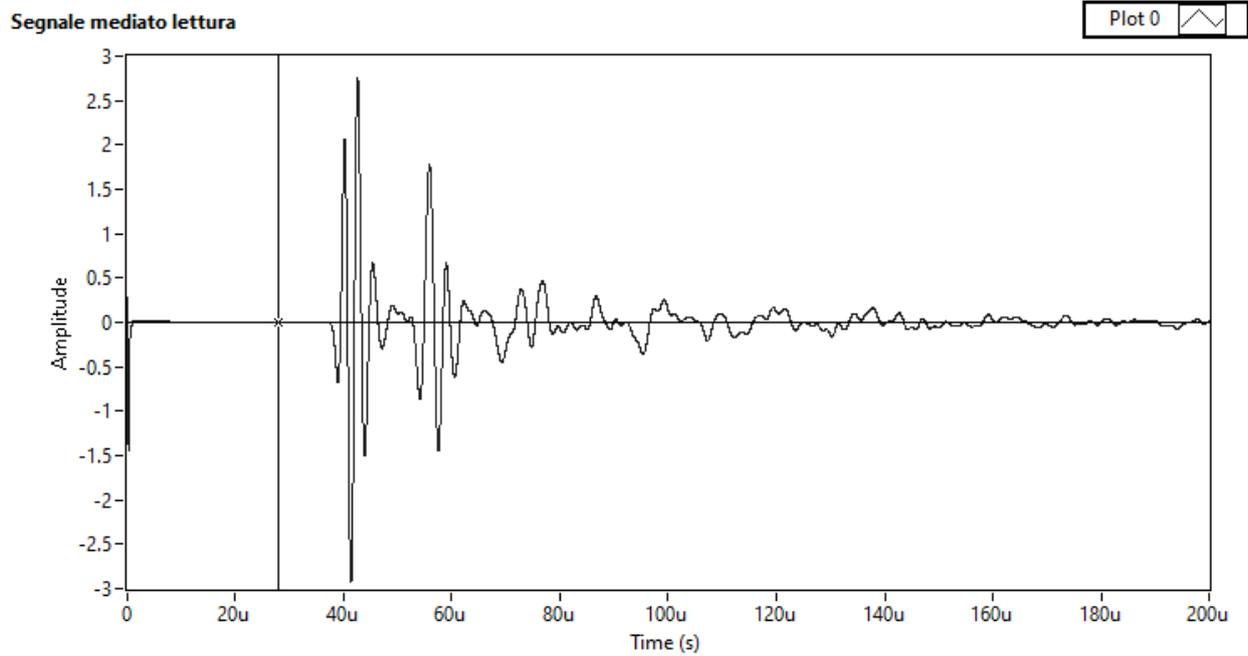


Figura 2.6. Presentazione A-scan del segnale ottenuto tramite dpr300 con sonda a 500 kHz

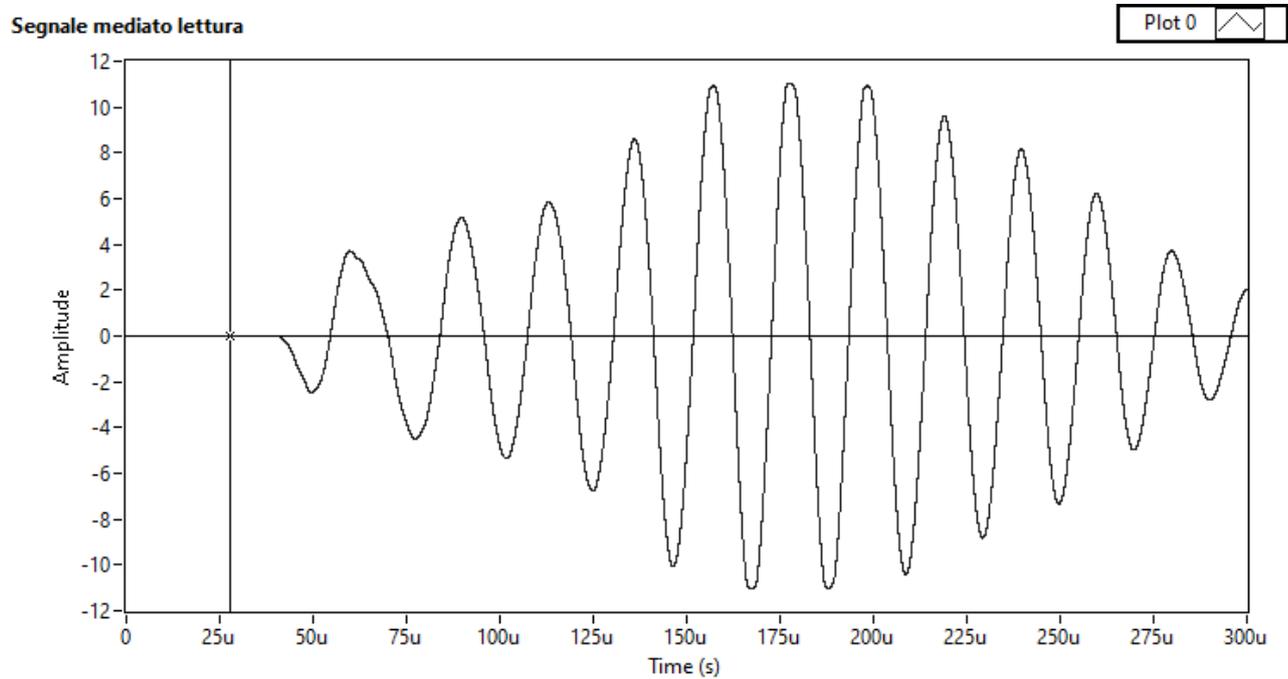


Figura 2.7. Presentazione A-scan del segnale ottenuto tramite pundit con sonde a 50 kHz

CAPITOLO 3 - CALCESTRUZZO

PREMESSA

Il progetto EnDurCrete prevede lo sviluppo di un nuovo tipo di calcestruzzo armato costituito da una matrice cementizia integrata con materiali compositi tali da conferire alle future strutture capacità meccaniche elevate e proprietà di self-sensing. Per perseguire il fine ultimo del suddetto progetto si è deciso di realizzare 6 diverse malte cementizie, con diversi contenuti di filler e compositi conduttivi, e di eseguire, su ognuna di esse, varie prove, previste dalle normative in vigore, così da poterne confrontare le caratteristiche salienti, meccaniche e fisiche. A tal proposito, si è convenuto di realizzare, per ogni malta, 25 provini idonei alle prove, di cui 19 studiati mediante tecnica ultrasonora. I vari provini, dopo un identico periodo di stagionatura iniziale, sono stati trattati, ciascuno in maniera differente, tramite assorbimento igroscopico, per valutarne le condizioni nel tempo.

3.1 MALTE CEMENTIZIE

La malta cementizia è un conglomerato artificiale costituito da una miscela di legante (cemento), acqua, inerti fini (sabbia) ed eventuali additivi, il tutto combinato in quantità tali che, dopo il processo di indurimento, è garantita una certa resistenza meccanica allo stato asciutto.

Ogni malta è stata realizzata dai Colleghi laureandi in Ingegneria Civile seguendo delle normative ben precise, usando acqua pura, cemento Portland (legante), sabbia esincalce (inerte) e, in linea con lo scopo della tesi, diverse tipologie di filler conduttivi, materiali compositi, quali char di gassificazione, fibre di carbonio riciclate e una combinazione delle due, ovviamente in dosaggi differenti per ogni impasto.

Nello specifico, come detto, sono state realizzate 6 diverse malte cementizie, identificate tramite una dicitura che ne richiama la costituzione della miscela, così suddivise:

- **REF** è il getto di riferimento, una malta cementizia usata come modello di confronto e preparata senza l'aggiunta di filler o fibre conduttive
- **0.2 RCF** è il getto nel quale è presente una quantità di fibre pari allo 0.2% in volume sul totale di peso della malta
- **2CH** è il getto che presenta una percentuale di 2% sul peso del cemento di filler (char di gassificazione)

- **4CH** getto che presenta una percentuale di filler doppia rispetto al precedente, ovvero il 4% di char sul peso del cemento
- **2CH+0.2RCF** getto ottenuto combinando i due filler aggiuntivi, contenente cioè il 2% in peso di char e lo 0.2% in volume di fibre
- **4CH+0.2RCF**, risultante sempre dalla combinazione dei due filler, con lo 0.2% in peso delle fibre di carbonio ma, questa volta, con il 4% di char

Per tutti i tipi di malta studiati nel processo di mix-design sono stati fissati, dai relativi sperimentatori, questi due rapporti:

- Il rapporto acqua/cemento (a/c) pari a 0.3
- Il rapporto inerte/cemento (i/c) pari a 3.0

3.2 PROVINI

Dei 25 provini gettati per ogni malta cementizia, 19 sono stati studiati con la tecnica ultrasonora mentre i restanti 6 sono stati utilizzati dai Colleghi laureandi in Ingegneria Civile per prove distruttive di resistenza meccanica. Ogni tipologia di provino ha una conformazione diversa (per forma o particolarità) che ne permette non solo l'utilizzo per la specifica prova, ma anche un diretto confronto per valutarne l'evoluzione delle caratteristiche meccaniche nel tempo. A tal proposito si è deciso di realizzare sia provini di forma cubica che provini parallelepipedi, consoni ad un test ultrasonoro, per confrontarne il diverso andamento della velocità di propagazione degli ultrasuoni nel tempo. Sono stati realizzati, altresì, provini fessurati per valutare l'efficacia della tecnica ultrasonora nel rilevare la presenza di difetti, utilizzando sempre l'analisi della velocità di propagazione. Inoltre su alcuni provini sono state aggiunte delle reti metalliche in acciaio utili per le prove di resistività condotte dai Colleghi tesisti.

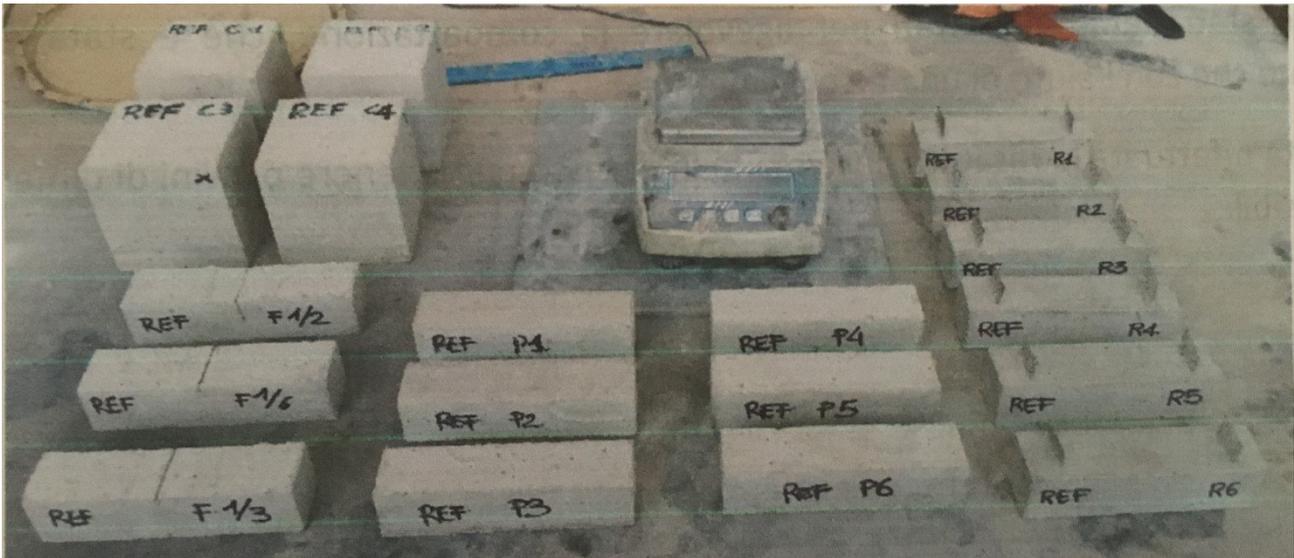


Figura 3.1. Foto dei provini gettati con la malta cementizia di riferimento REF

Per ogni malta cementizia, le tipologie dei 19 provini studiati con gli ultrasuoni, sono così suddivise e nominate:

- n.6 provini parallelepipedi con dimensione 40*40*160mm, indicati con la lettera **P** (provino), provini campione realizzati come modello di riferimento e confronto
- n.6 provini, parallelepipedi, con dimensioni congruenti ai precedenti, ma con l'aggiunta di reti metalliche, collocate superficialmente e lateralmente, e per questo motivo contrassegnati con una **R** (provini con le reti)
- n.3 provini parallelepipedi, identici ai precedenti dal punto di vista dimensionale, ma provvisti di una fessura centrale, posta a diversa altezza dalla superficie superiore (rispettivamente a 1/6, 1/3 e 1/2 dell'altezza stessa); data questa loro particolarità sono identificati tramite una dicitura composta sia dalla lettera **F** sia dalla relativa profondità della fessura
- n.4 provini cubici di dimensione 100*100*100, appositamente realizzati per prova ultrasonora, e indicati con la lettera **C** (cubici)

Per differenziare le diverse tipologie dei provini e dei relativi tipi di malta impiegata per la loro realizzazione, su ognuno di essi è stata riportata sia la sigla della malta (accuratamente indicata nel paragrafo precedente) che la lettera e il numero di identificazione. Ad esempio, il provino con la sigla identificativa **REF R1** si riferisce ad un provino a forma di parallelepipedo, di dimensioni 40*40*160, provvisto di reti e gettato con la malta cementizia di riferimento (REF), cioè senza aggiunta di filler.

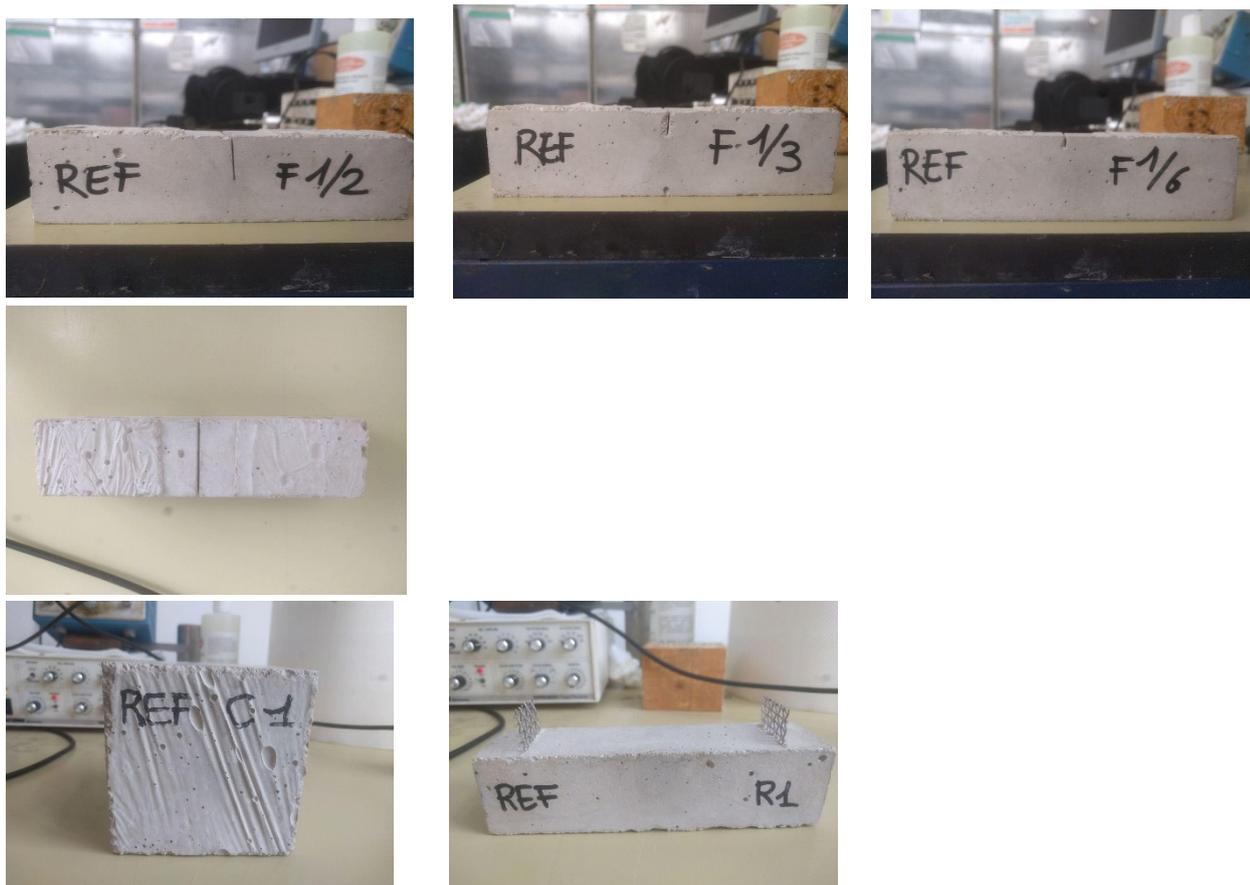


Figura 3.2. Provini studiati: con frattura a 1/2 ,1/3, 1/6, vista dall'alto, cubico e parallelepipedo con reti

3.3 COMPOSITI AGGIUNTI

Un composito è un materiale multifasico, creato artificialmente, che presenta un equilibrio ottimale delle fasi costituenti, in modo da garantire proprietà migliori rispetto ai singoli costituenti.

I compositi possono essere particellari, ovvero rinforzati con particelle di grandi o piccole dimensioni, fibro-rinforzati, se contenenti fibre, oppure strutturali, se contengono laminati o pannelli sandwich. Nel nostro caso abbiamo usato le prime due tipologie di compositi per

impastare le diverse malte cementizie, in particolare modo ci siamo serviti di particelle di char e fibre di carbonio riciclato, scelte perché combinano buone proprietà conduttive associate ad un'ottima resistenza meccanica.

Il **char** utilizzato per le malte è un sottoprodotto del processo di gassificazione del carbone: quest'ultimo, a temperature elevate e in presenza di ossigeno o vapore, reagisce col diossido di carbonio e col vapore d'acqua producendo monossido di carbonio e idrogeno. Il prodotto di scarto di questo processo è il char, una particella nera di piccole dimensioni. L'interazione rinforzo/matrice avviene a livello atomico o molecolare così che le particelle disperse sono in grado di limitare il movimento delle dislocazioni.

Le **fibre di carbonio riciclate**, invece, sono ottenute da composti chimici di sintesi derivanti dal carbone e dal petrolio e ridotti in filamenti più o meno lunghi. In questa sperimentazione sono state utilizzate fibre di carbonio riciclato (RCF) provenienti da una miscela di fibre di carbonio e grafite, tagliate corte e rivestite con glicerolo. Le fibre, in generale, garantiscono alle parti strutturali eccellenti caratteristiche meccaniche (alto modulo elastico) ed estrema leggerezza.

CAPITOLO 4 - MATURAZIONE DEI PROVINI

INTRODUZIONE

Nel corso del progetto EnDurCrete si è stabilito di procedere con una fase iniziale di maturazione dei provini che prevedesse il monitoraggio nel tempo, con tecnica ultrasonora, delle caratteristiche meccaniche e fisiche, allo stato indurito, degli stessi. Questa prima fase di lavoro, durata 147 giorni, ha riguardato sia il periodo di stagionatura obbligatorio, previsto dalle normative per ogni tipo di calcestruzzo, sia un successivo trattamento igroscopico, mirato a stabilire le eventuali conseguenze nel tempo causate da un eccessivo assorbimento di acqua da parte del materiale in esame.

4.1 STAGIONATURA INIZIALE

La stagionatura è l'insieme di precauzioni che, durante il processo di indurimento, permettono di trasformare l'impasto fresco in un materiale resistente, privo di fessure e durevole. Con un

adeguato periodo di stagionatura protetta, iniziato immediatamente dopo aver concluso le operazioni di posa in opera, il calcestruzzo può raggiungere le sue proprietà potenziali nella massa e in particolare nella zona superficiale. La protezione consiste nell'impedire durante la fase iniziale del processo di indurimento l'essiccazione della superficie del calcestruzzo in primo luogo perché l'acqua è necessaria per l'idratazione del cemento ed in secondo luogo per evitare che gli strati superficiali del manufatto indurito risultino porosi. L'essiccazione prematura rende il copriferro permeabile e quindi scarsamente resistente alla penetrazione delle sostanze aggressive presenti nell'ambiente di esposizione. La presa e l'indurimento dell'impasto cementizio dipendono dalla continua presenza d'acqua e il calcestruzzo contiene una quantità d'acqua libera che assicura l'idratazione del cemento,[7].

Nel nostro caso, le modalità di conservazione e di stagionatura sono state eseguite rispettando le indicazioni relative alle normative vigenti; in effetti, tutti i provini studiati, dopo essere stati scasserati, sono stati conservati in una cella climatica per un periodo di 28 giorni, a temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa del $50\% \pm 5\%$. In questo arco di tempo il monitoraggio dei provini, sempre mediante tecnica ultrasonora, è avvenuto periodicamente, con cadenza settimanale, e, specificatamente, nei giorni di stagionatura 7,14,21 e 28.

4.2 ASSORBIMENTO IGROSCOPICO

Tutte le infrastrutture civili sono soggette a deterioramento nel tempo. Ciò è dovuto a molteplici fattori, in particolar modo all'acqua che, presentandosi in molteplici forme, come ad esempio infiltrazioni, condensa o anche semplicemente come umidità, può recare danni più o meno gravi agli edifici, soprattutto se storici, compromettendone non solo l'integrità, ma anche la salubrità degli ambienti interni, con ripercussioni sullo stato di salute o di vita degli utenti. Essendo il calcestruzzo un materiale naturalmente poroso, può andare incontro a questi tipi di problemi e, quindi, andrebbe costantemente monitorato. Uno degli obiettivi del nostro progetto è stato proprio quello di cercare di capire quali siano i meccanismi che regolano la penetrazione di acqua all'interno del materiale e, di conseguenza, i vari fenomeni scaturiti da questo inconveniente, focalizzando l'attenzione sulle conseguenze provocate da una variazione di umidità relativa nelle malte studiate. A tal proposito definiamo l'assorbimento igroscopico come lo scambio, nell'ambiente circostante, di vapore acqueo, tra l'aria e un qualsiasi materiale poroso, fino al raggiungimento dell'equilibrio. Per determinare le proprietà di assorbimento igroscopico di materiali e prodotti porosi per l'edilizia, la normativa (UNI EN ISO 12571) prescrive l'utilizzo di due metodi: uno che prevede un processo di essiccazione dei provini in

forno, l'altro, detto della camera climatica, che utilizza la conservazione dei provini in una serie di ambienti di prova (recipienti in pvc contenenti soluzioni saline acquose a diversa concentrazione) a umidità relativa crescente.

Per ogni tipo di malta cementizia, i provini selezionati per il test e sottoposti all'assorbimento igroscopico, sono riportati di seguito, mentre i restanti sono stati riposti, senza essere inseriti nei recipienti, nella cella climatica:

- P4, P5, P6 (provini “standard”)
- R4, R5, R6 (provini con le reti)
- C3, C4 (provini cubici)
- F1/6, F1/3, F1/2 (provini fessurati)

Tutti questi provini, passati i 28 giorni di maturazione, sono stati disposti all'interno del forno per l'essiccazione, alla temperatura di $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e, al raggiungimento della massa costante, avvenuto al 42esimo giorno, sono stati sottoposti alla prova ultrasonora, contemporaneamente ai provini presenti in camera climatica.

La massa costante viene raggiunta quando, pesati i provini due volte consecutivamente nelle 24 ore, si ottiene un valore dell'umidità percentuale, minore o uguale allo 0.1%, calcolato tramite la seguente formula:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \leq 0.1 \% \quad (5)$$

dove:

- m è la massa del provino ad ogni livello di umidità relativa, in grammi
- m_0 è la massa del provino essiccato, misurata in g.

	massa (g)			
	C1	C2	C3	C4
GIORNI				
7	2215.59	2214.93	2223.51	2219.79
14	2196.01	2195.39	2199.07	2195.11
21	2188.29	2184.59	2190.7	2188.19
28	2183.77	2182.44	2187.39	2182.05
42	2173.42	2171.42	2083.98	2083.23

Figura 4.1. Esempio dei dati relativi alla massa ripostati su un file Excel riguardanti i provini cubici C da 7 a 42 giorni.

Ultimata l'essiccazione, abbiamo effettuato il secondo test previsto dalla normativa sottoponendo i provini scelti a cinque condizioni ambientali differenti, caratterizzati da un umidità percentuale crescente nel tempo. Questi provini, una volta raggiunta la massa costante, calcolata sempre con la formula precedente (5), sono stati testati con la tecnica ultrasonora, contemporaneamente ai restanti conservati in camera climatica. In seguito, i provini sono stati posti nei successivi recipienti a umidità crescente, per sottoporli alla prova in tutte le condizioni di umidità programmate, raggiungendo la massa costante a 45, 49, 55, 105, 119 giorni.



Figura 4.2. Recipiente in pvc contenente i provini ad umidità percentuale del 8.91%



Figura 4.3. Materiale utilizzato per ricreare le condizioni ambientali di prova scelte

SOLUZIONI SALINE ACQUOSE	
IDROSSIDO DI MAGNESIO (45 GIORNI)	UR 8.91%
CLORURO DI MAGNESIO (49 GIORNI)	UR 33.07%
NITRATO DI MAGNESIO (55 GIORNI)	UR 54.38%
CLORURO DI SODIO (105 GIORNI)	UR 75.47%
NITRATO DI POTASSIO (119 GIORNI)	UR 94.62%

Figura 4.4. Soluzioni saline acquose usate per ricreare le condizioni di prova con umidità percentuale crescente

CAPITOLO 5 - RACCOLTA DATI SPERIMENTALI

INTRODUZIONE

In questo capitolo sono presentati e discussi i dati raccolti sui provini, di tutte le miscele, monitorati nell'arco dei 119 giorni tramite la tecnica ultrasonora. In particolar modo, per studiare e confrontare tra loro le diverse miscele, si è deciso di confrontare graficamente le caratteristiche salienti di ognuna di esse, osservandone la loro variazione nel tempo; ci si è soffermati soprattutto, come già accennato, sul calcolo della velocità ultrasonora UPV, dell'ampiezza RMS e del modulo elastico dinamico.

5.1 INFLUENZA DEI TRATTAMENTI SUI PROVINI

Analizzando i grafici ottenuti dai dati sperimentali, si evidenzia una prima fondamentale differenza dovuta al diverso trattamento a cui sono stati sottoposti i provini; infatti come abbiamo già accennato, dopo un periodo iniziale di stagionatura, alcuni di loro sono stati conservati in camera climatica (P1, P2, P3, R1, R2, R3, C1, C2), i restanti sono stati trattati mediante un processo di assorbimento igroscopico (P4, P5, P6, R4, R5, R6, C3, C4, F1/2, F1/3, F1/6).

	C1,C2 P1,P2,P3 R1,R2,R3	C3,C4 P4,P5,P6 R4,R5,R6 F (tutte)
giorni		
da 7 a 28	stagionatura comune	
42	conservazione in camera climatica	essiccamento
45		8.91%
49		33.07%
55		54.38%
105		75.74%
119		94.62%

Figura 5.1. Legenda sul diverso trattamento subito dai provini

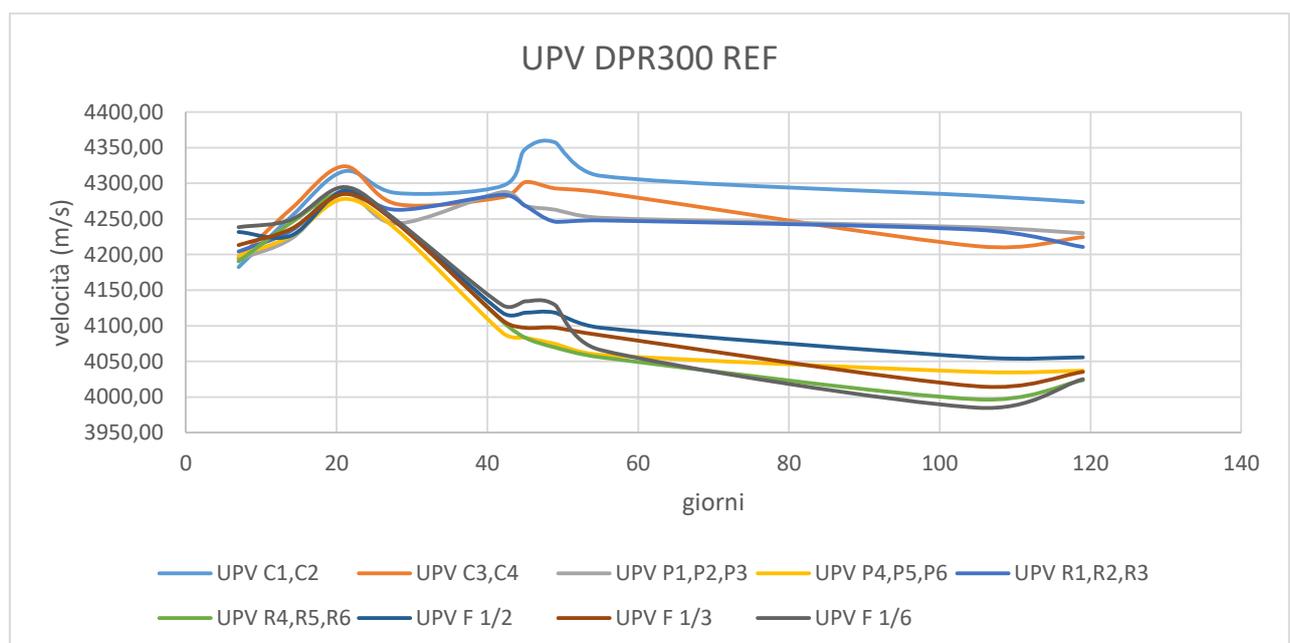


Figura 5.2. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela REF

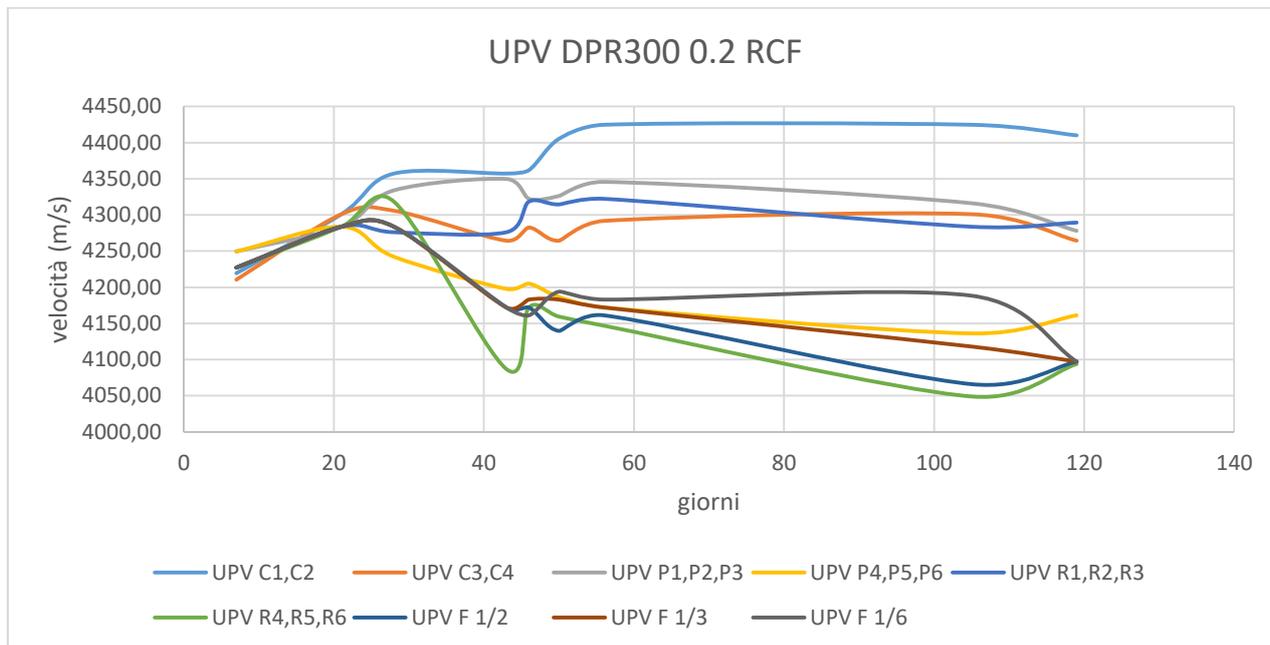


Figura 5.3. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela 0.2RCF

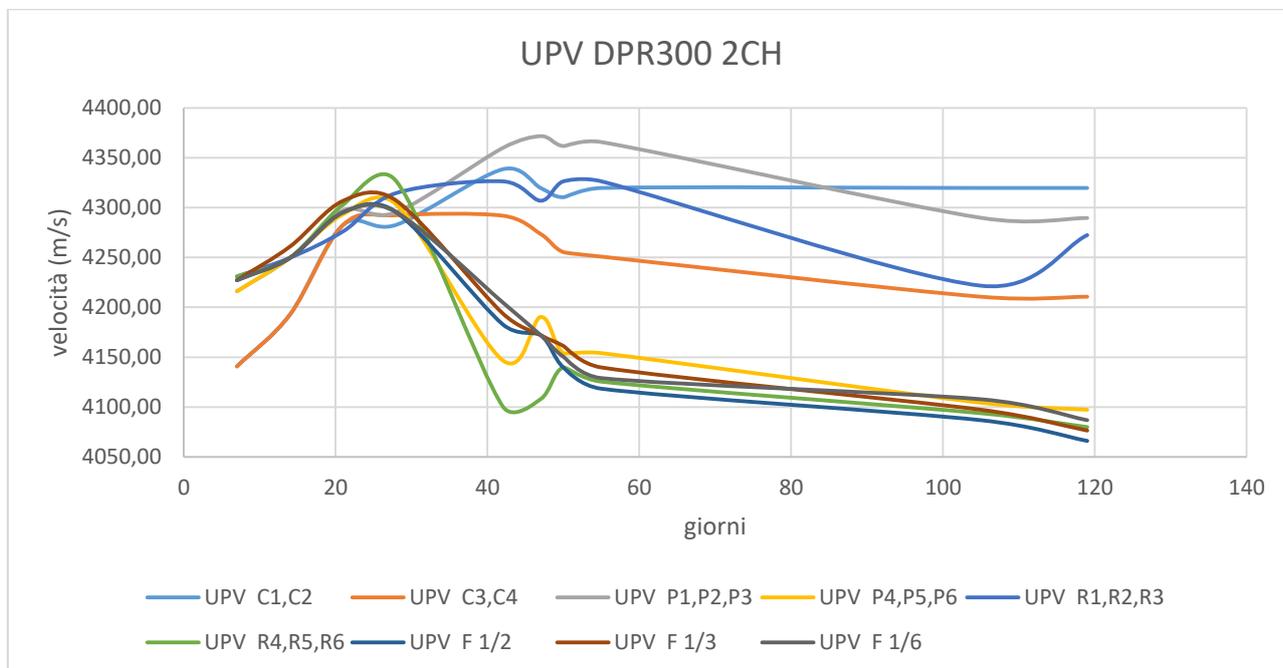


Figura 5.4. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela 2CH

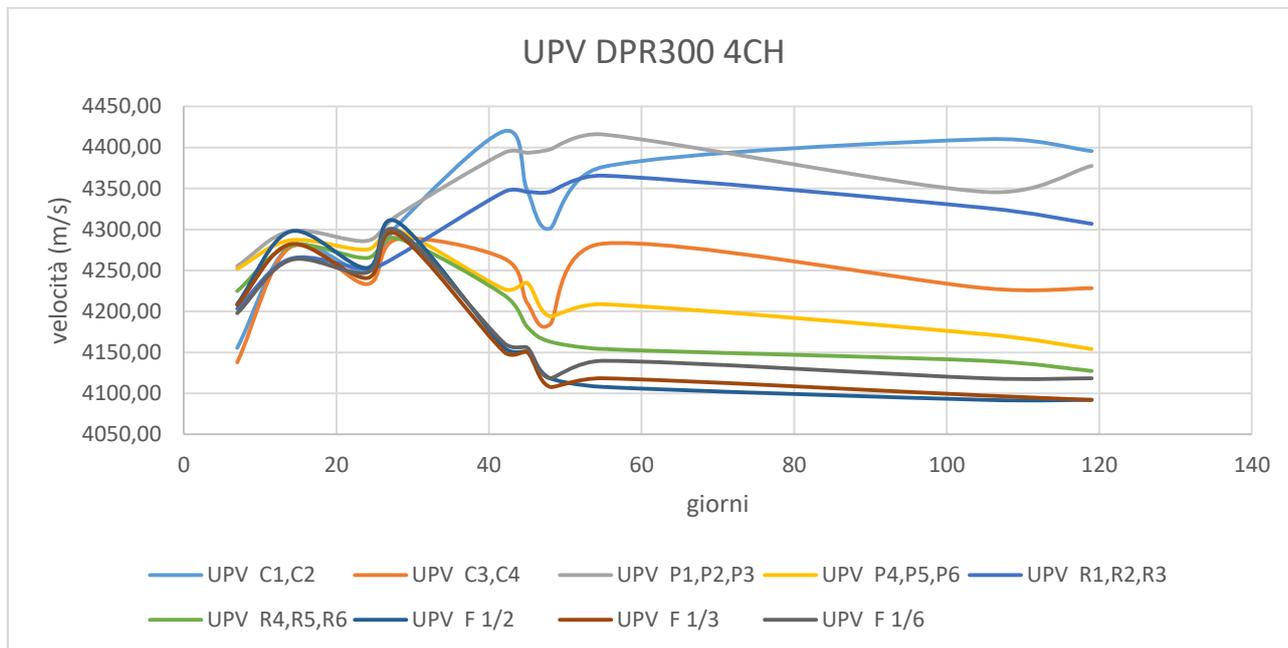


Figura 5.5. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela 4CH

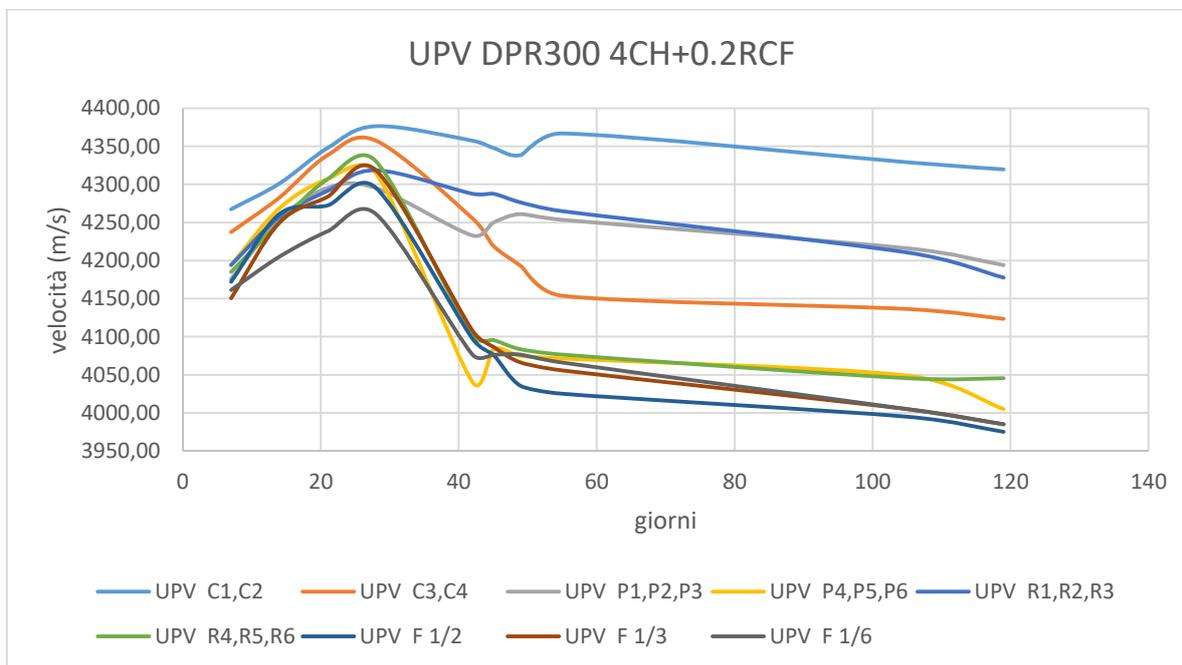


Figura 5.6. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela 4CH+0.2RCF

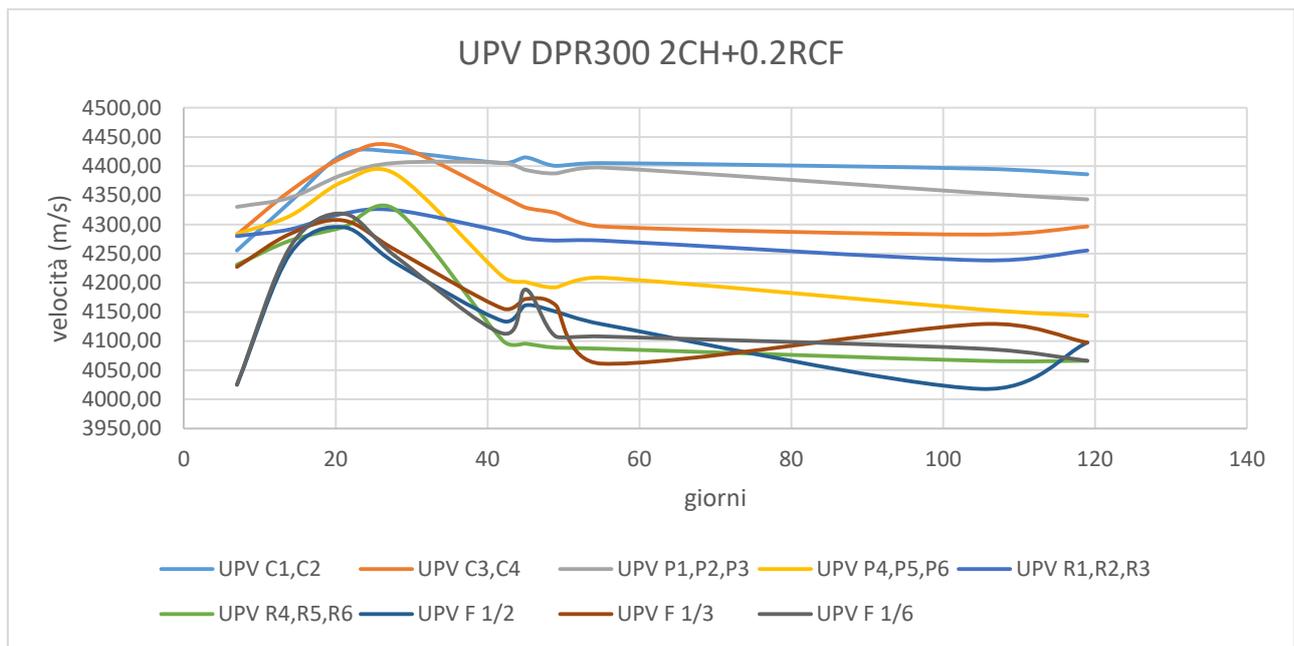


Figura 5.7. Andamento della velocità ultrasonora da 7 a 119 giorni della miscela 2CH+0.2RCF

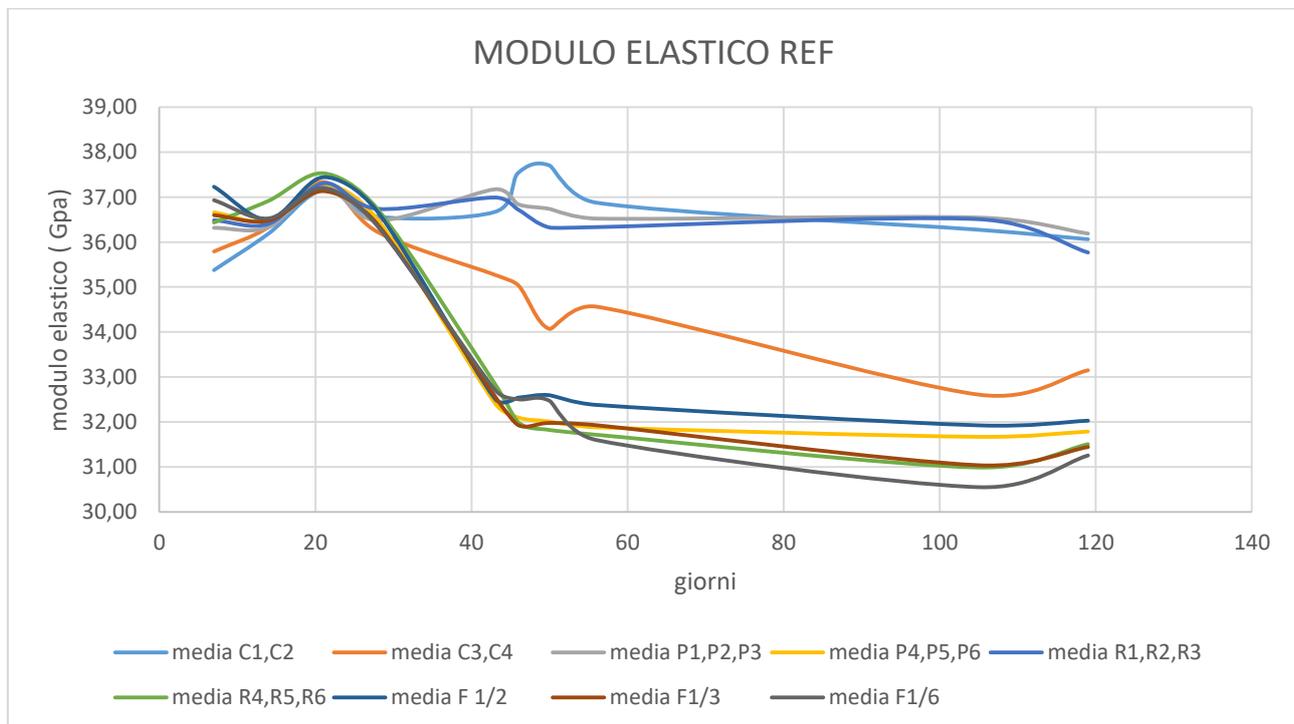


Figura 5.8. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela REF

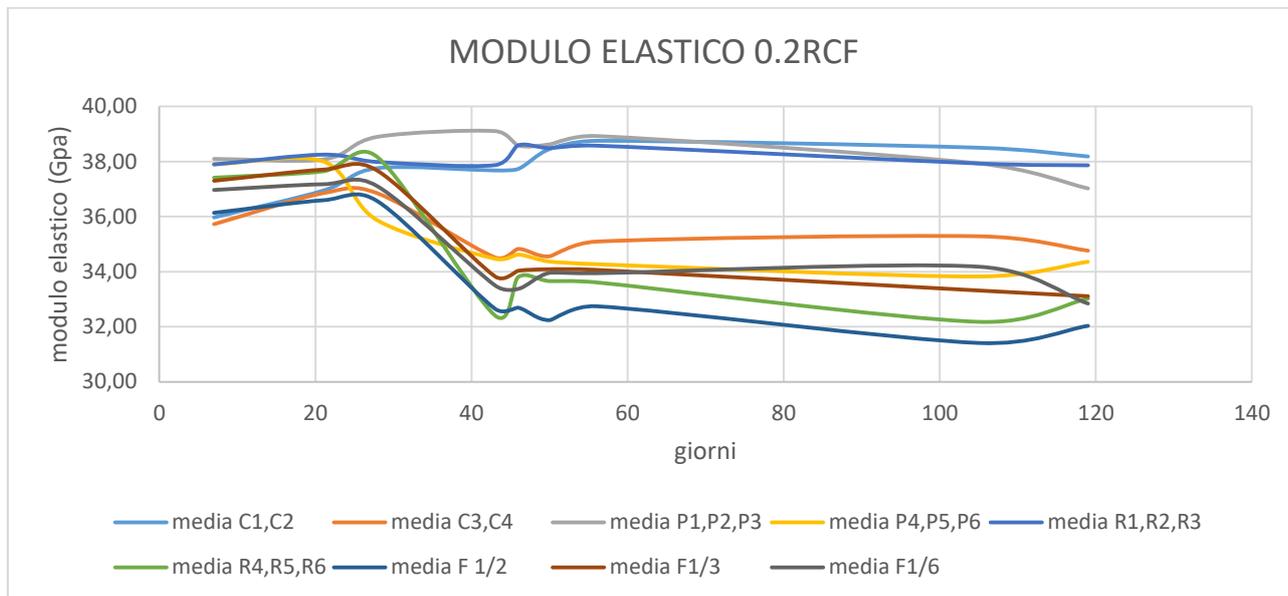


Figura 5.9. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela 0.2RCF

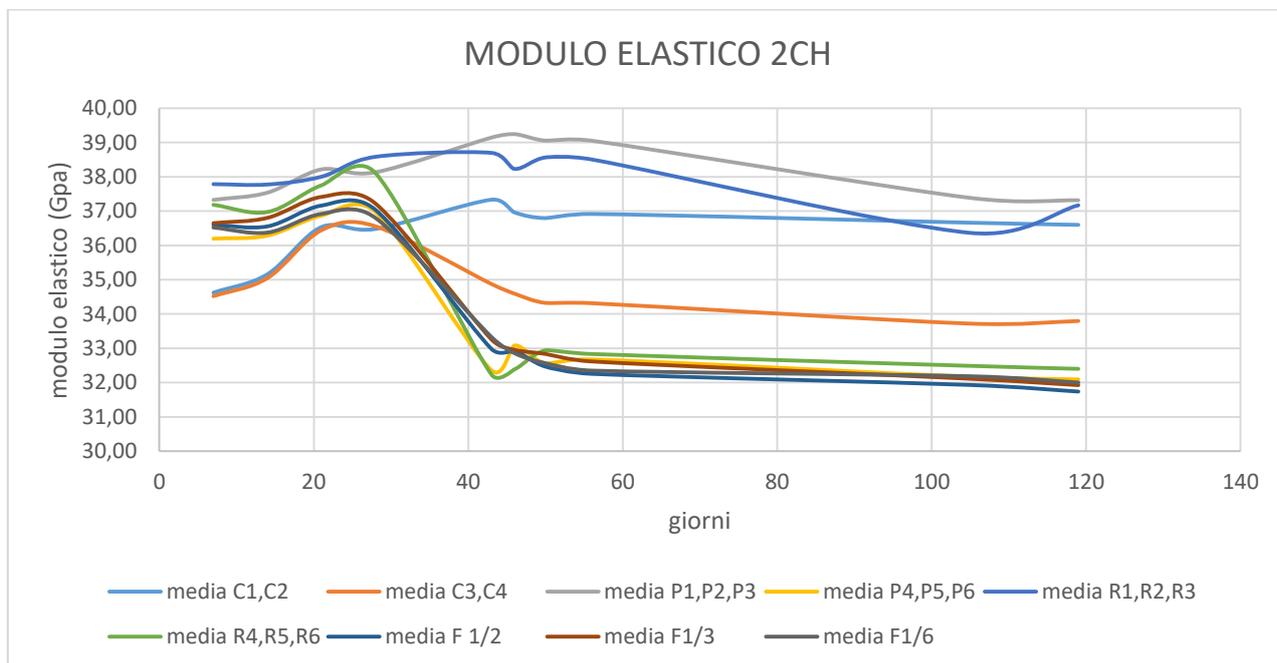


Figura 5.10. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela 2CH

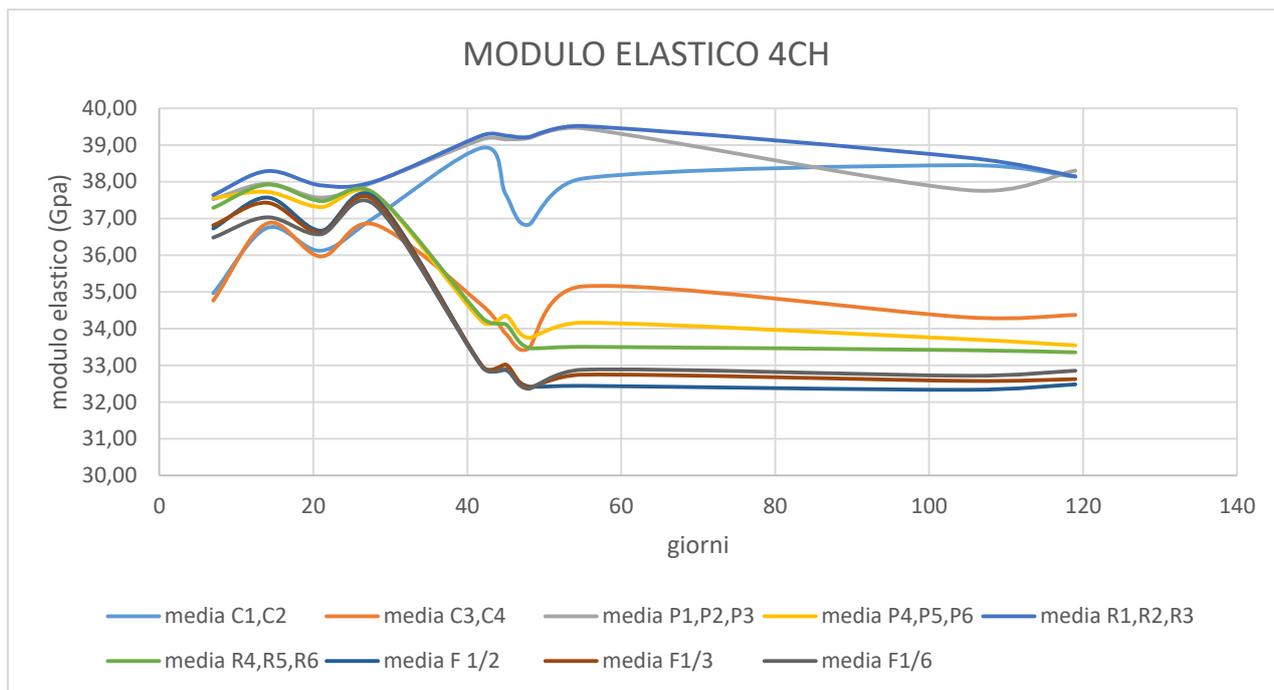


Figura 5.11. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela 4CH

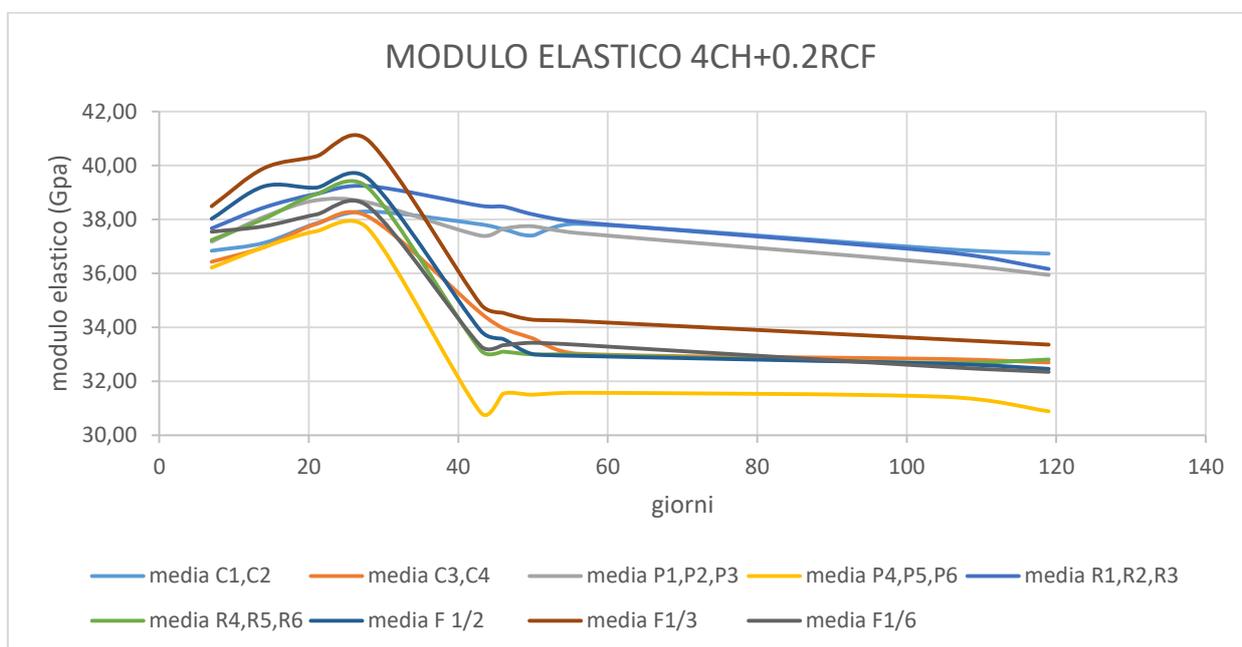


Figura 5.12. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela 4CH+0.2RCF

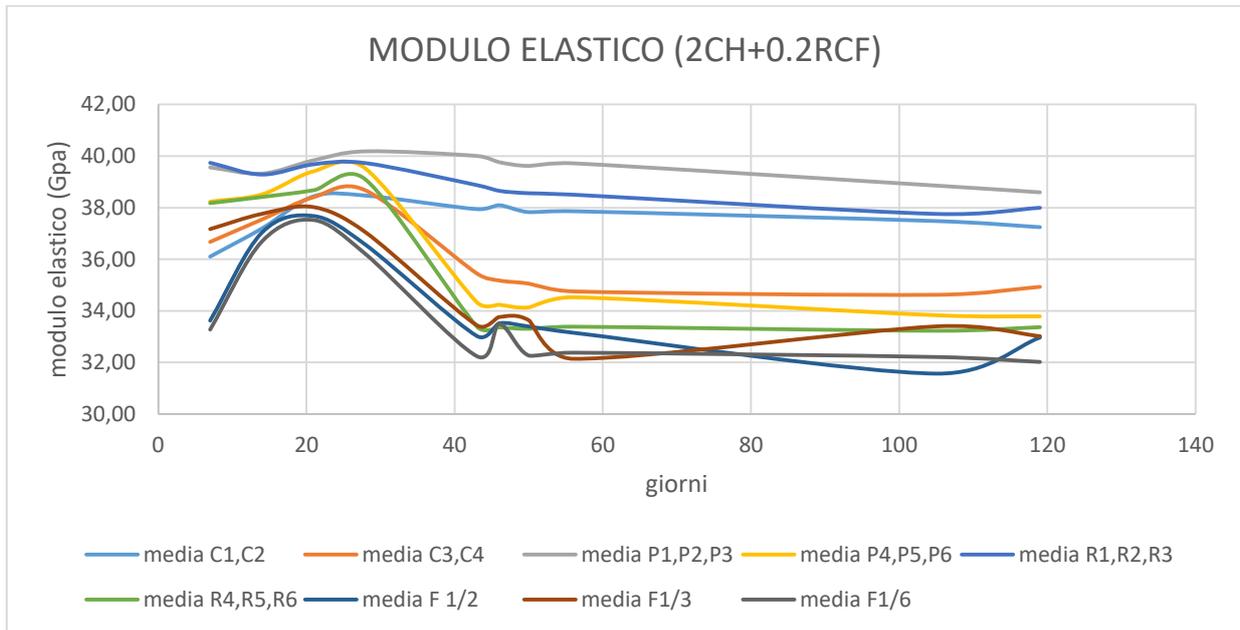


Figura 5.13. Andamento del modulo elastico da 7 a 119 giorni della miscela 2CH+0.2RCF

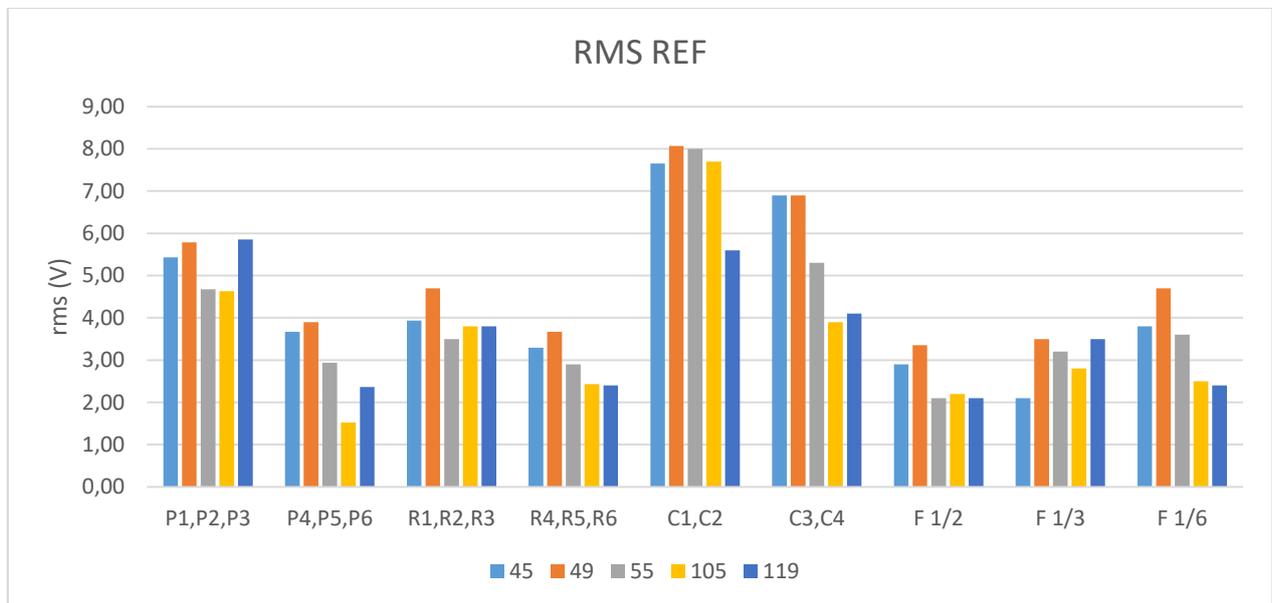


Figura 5.14. Andamento delle ampiezze rms da 45 a 119 giorni della miscela REF

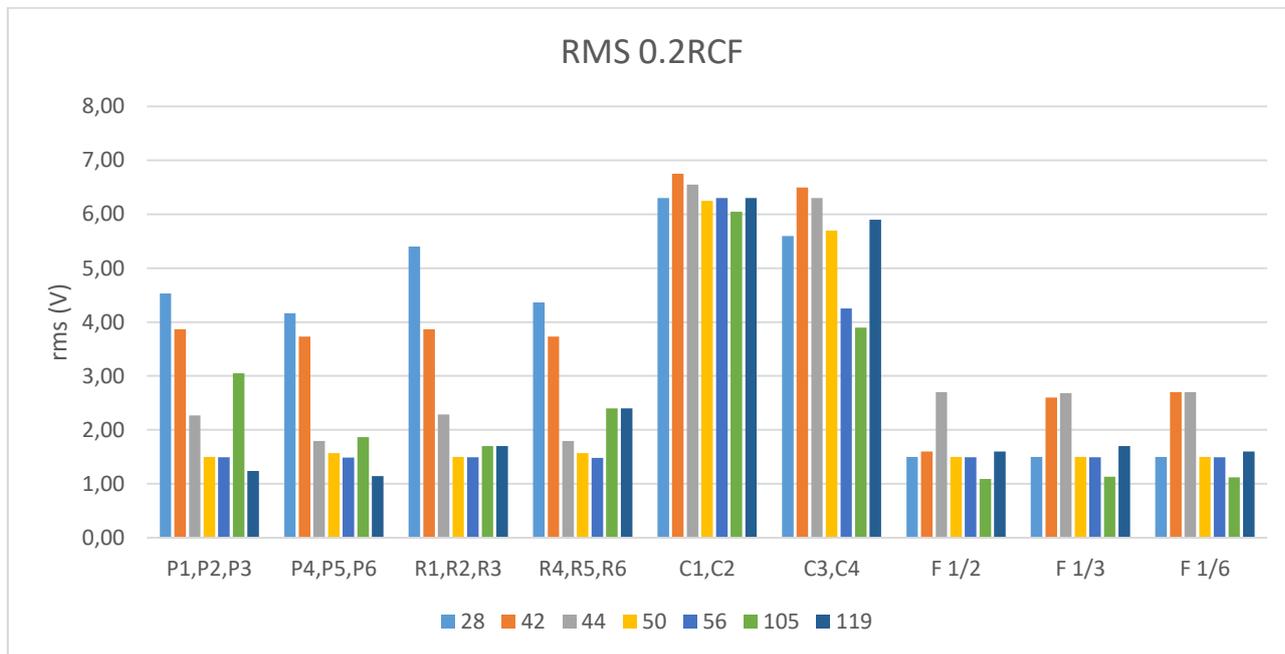


Figura 5.15. Andamento delle ampiezze rms da 28 a 119 giorni della miscela 0.2RCF

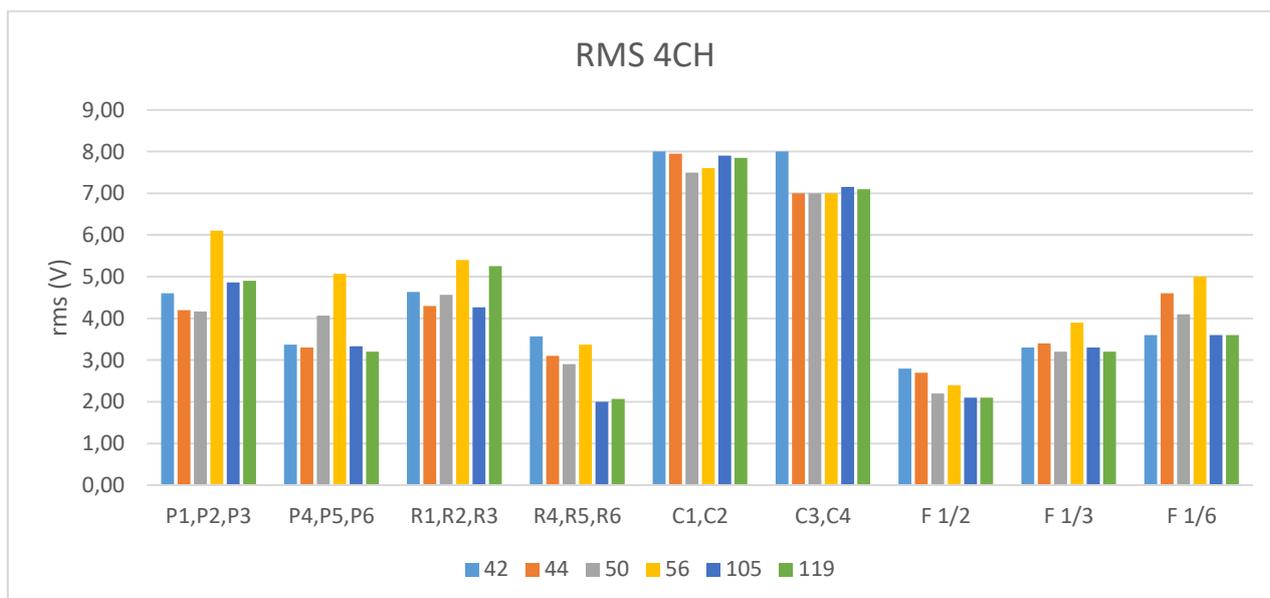


Figura 5.16. Andamento delle ampiezze rms da 42 a 119 giorni della miscela 4CH

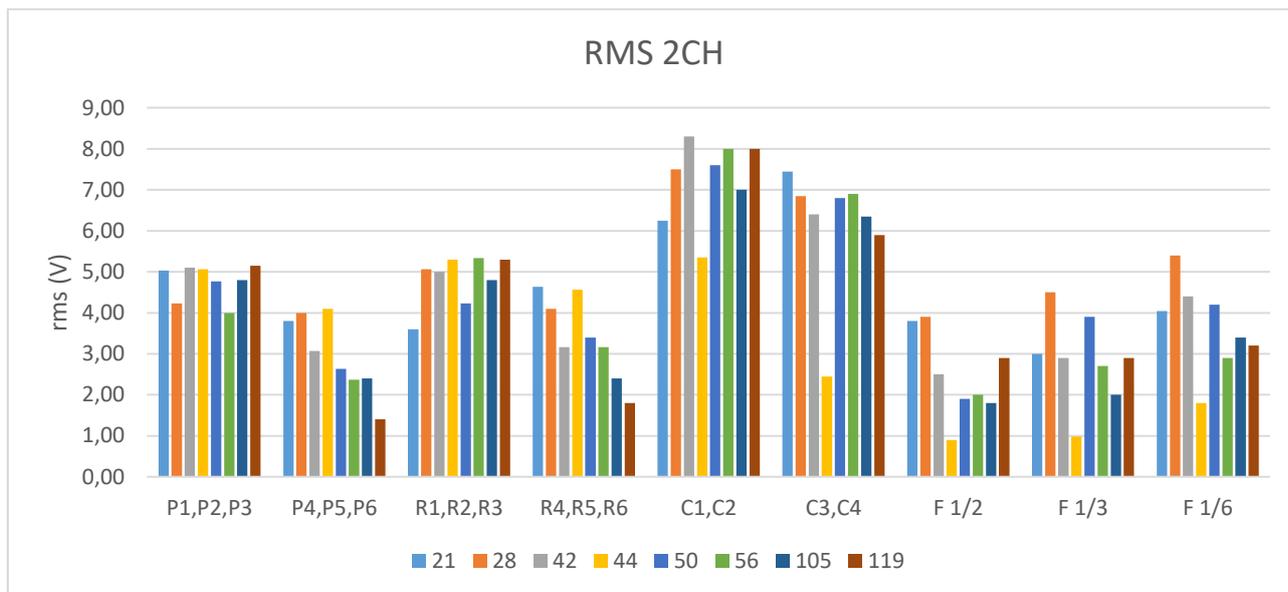


Figura 5.17. Andamento delle ampiezze rms da 21 a 119 giorni della miscela 2CH

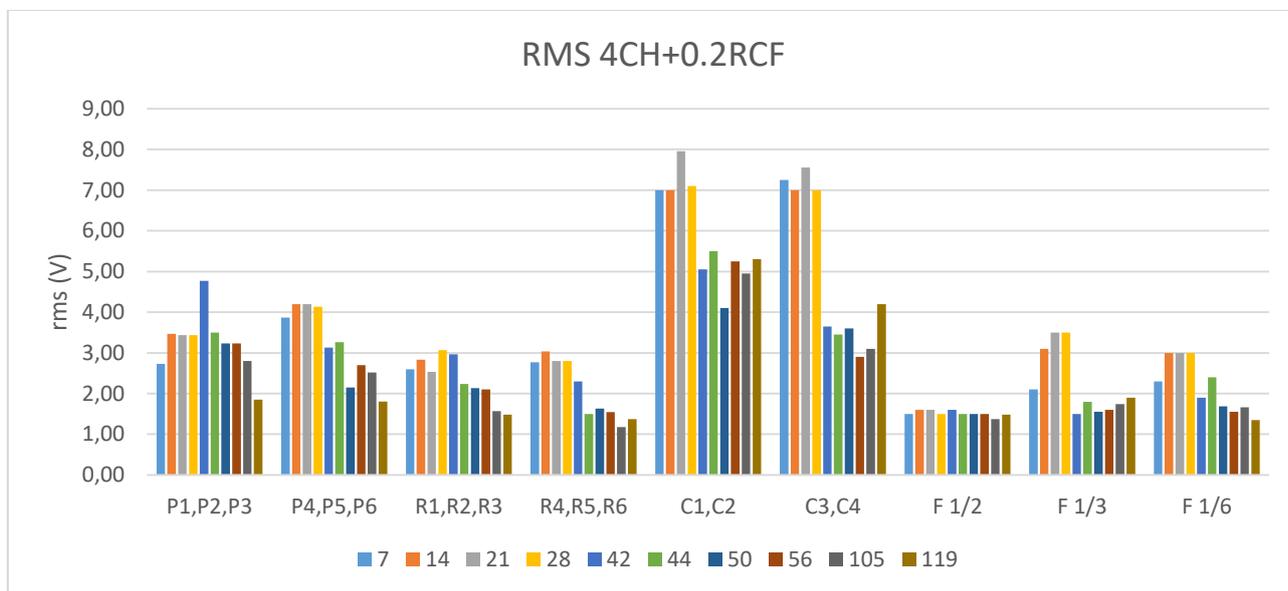


Figura 5.18. Andamento delle ampiezze rms da 7 a 119 giorni della miscela 4CH+0.2RCF

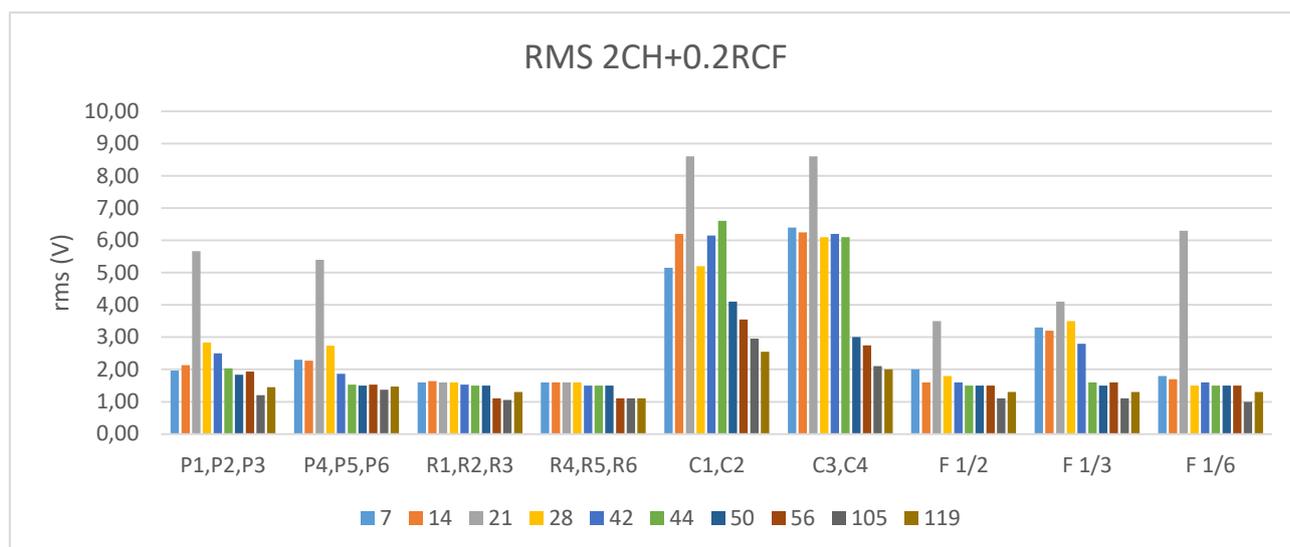


Figura 5.19. Andamento delle ampiezze rms da 7 a 119 giorni della miscela 2CH+0.2RCF

Come è possibile osservare dai grafici, nel periodo iniziale di stagionatura comune a tutti i provini, durato 28 giorni, il valore della velocità ultrasonora (UPV) cresce notevolmente per tutti i provini e, contemporaneamente, in questa prima fase si sviluppa il modulo elastico; anche le ampiezze RMS risultano essere tra le più elevate. Era lecito aspettarsi questo andamento dato che la conservazione in camera climatica a condizioni ambientali costanti, favorisce la stagionatura iniziale e, di conseguenza, la reazione d'idratazione del cemento, garantendo una minore porosità (presenza di vuoti o inclusioni); per questo motivo, il raggio ultrasonoro attraversando il provino in un tempo minore, risulta avere un valore della velocità maggiore (e di conseguenza un modulo elastico maggiore).

Successivamente, dato il differente trattamento subito, sono riscontrabili alcune evidenze:

- I provini conservati in camera climatica mostrano dei valori dell'UPV, del modulo elastico e dell'RMS più alti rispetto ai provini trattati con assorbimento igroscopico; infatti, dal punto di vista grafico, il loro andamento nel tempo risulta essere quasi lineare e i valori sviluppati precedentemente nel periodo di stagionatura si mantengono costanti durante l'intero arco temporale della prova, eccetto un leggero calo a 105 giorni.
- Invece, i provini appartenenti al secondo gruppo, dopo l'essiccazione, prevista dal trattamento igroscopico, terminata il 42esimo giorno, mostrano un drastico calo sia dei valori della velocità che del modulo elastico. Anche le ampiezze RMS sono più basse rispetto ai provini conservati in camera climatica, ma in maniera meno evidente. I tre test successivi ad umidità crescente (8%, 33%, 54%) avvenuti rispettivamente a 45, 49, 55 giorni, non mostrano differenze evidenti; i valori della velocità, del modulo elastico e

dell'RMS sembrano essere quasi uguali. Differentemente accade, invece, per i test eseguiti a 105 e 119 giorni, ad un umidità relativa del 75% e 95%, in queste prove i valori calcolati diminuiscono leggermente; tuttavia si mantengono sempre più bassi rispetto ai provini conservati in camera climatica.

La differenza appena descritta tra le velocità ultrasonora dei provini sottoposti ad assorbimento igroscopico e quelli conservati in camera climatica, è dovuta sostanzialmente al fenomeno dell'essiccazione; infatti i provini, andando incontro ad una cospicua perdita del contenuto d'acqua, risultano essere probabilmente più porosi e, di conseguenza, il fascio ultrasonoro impiega più tempo durante l'attraversamento. La successiva esposizione alle cinque condizioni ambientali con umidità crescente sembra non alterare di molto i valori della velocità ultrasonora che si mantengono pressoché costanti fino al 119esimo giorno.

5.2 CONFRONTO TRA FAMIGLIE DI PROVINI

Analizzando i dati grafici ottenuti, si nota un diverso andamento nel tempo dei provini cubici C rispetto alle altre famiglie studiate. In particolar modo questa tipologia, oltre a mostrare valori di velocità ultrasonora nettamente più elevati, risente meno del trattamento di assorbimento igroscopico, presentando un comportamento simile ai rispettivi provini conservati in camera climatica; in alcuni casi (miscela REF, 0.2 RCF e 2CH) il calo della velocità riferibile all'essiccamento è talmente poco rilevabile da non poter essere apprezzato nei grafici. Un simile comportamento è dovuto alla differente massa dei provini analizzati, infatti, nei provini cubici, caratterizzati da una massa maggiore, il vapore acqueo si diffonde lentamente garantendo una struttura più omogenea e meno porosa.

Si nota anche una certa identità tra le caratteristiche delle due famiglie di provini P ed R (nella miscela 4CH+0.2RCF addirittura i valori quasi coincidono) tanto da poter ipotizzare che la presenza delle reti, utilizzate per altri tipi di prove che esulano dai nostri studi, non influisca più di tanto sulle proprietà salienti prese in considerazione.

5.3 CONFRONTO TRA MISCELE

A parità di trattamento, si evince un'altra importante differenza nelle caratteristiche meccaniche dei provini riguardante la diversa tipologia di composito aggiunto alla miscela di base (REF, di riferimento) in fase di preparazione; nei grafici che seguono sono state confrontate ognuna delle 5 miscele (0.2RCF, 4CH, 2CH, 4CH+0,2RCF, 2CH+0.2RCF) con quella base (REF) senza compositi aggiuntivi.

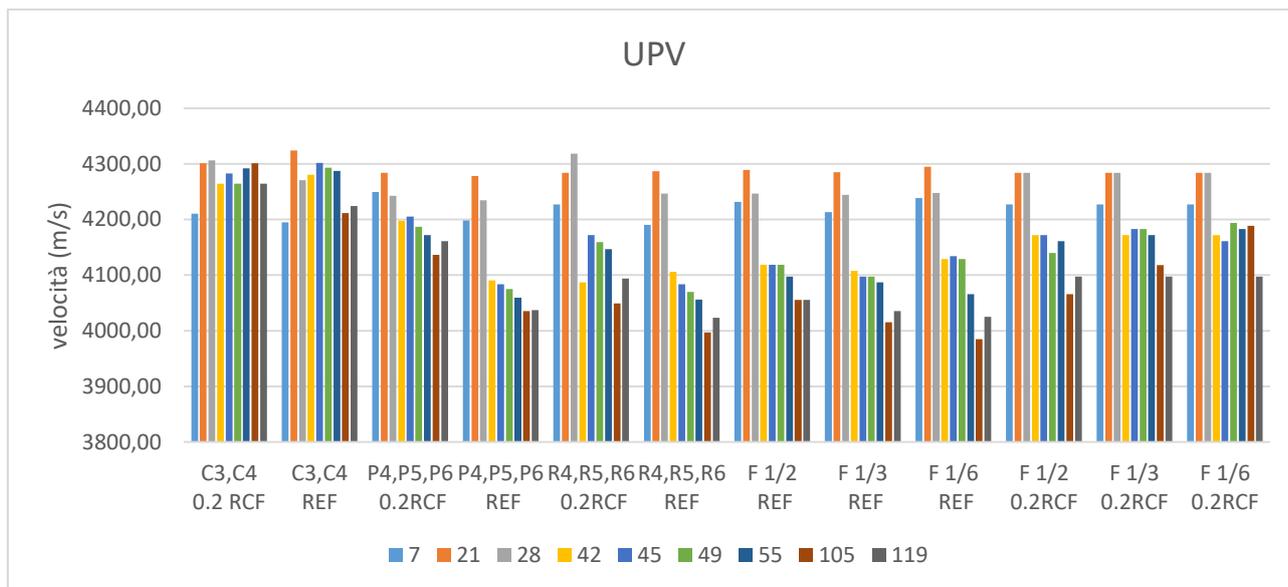


Figura 5.20. Confronto della velocità ultrasonora tra la miscela REF e la miscela 0.2RCF da 7 a 119 giorni.

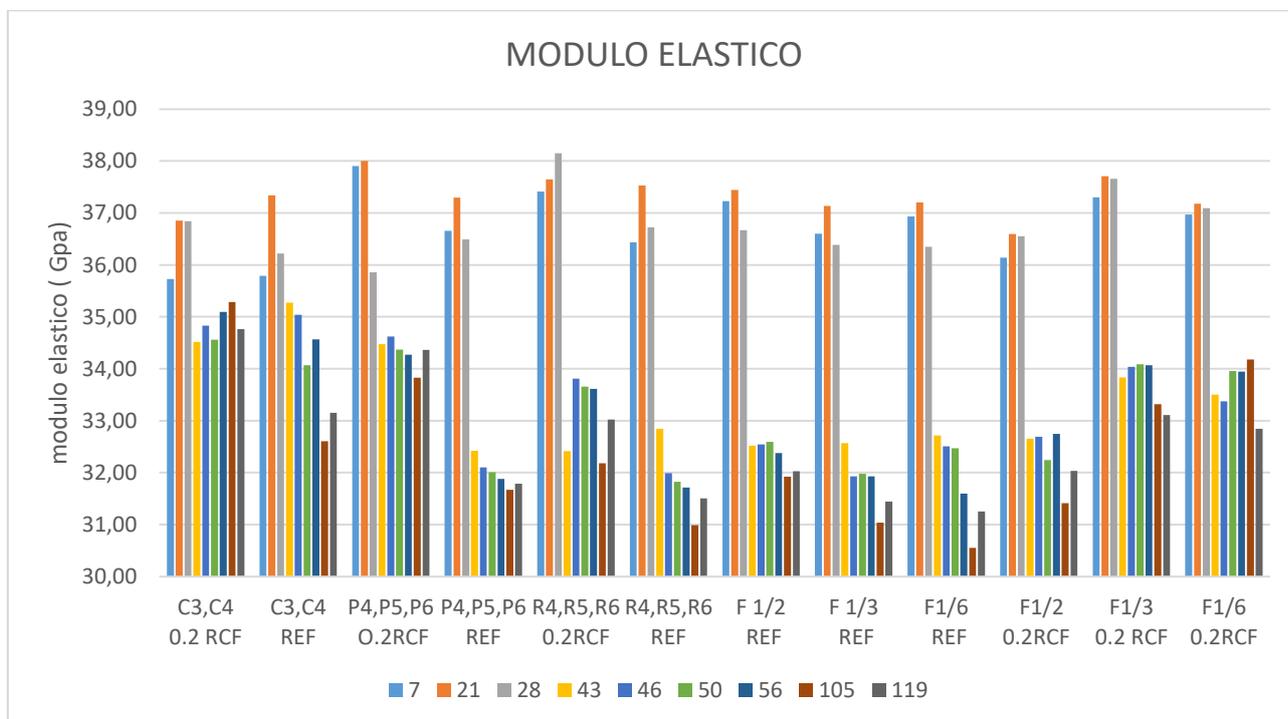


Figura 5.21. Confronto del modulo elastico tra la miscela REF e la miscela 0.2RCF da 7 a 119 giorni.

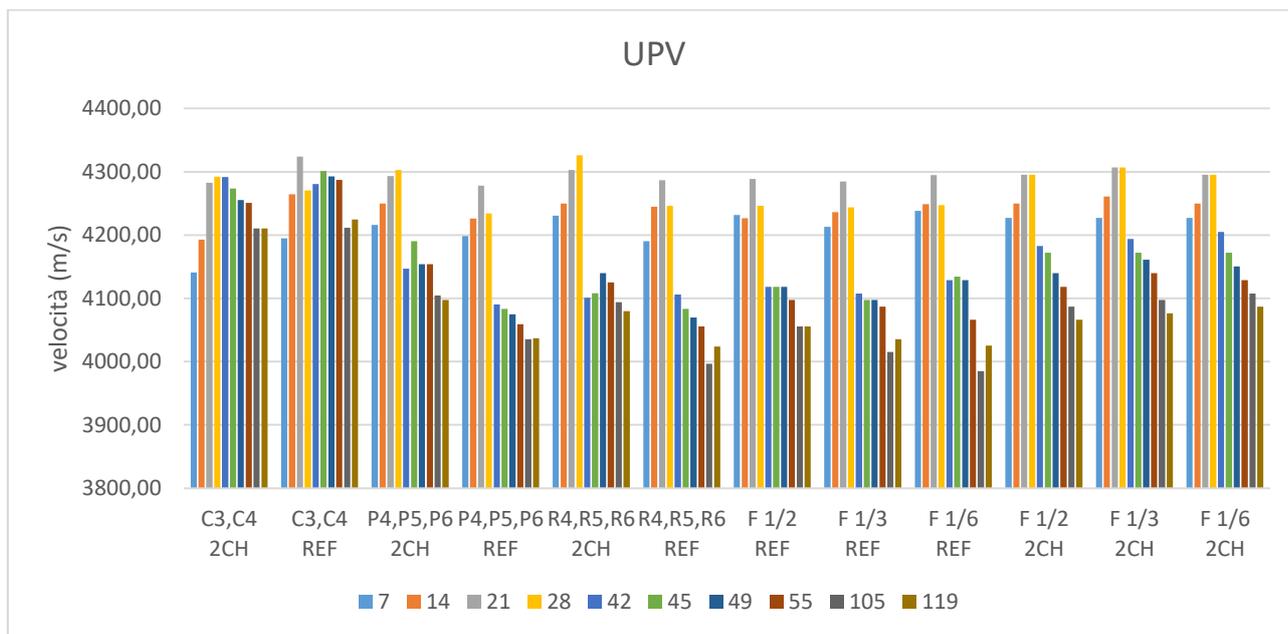


Figura 5.22. Confronto della velocità ultrasonora tra la miscela REF e la miscela 2CH da 7 a 119 giorni.

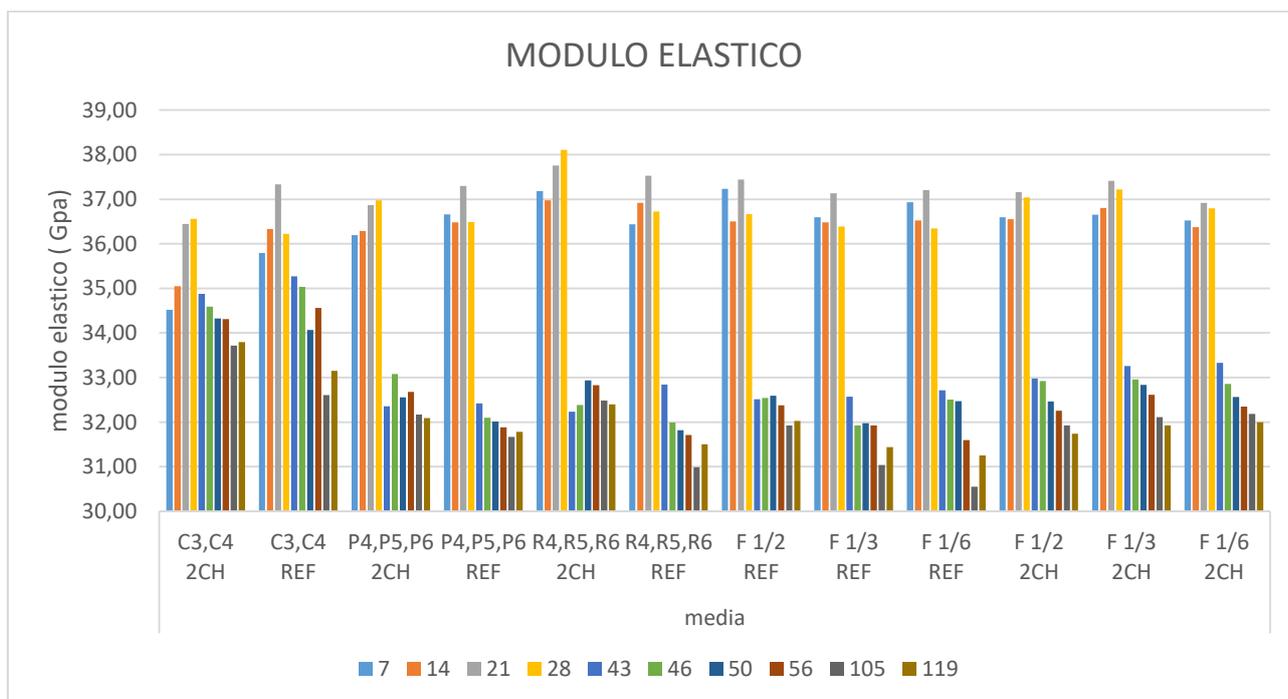


Figura 5.23. Confronto del modulo elastico tra la miscela REF e la miscela 2CH da 7 a 119 giorni.

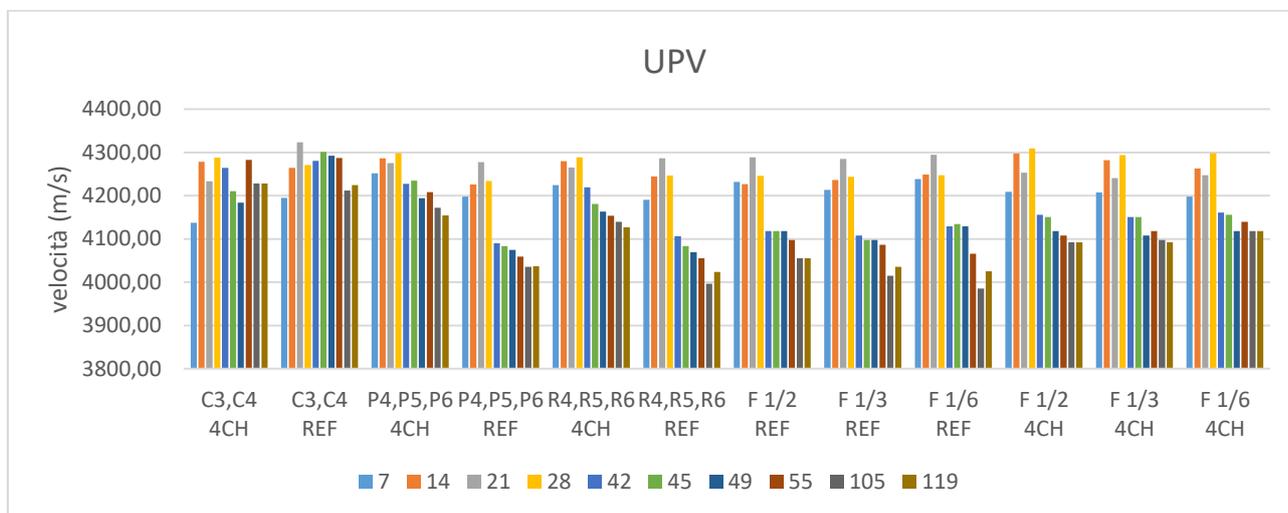


Figura 5.24. Confronto della velocità ultrasonora tra la miscela REF e la miscela 4CH da 7 a 119 giorni.

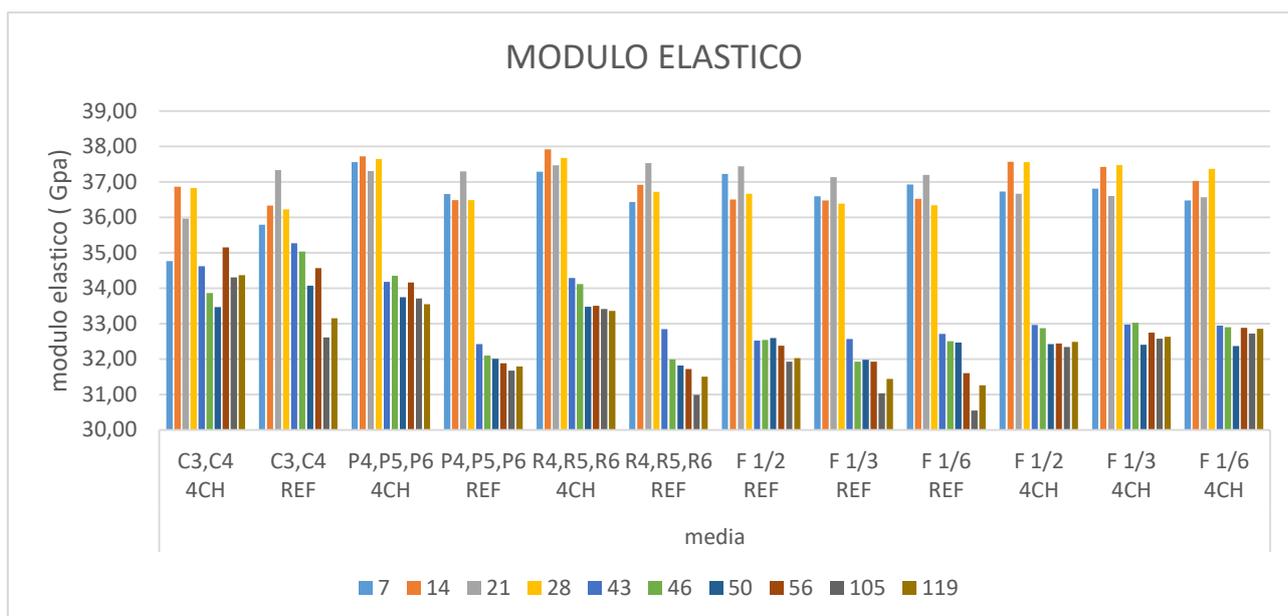


Figura 5.25. Confronto del modulo elastico tra la miscela REF e la miscela 4CH da 7 a 119 giorni.

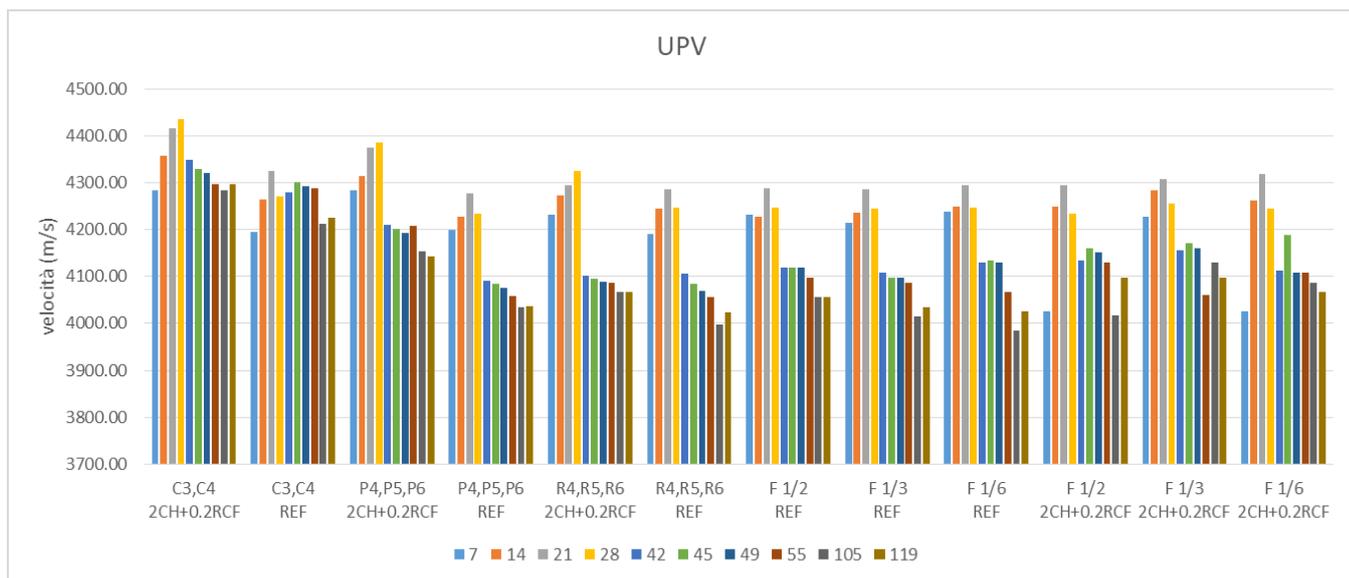


Figura 5.26. Confronto della velocità ultrasonora tra la miscela REF e la miscela 2CH+0.2RCF da 7 a 119 giorni.

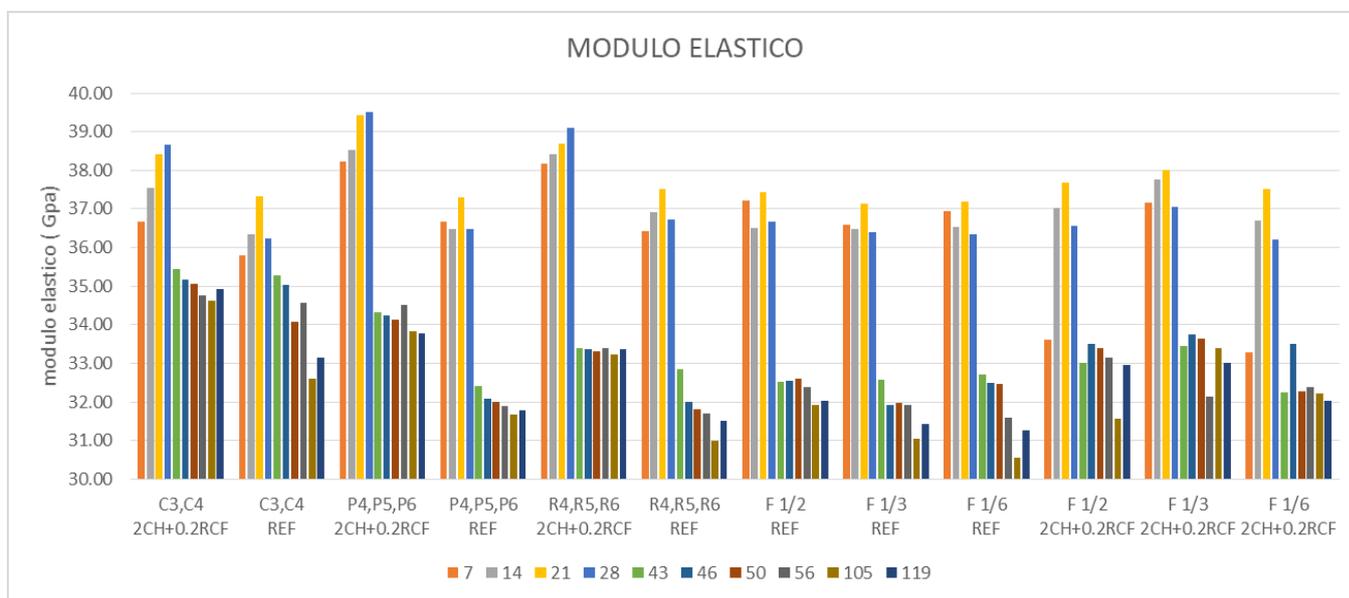


Figura 5.27. Confronto del modulo elastico tra la miscela REF e la miscela 2CH+0.2RCF da 7 a 119 giorni.

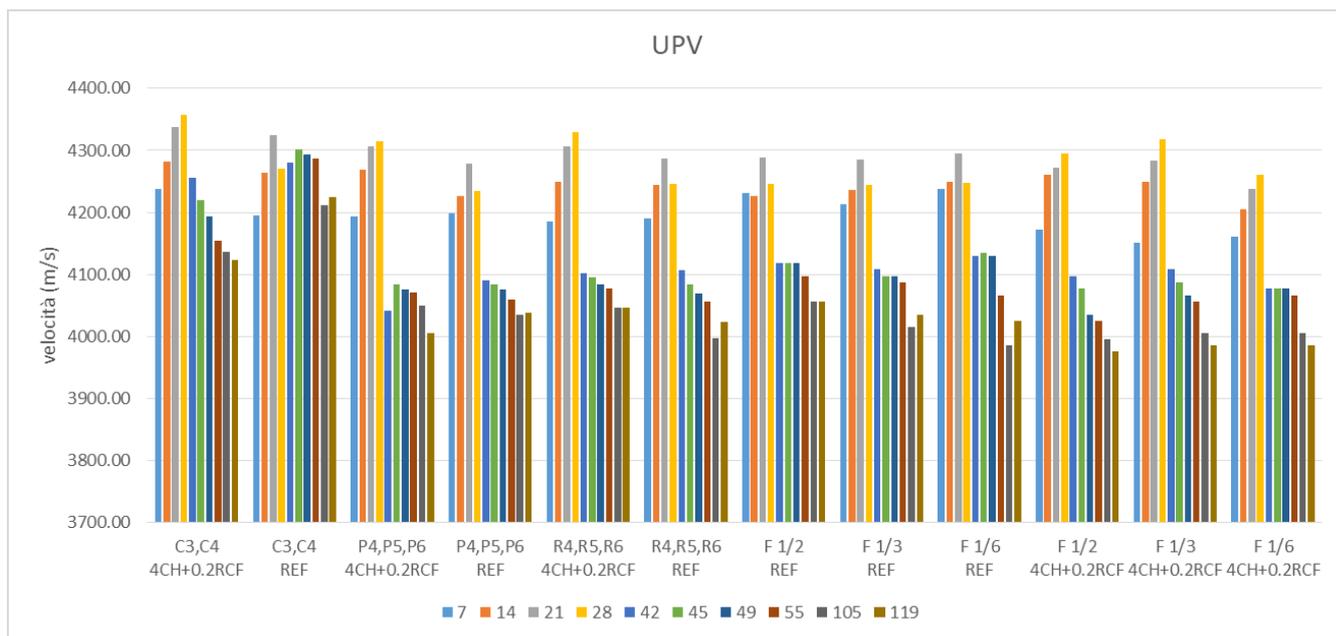


Figura 5.28. Confronto della velocità ultrasonora tra la miscela REF e la miscela 4CH+0.2RCF da 7 a 119 giorni.

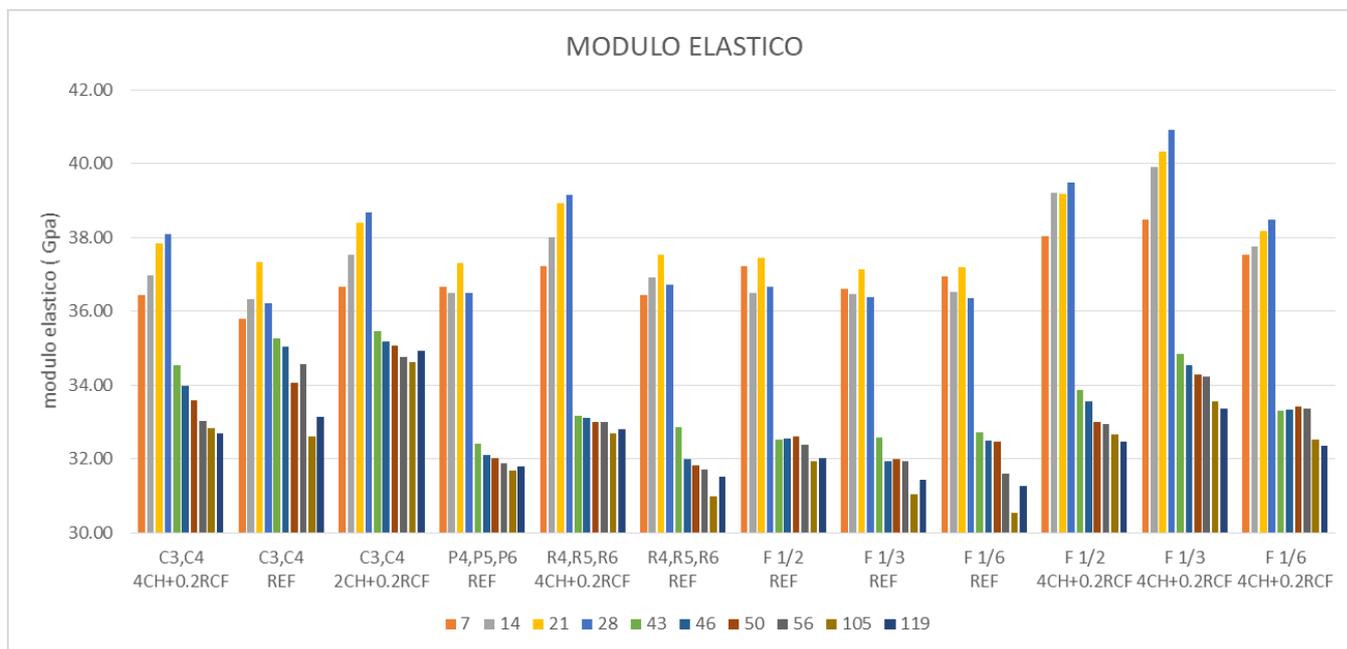


Figura 5.29. Confronto del modulo elastico tra la miscela REF e la miscela 4CH+0.2RCF da 7 a 119 giorni.

Dai grafici è possibile notare come tutte le miscele contenenti compositi presentino sia una velocità ultrasonora che un modulo elastico maggiore rispetto alla miscela di riferimento REF.

In particolar modo le miscele 2CH+0.2RCF e 4CH+0.2RCF mostrano i valori maggiori per entrambe le caratteristiche. Inoltre, per i provini dotati di frattura (F), questa differenza tra le miscele risulta essere più evidente dopo il periodo di stagionatura (28 giorni).

5.4 ANALISI DEI PROVINI FRATTURATI

Per verificare l'efficacia degli ultrasuoni come strumento investigativo per la ricerca di difetti nel calcestruzzo si è deciso di confrontare le ampiezze rms delle due famiglie di provini P ed F (aventi stesse dimensioni e stessa forma) nel periodo iniziale di stagionatura (28 giorni) in quanto dopo l'essiccazione tutti i provini presentano valori rms molto bassi dovuti alla tipologia di trattamento subito.

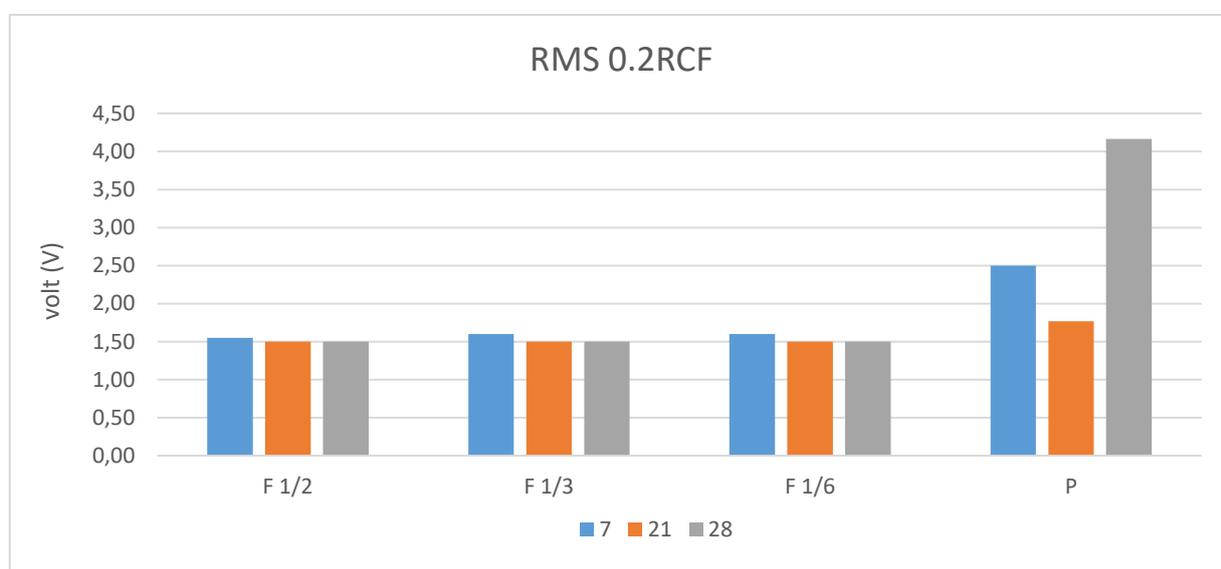


Figura 5.30. Confronto delle ampiezze rms tra i provini P e i provini fratturati F della miscela 0.2 RCF da 7 a 28 giorni

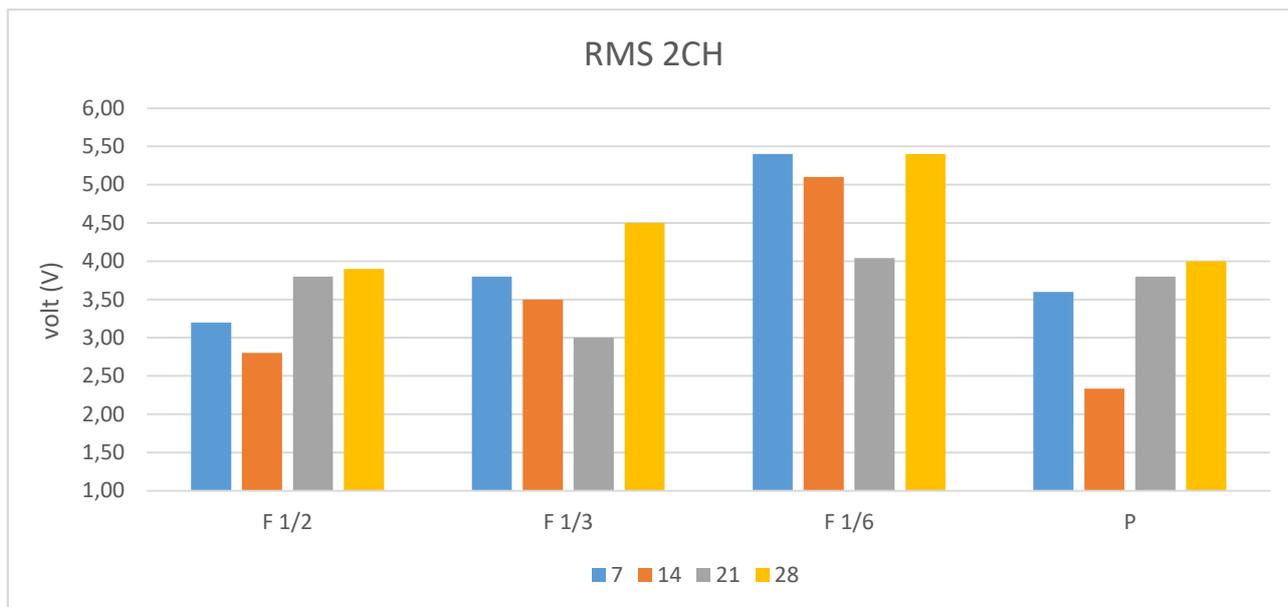


Figura 5.31. Confronto delle ampiezze rms tra i provini P e i provini fratturati F della miscela 2CH da 7 a 28 giorni

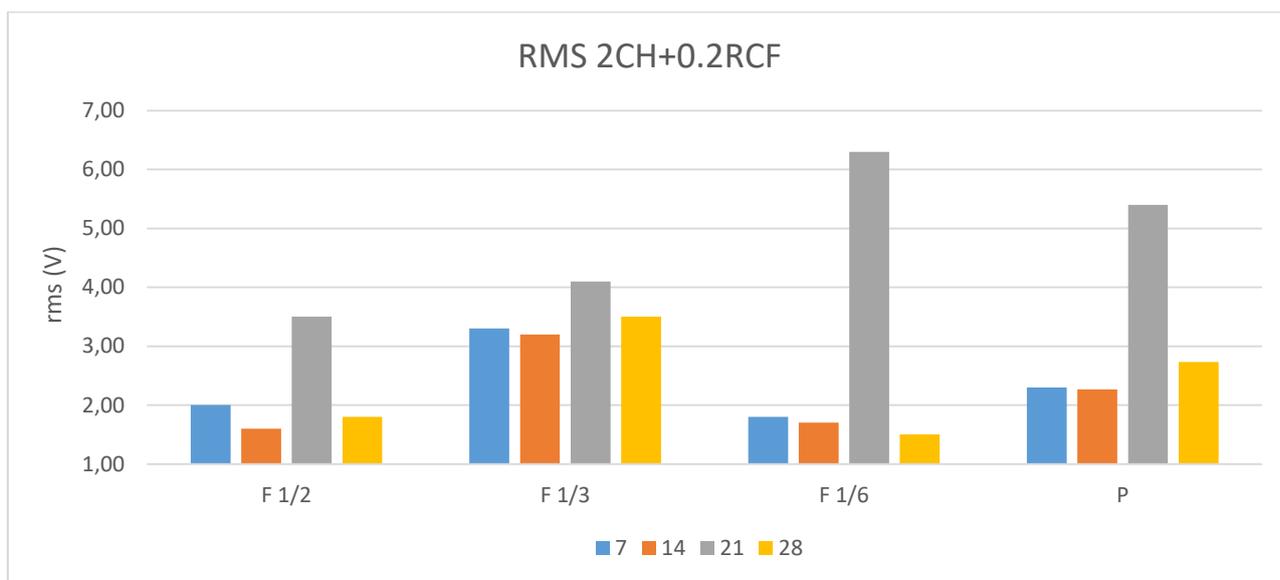


Figura 5.32. Confronto delle ampiezze rms tra i provini P e i provini fratturati F della miscela 2CH+0.2RCF da 7 a 28 giorni

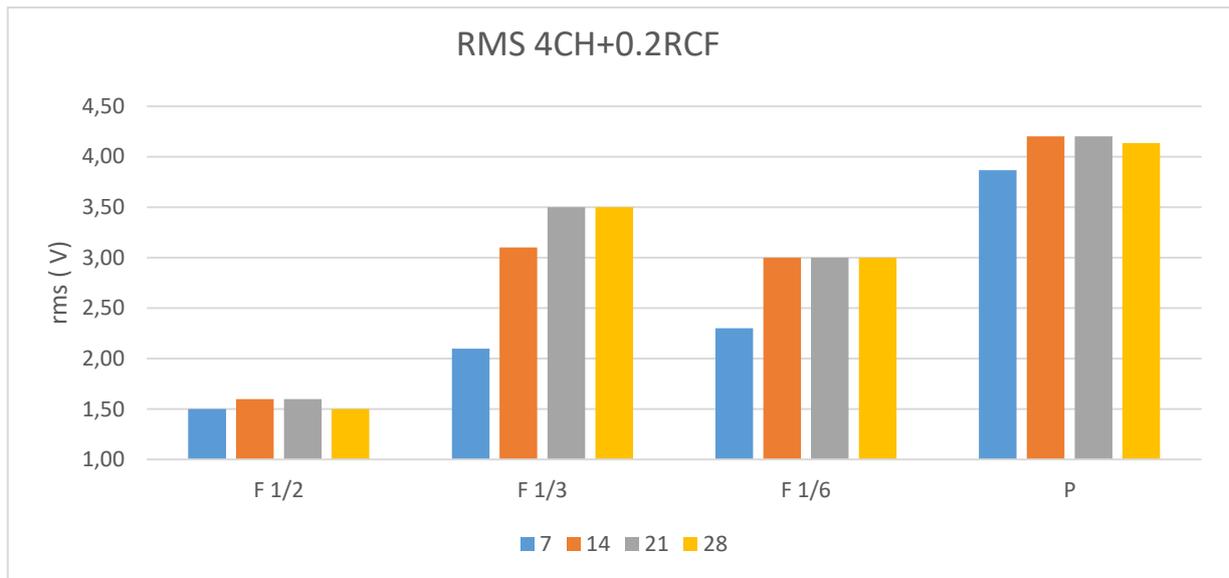


Figura 5.33. Confronto delle ampiezze rms tra i provini P e i provini fratturati F della miscela 4CH+0.2RCF da 7 a 28 giorni

Dai grafici si evince come i provini non fratturati P presentino valori rms molto più bassi rispetto a quelli provvisti di frattura F; inoltre all'interno della stessa famiglia F, il provino denominato F1/2 presenta i valori più bassi, da ciò si deduce che nei provini fratturati la propagazione del fascio ultrasonoro viene interrotta dalla presenza del difetto.

CONCLUSIONI

Alla fine di questo interessante lavoro, l'elaborazione e l'analisi dei dati ottenuti, insieme alle evidenze sperimentali, ci permettono di trarre le conclusioni che di seguito si riportano:

- A prescindere dal tipo di miscela, i provini sottoposti ad assorbimento igroscopico, con variazione dell'umidità, presentano sia una velocità ultrasonora che un modulo elastico nettamente inferiori rispetto a quelli conservati in camera climatica ad umidità costante
- Tutte le miscele contenenti composti aggiuntivi presentano sia la velocità ultrasonora che il modulo elastico maggiori rispetto alla miscela di riferimento
- La famiglia dei provini cubici (C), oltre a presentare valori più elevati del modulo elastico e della velocità ultrasonora, è quella che risente meno dell'assorbimento igroscopico
- I provini fratturati risultano avere, mediamente, un'ampiezza rms minore rispetto ai provini privi di frattura

Il lavoro effettuato evidenzia anche l'efficacia del test non distruttivo condotto mediante ultrasuoni nel rilevare non solo una diversa qualità del cemento ma anche possibili difetti superficiali; infatti elaborando e analizzando i dati nel modo corretto, mediante la tecnica ultrasonora si riesce a localizzare un eventuale danno sulla struttura in modo da poter agire preventivamente rispetto ai classici test distruttivi, semplificandone la diagnostica. Tuttavia, ricordiamo che il calcolo del modulo elastico dinamico avviene in maniera empirica, basandosi non solo sulla velocità ultrasonora, ma anche sul calcolo di altre variabili, tra cui la massa, a differenza dei test distruttivi che forniscono direttamente i valori a fine prova. A tal proposito, un interessante sviluppo del lavoro eseguito potrebbe essere quello di confrontare i valori del modulo elastico dinamico, ottenuti con il metodo ultrasonoro, con i valori del modulo elastico ottenuti con delle prove di trazione/compressione in modo da poterne confrontare e quantificare un'eventuale differenza per stabilire, ancora una volta, un confronto diretto tra le due tecniche.

BIBLIOGRAFIA

1. www.endurcrete.eu
2. Shah A.A., Ribakov Y. - Non-destructive measurement of crack assessment and defect detection in concrete structures - *Materials & Design* 29(2008) 61-69. Ed. Elsevier
3. Saint-Pierre F., Philibert A., Giroux B., Rivard P., - Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity - *Construction and Building Materials* 125(2016)1022-1027. Ed. Elsevier
4. Mohammed T.U., Rahman MD N., - Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete – *Construction and Building Materials* 125(2016) 832-841. Ed. Elsevier
5. Bistosini A., - Influenza del tempo di stagionatura e dell'umidità relative sulle proprietà elettriche e meccaniche di malte con capacità self-sensing contenenti diversi dosaggi di filler- Tesi di Laurea Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche – A.A. 2018-2019
6. <https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attention.htm>
7. https://www.staticaesismica.it/normative/1996_12_01_LG-calcestruzzo%20strutturale.pdf