



Politecnico di Torino
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI PROVINI NATURALI E DEGRADATI DI MARMO

Relatori

Prof. Ing. DANIELE COSTANZO

Prof. Ing. MARIA MIGLIAZZA

Tesi di Laurea di
ANDREA LORA

Anno Accademico 2019/2020

RINGRAZIAMENTI

In primis vorrei ringraziare i docenti Ing. Maria Migliazza e Ing. Daniele Costanzo, relatori di questa tesi, per la loro disponibilità e competenza con cui hanno saputo guidarmi in questo cammino di approfondimento, che ha certamente portato ad arricchire il mio bagaglio esperienziale.

Similmente vorrei ringraziare il Dott. Federico Vagnon e la Dott. Chiara Caselle per il tempo e impegno dedicati affinché questo lavoro di tesi potesse vedere la luce.

Alla fine di questa fase del mio percorso formativo, così lungo e tormentato, debbo esprimere la mia più sincera gratitudine ai miei genitori, che hanno permesso materialmente che tutto ciò potesse avvenire, nonché per avermi spronato ad ottenere i miei obiettivi.

Un grazie va a tutta la mia famiglia, in modo particolare mia nonna che, da quando è mancata mamma, ha sempre cercato di non farmene sentire la mancanza.

Ringrazio inoltre Chiara, che ha ben capito cosa vuol dire stare con uno studente del Poli, e la sua famiglia per l'aiuto e i consigli fornitimi.

Ringrazio gli amici di vita, di collegio, di corso con cui ho condiviso gioie e dolori di questi anni di gioventù che non dimenticherò mai, anche a causa dei recenti Dpcm.

Questa tesi vorrei dedicarla a mia madre, che ha sempre creduto in me, e che purtroppo non ha potuto vedere compiutamente realizzato questo percorso.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	2
INDICE DELLE FIGURE	5
INDICE DELLE TABELLE	8
INTRODUZIONE	9
1. OBIETTIVI DELLA RICERCA	10
1.1 Introduzione.....	10
1.2 Scopo	13
2 INQUADRAMENTO GENERALE	14
2.1 Inquadramento Geografico	14
2.2 Cava Gioia.....	15
2.3 Storiografia dell'estrazione.....	17
2.4 Descrizione del materiale	18
3 METODI E PARAMETRI INVESTIGATI	22
3.1 Richiami di Teoria dell'Elasticità	22
3.2 Richiami di Meccanica della Frattura	23
3.3 Richiami di Teoria delle Onde	24
3.1 DIC (Digital Image Correlation)	25
3.2 Misurazione delle onde di Volume V_p e V_s	28
3.3 Prova di Flessione	31
3.4 Metodologia di esecuzione della tecnica DIC	38
3.5 Computazione con Ncorr®.....	39
3.6 Sensitivity Analysis	41
4 PROCESSI DI INVECCHIAMENTO DEL MATERIALE	42
4.1 Invecchiamento Termico.....	42
4.2 Invecchiamento Termochimico.....	43

5	CAMPAGNA SPERIMENTALE	47
5.1	Stato Naturale	48
5.2	Alterazione Termica	54
5.3	Alterazione Termica e chimica	57
5.4	Risultati DIC	60
6	CONFRONTO DEI RISULTATI	63
6.1	Variabilità del Naturale	63
6.2	Stato Naturale – Alterazione Termica	63
6.3	Stato Naturale – Alterazione Chimica e Termica	65
6.4	Deformazione Strain Gauge – DIC	71
7	CONCLUSIONI	73
	BIBLIOGRAFIA	75
	SCHEDE TECNICHE	77

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Amoco Building di Chicago, particolare dell'inflessione	11
Figura 2 Alcuni esempi di bowing in edifici europei	12
Figura 3 Localizzazione geografica del Comune di Carrara:	14
Figura 4 Inquadramento Geografico e Geologico (fonte http://pcn.ambiente.it , 2019)	15
Figura 5 Fronti estrattivi di Cava Gioia (fonte http://marmobiancogioia.it)	16
Figura 6 Immagine e caratterizzazione fornita da marmicarrara.it (Marmi Carrara SRL, 2019).	18
Figura 7 Catalogazione dei campioni.(2019).....	19
Figura 8 Valutazione della densità.....	20
Figura 9 Schematizzazione del sistema di riferimento delle barrette.	20
Figura 10 Passaggi di base dell'algoritmo DIC implementato in Ncorr®.....	26
Figura 11 Direzione di lettura sorgente/ricevente.....	29
Figura 12 Strumentazione utilizzata per la misura della resistività elettrica (PunditLab®).....	30
Figura 13 Esempio di traccia ampiezza-tempo:.....	30
Figura 14 Alloggiamento provino su macchina servocontrollata per prove di flessione con schema statico a 4 punti (A) e 3 punti (B) eseguite presso il laboratorio del Politecnico di Torino. (2019)..	33
Figura 15 Figura 15 Accoppiamento provini- estensimetri:	33
Figura 16 Campione preparato per la prova di flessione a 4 punti, attrezzato con estensimetro ad estradosso, e trasduttore LDVT alloggiato sul macchinario (figura A).....	34
Figura 17 Diagramma tensioni - deformazioni.....	35
Figura 18 Calcolo del modulo di Young secante partendo dalla curva tensione – deformazione.....	35
Figura 19 Schema di carico della prova a flessione su 4 punti; (2) Schema castelletto per prova a flessione su 3 punti.....	36
Figura 20 Stato di stress (ipotizzato) del provino in corrispondenza della mezzeria, prima del raggiungimento della rottura.....	36
Figura 21 Diagrammi di taglio e momento sollecitante in ipotesi di elasticità lineare.....	37
Figura 22 Modalità di acquisizione della prova con fotogrammetria (2019)	39
Figura 23 Maschera Ncorr ®	39
Figura 24 Grafici ottenuti dall'analisi con DIC.....	40
Figura 25 Calibrazione dei parametri: 1: Subset Radius, 2: Subset Spacing , 3: Strain Radius. (Ncorr®)	41
Figura 26 Alloggiamento provini nel forno per riscaldamento a 50/90°C	42
Figura 27 Grafico temperatura-tempo:	43
Figura 28 Prospetto dall'alto della scatola a tenuta stagna e relative sezioni orizzontali.	45

Figura 29 Preparazione al trattamento chimico sul marmo in bagno termostatico a 50°C. (2019):..	45
Figura 30 Immagine di una faccia del provino B6 successivamente il trattamento chimico.	46
Figura 31 Incurvatura della superficie inferiore del contenitore, dovuta alle sovrappressioni generate dal prodotto della reazione.....	46
Figura 32 Diagramma di flusso.....	47
Figura 33 Variabilità V_P nei campioni insalterati.....	49
Figura 34 Variabilità V_S nei campioni insalterati.....	49
Figura 35 Valori medi di E_{din} ricavati analiticamente.....	50
Figura 36 Grafico Momento- Deformazione dei provini inalterati.....	52
Figura 37 Grafico Inflessione-Tensioni (analizzati 7 provini: B26,B33,B43 attrezzati con estensimetri).....	53
Figura 38 Grafico Momento-Deformazione dei campioni alterati termicamente alle temperature di riferimento: sono diagrammati esclusivamente i provini attrezzati con strain gauge.....	55
Figura 39 Grafico Momento-Freccia ottenuto dalle barrette trattate termicamente.....	56
Figura 40 Grafico Momento-Deformazione ottenuto per le barrette trattate termicamente e chimicamente.....	58
Figura 41 Grafico Momento-Freccia risultato dalle barrette trattate termicamente e chimicamente.....	59
Figura 42 Curve derivanti dall'analisi di sensibilità, set di parametri personalizzati.....	60
Figura 43 Analisi DIC campione B45, set di parametri: subset radius 5, subset spacing 10, strain radius 50.....	61
Figura 44 Analisi DIC su campioni trattati termochimicamente, ottenuta con parametri di default suggeriti dal software.....	61
Figura 45 Risultato dell'analisi di sensitività del campione B11 confrontato con la registrazione dell'estensimetro.....	62
Figura 46 Risultato dell'analisi di sensitività del campione B13 confrontato con la registrazione dell'estensimetro.....	62
Figura 47 Grafico Momento-Deformazione, confronto barrette inalterate con trattate termicamente.....	64
Figura 48 Grafico Momento-Deformazione, confronto barrette inalterate con trattate termicamente e chimicamente.....	66
Figura 49 Confronto E_S a bassa deformazione (test di flessione) e E_{din} ottenuto con onde ultrasoniche (PunditLab).....	68
Figura 50 Diminuzione del modulo tangente E_{S50} in relazione al riscaldamento imposto ai provini di marmo.....	69

Figura 51 Diminuzione del modulo tangente E_{S50} in relazione al condizionamento termico e chimico imposto.....	69
Figura 52 Diminuzione della velocità di V_p in funzione del condizionamento imposto in laboratorio.	70
Figura 53 Trend di V_S in funzione del condizionamento imposto in laboratorio.....	70
Figura 54 Curve ricavate dai test di flessione. In verde: campioni incondizionati; In rosso (tratto continuo): campioni trattati termicamente a 50°C; In viola (tratto continuo): campioni trattati termicamente a 90°C; In rosso (puntinatura): campioni trattati termicamente e chimicamente (50°C); In viola (puntinatura): campioni trattati termicamente e chimicamente (90°C).....	71
Figura 55 Analisi DIC su campioni trattati termochimicamente, ottenuta con parametri di default suggeriti dal software.....	72

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Gruppi della sperimentazione	13
Tabella 2 Suddivisione dei campioni nei rispettivi trattamenti.	19
Tabella 3 Valori numerici dei campioni analizzati presso il Laboratorio di Scienza della Terra.....	21
Tabella 4 Risultato dell'acquisizione del sistema di controllo.....	38
Tabella 5 Ricerca bibliografica su concentrazioni e metodologie di aggressione del marmo.....	44
Tabella 6 Parametri ricavati nell'analisi ultrasonica.	51
Tabella 7 Caratterizzazione meccanica dei campioni inalterati.....	53
Tabella 8 Valori medi ottenuti post trattamento termico alle differenti temperature.	54
Tabella 9 Valori medi ottenuti pre trattamento termico.....	54
Tabella 10 Valori ottenuti nei test di flessione dai campioni trattamenti termicamente.	56
Tabella 11 Valori medi ottenuti post trattamento termico e chimico.	57
Tabella 12 Valori medi ottenuti pre trattamento termico e chimico.....	57
Tabella 13 Valori ottenuti nei test di flessione dai campioni trattamenti termicamente e chimicamente.	59
Tabella 14 Caratteristiche fisiche medie dei campioni incondizionati.	63
Tabella 15 Differenza delle proprietà fisiche registrate post trattamento termico.....	63
Tabella 16 Differenza media delle proprietà meccaniche ottenute tramite test di flessione, post trattamento termico.	65
Tabella 17 Differenza delle proprietà fisiche registrate post trattamento termico e chimico.....	65
Tabella 18 Differenza media delle proprietà meccaniche ottenute tramite test di flessione, post trattamento termochimico.	65
Tabella 19 Calcolo del momento sollecitante a rottura, in ipotesi elastica lineare.....	67
Tabella 20 Valori medi delle proprietà meccaniche riscontrati con test di flessione.	67
Tabella 21 Valori medi delle proprietà fisiche ottenuti dai test ad ultrasuoni.	67

INTRODUZIONE

Le proprietà fisiche e meccaniche delle pietre da costruzione possono variare a causa dei diversi meccanismi di degrado generati da variazioni termiche e dagli agenti chimici. Il problema dell'aggressione ambientale causato da piogge acide e gradienti termici sulle rocce di marmo è un aspetto importante da tenere in considerazione per la progettazione delle facciate degli edifici, poiché può causare inflessione, microfessure e spalling. Inoltre, è necessaria un'accurata comprensione dei danni indotti per il restauro e la conservazione dei monumenti storici. Nel mondo sono infatti molteplici gli edifici commerciali in cui il rivestimento in marmo, soggetto all'azione meccanica del vento, a stress termici dovuti al sole, e ad effetti chimici (corrosione) dovuti ad esempio a piogge acide e all'aria inquinata, presenta lastre sottili affette dal problema dell'inflessione noto con il termine di bowing.

Mentre gli stress termici sono stati ampiamente studiati negli ultimi anni, l'effetto combinato degli agenti atmosferici termici e chimici (inteso come l'azione combinata di acqua piovana e inquinanti atmosferici) è ancora poco compreso.

Obiettivo di questa tesi è la stima del degrado dei parametri fisici e meccanici dei campioni di marmo (bianco di Carrara) valutando l'influenza dei trattamenti che sono operabili in campo sperimentale.

La tesi si sviluppa in 7 capitoli a cui seguono la bibliografia di riferimento e, in ultimo, le schede tecniche dei provini analizzati nella sperimentazione. Entrando nel dettaglio, il Capitolo 1 prende in esame casi reali e documentati dell'applicazione del marmo di Carrara, le problematiche riscontrate, e viene illustrato l'obiettivo della ricerca. Il Capitolo 2 descrive il materiale e il bacino di estrazione. Il Capitolo 3 analizza i metodi e i parametri investigati. Nel Capitolo 4 sono descritti i meccanismi di degrado eseguiti in laboratorio sui campioni di marmo, ovvero sia mediante trattamento termico (forno industriale) e termochimico (bagno termostatico). Il Capitolo 5, invece, costituisce il vero e proprio Report di Prova in cui vengono analizzate tutte le prove eseguite, con le relative osservazioni sperimentali e i grafici Momento-Deformazione. Il Capitolo 6 confronta i dati ottenuti dalle analisi in relazione ai diversi condizionamenti imposti al marmo. Infine nel Capitolo 7 sono riportate le conclusioni che riassumono i principali risultati ottenuti nello svolgimento di tutto il lavoro.

1. OBIETTIVI DELLA RICERCA

In questo capitolo si vuole dare uno sguardo generale all'applicazione del marmo per scopi di rivestimento, ai fenomeni ambientali ai quali è soggetto e a ciò che essi comportano. Essenzialmente vengono elencati i motivi per cui sono stati fatti (e verranno fatti) molti studi al riguardo di una problematica che ha comportato costi non previsti su strutture esistenti.

1.1 Introduzione

L'oggetto di questa tesi è l'analisi della variazione di alcune proprietà fisiche e meccaniche di rocce carbonatiche, ed in particolare di marmo bianco di Carrara, per effetto di aggressione termo-chimica riprodotta. Ciò al fine di valutare quanto le condizioni imposte in laboratorio influiscano sulle caratteristiche di durabilità del materiale, in relazione ai fenomeni ambientali cui possono essere soggette le lastre di marmo impiegate per scopi di rivestimento esterno.

Originariamente il marmo era per lo più un elemento da costruzione portante, utilizzato in blocchi (con dimensioni anche metriche) e dotato di durabilità e resistenza molto maggiori rispetto a quelle utilizzate nei giorni nostri. Già verso la fine del XIX secolo incominciarono le prime ricerche scientifiche sulle proprietà del marmo; nel frattempo si è espanso molto l'utilizzo di rivestimenti in marmo, specialmente nell'ultima decade, con lastre di larghe dimensioni sempre più sottili (anche 2000 mm di lunghezza per 30 mm di spessore).

La causa del degrado delle proprietà fisico-meccaniche nel marmo è da ricercarsi in molteplici fattori: il rilascio di stress interni residuali (Logan et al., 1993; Royer e Carfagni, 1999; Siegesmund et al., 2008), la presenza di umidità (Koch e Siegesmund, 2004; Siegesmund et al., 2008) e l'attacco di piogge acide (Grimm, 1999; Royer e Carfagni, 1999) sono stati proposti come artefici delle fasi iniziali della perdita di resistenza. È inoltre comunemente riconosciuto come le variazioni termiche (Rayleigh, 1934, Royer e Carfagni, 1999, Siegesmund et al., 2000, Malaga et al., 2006) svolgano un ruolo molto importante: a causa dell'espansione termica anisotropa dei cristalli di calcite, in seguito a ripetuti cicli di riscaldamento-raffreddamento, si sviluppano microfessure al confine tra i grani (Siegesmund et al., 2000; Shushakova et al., 2013; Weiss et al., 2003).

Uno dei fenomeni di degrado meccanico del marmo per effetto di variazioni termiche è l'inflexione di sottili lastre di marmo, fenomeno noto con il termine di *bowing* che colpisce sia i monumenti storici sia gli edifici moderni (Kieslinger, 1934; Grimm, 1999; Marini e Bellopede, 2009; Royer e Carfagni, 1999; Siegesmund et al., 2000), dove lastre di marmo sono sempre più impiegate per la creazione di involucri esterni, e può manifestarsi già 10-15 anni dopo il loro posizionamento in opera (Jornet et al., 2001; Malaga et al., 2006).

Tra gli edifici moderni si citano la Finland Hall di Helsinki e l'Amoco Building di Chicago, quali famosi esempi in cui l'incurvamento delle lastre usate per rivestire le superfici esterne era così pronunciato da necessitarne l'intera sostituzione. Nel caso dell'Amoco Building, vennero sostituite oltre 43000 lastre (1,2 m x 0,9 m circa) di marmo bianco di Carrara, che presentavano *bowing* o rotture, per un costo complessivo di 80 milioni di dollari (Siegesmund et al., 2000).

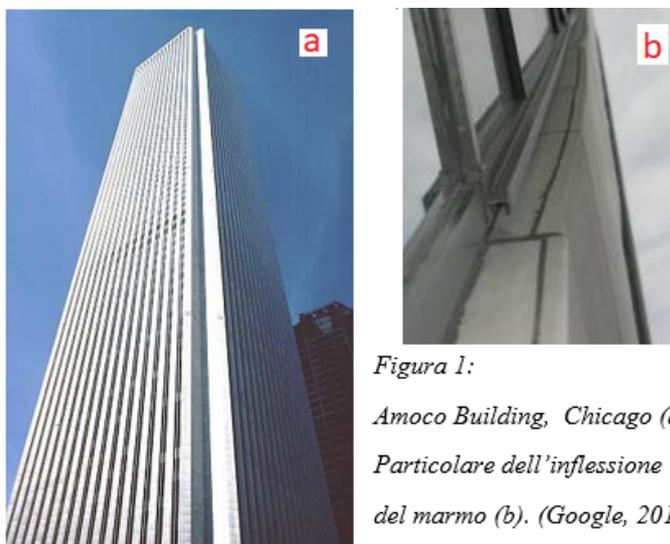


Figura 1:
Amoco Building, Chicago (a);
Particolare dell'inflessione
del marmo (b). (Google, 2019)

Come noto, l'effetto della variazione della temperatura comporta una variazione del volume del materiale roccioso per effetto della variazione delle dimensioni dei singoli cristalli.

Combinata al ciclo termico la presenza di acqua può aumentare il deterioramento del marmo: l'umidità può saturare i pori, e l'acqua, aumentando di volume per effetto del riscaldamento, esercita una forza sulle pareti dei capillari, provocando la dilatazione del marmo con progressivo distacco dei cristalli di calcite.

Nei cicli gelo-disgelo, le variazioni di volume del materiale a livello microscopico possono facilitare l'entrata di acqua che, gelando, romperebbe la struttura del marmo inficiando la resistenza flessurale e aprendo la strada ad ulteriori processi di alterazione.

Nel caso di lastre, si può sviluppare un gradiente di temperatura tra il lato esterno, esposto direttamente alle variazioni di temperatura dell'aria e alla radiazione solare, e il lato interno della lastra, più protetto dalle escursioni termiche. Questo gradiente di temperatura tra i due lati può generare tensioni tra i grani: il lato esterno, più influenzato dalla micro-fessurazione, tende ad espandersi ma è vincolato dal lato interno che tende a preservare la dimensione originale.

Un esempio di tipologia di rivestimento in marmo è, ad esempio, la facciata ventilata: nella parte retrostante del rivestimento vi è un ricircolo d'aria dal basso verso l'alto che impedisce ristagni di umidità. In genere le lastre sono sostenute da una struttura metallica con perni di ancoraggio che devono essere comunque abbastanza larghi per permettere le espansioni delle lastre.

Parte di questi rivestimenti sono ricavati dalle coltivazioni delle cave di marmo bianco di Carrara (dove al momento sono attivi oltre 200 siti di estrazione), ma per questa applicazione il materiale viene cavato anche dai bacini marmiferi presenti in America, Norvegia e Portogallo.

Nel mondo sono presenti molteplici edifici commerciali in cui il rivestimento in marmo, soggetto all'azione meccanica del vento, a stress termici dovuti al sole, e ad effetti chimici (corrosione) dovuti ad esempio a piogge acide e all'aria inquinata, presenta lastre affette dal problema di inflessione. Dei numerosi casi verificatisi in Europa, alcuni sono stati studiati valutando il sito, il materiale del rivestimento, il tipo dell'edificio, e il periodo in cui è stato costruito, registrando infine le deformazioni e i danni presenti nei rivestimenti.

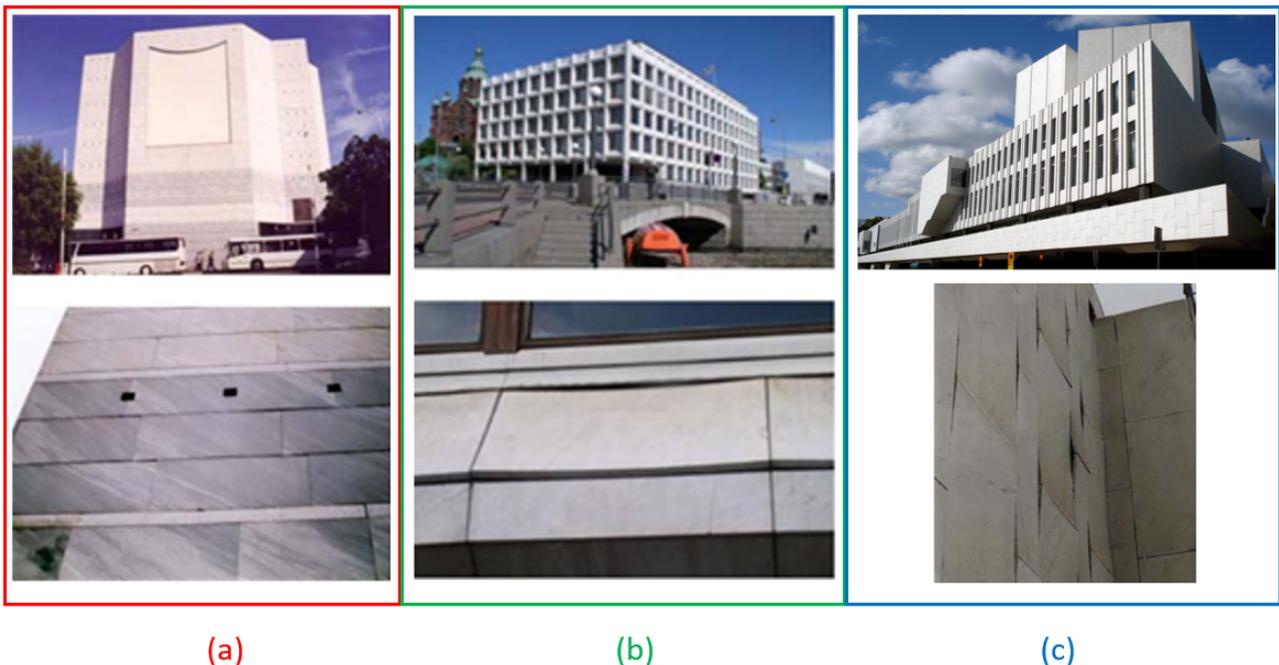


Figura 2 Alcuni esempi di bowing in edifici europei

(a) Nizza, Francia: Teatro e museo di arte moderna. Bowing convesso in lastre principalmente nella facciata Sud e Sud-Ovest. (b) Helsinki, Finlandia: lo Stora Enso office building. Bowing convesso e concavo in lastre è apparso in tutte le orientazioni. (c) Finlandia Hall di Alvar Aalto: Particolare delle lastre di marmo pochi mesi prima che venissero sostituite.

Noto che in presenza di carichi termici ciclici, dovuti ad esempio a escursioni giornaliere di temperatura, si crea un accumulo di deformazioni permanenti con progressiva decoesione dei grani di calcite (Ferrero et al., 2009), l'eventuale apporto di umidità acida conseguenza delle piogge e dello zolfo presente nell'atmosfera potrebbero penetrare la scarsa porosità del marmo. La passivazione del marmo, divenuto superficialmente gesso, potrebbe lentamente degradare la resistenza della roccia accrescendo l'intensificazione degli sforzi.

Alla luce di quanto detto, perciò, emerge l'importanza di cogliere se e quanto possa influire il ruolo delle piogge acide combinato a cicli termici sulle caratteristiche fisiche e meccaniche della roccia.

1.2 Scopo

Obiettivo di questa tesi è la stima del degrado dei parametri meccanici dei campioni di marmo (bianco di Carrara) valutando l'influenza dei trattamenti che sono operabili in campo sperimentale.

A tale scopo sono stati analizzati con prove distruttive e non distruttive numerosi provini di marmo ricavati da un'unica lastra di marmo.

Nota la problematica dell'anisotropia, i campioni ricavati dalla stessa lastra, sono stati catalogati in modo tale da riconoscere la loro giacitura al momento dell'estrazione.

Le prove sono state eseguite su rovine naturali a temperatura ambiente, su provini trattati termicamente (a temperature di 50° e 90°) e su provini trattati termo-chimicamente (Tabella 1)

La sperimentazione ha previsto l'analisi di 28 barrette al verso, suddivise in 3 macro gruppi in base al trattamento superficiale da eseguire come segue:

Tabella 1 Gruppi della sperimentazione

Macro gruppi		Trattamento previsto	Temperatura	Numero di campioni
1.	a)	Naturale (inalterato)	20°C	7
2.	b)	Termico	50°C	4
	c)	Termico	90°C	5
3.	d)	Termico e Chimico (Acido Solforico)	50°C	7
	e)	Termico e Chimico (Acido Solforico)	90°C	4

Il primo gruppo non ha subito condizionamenti al materiale: ciò è stato utile per caratterizzare il materiale estratto e valutarne la variabilità naturale.

Il secondo gruppo ha subito un trattamento termico, a due valori distinti di temperatura (50°C - 90°C).

Il terzo ed ultimo gruppo di provini sono stati posti in un contenitore stagno con soluzione contenente acido solforico avente concentrazione nota: anche in questo caso sono stati suddivisi per temperature di riferimento (50°C - 90°C) e posti in bagno termostatico per la durata di 5 giorni.

La caratterizzazione delle proprietà fisiche (densità, velocità di propagazione delle onde ultrasoniche) è stata effettuata mediante misurazioni della velocità ultrasonica attraverso l'impiego di un apposito strumento (PunditLab).

La caratterizzazione meccanica ha invece previsto lo svolgimento di test a tre o quattro punti su barrette prismatiche con misura dei carichi e della freccia e delle deformazioni misurate anche tramite la ripresa di immagini digitali per l'applicazione di tecniche di correlazione di immagini digitali (DIC), allo scopo di verificare la distribuzione delle deformazioni e la localizzazione degli sforzi sulla faccia di alcuni provini.

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è, dunque, quello di analizzare e quantificare la variazione delle proprietà meccaniche e fisiche di campioni di marmo bianco di Carrara per effetto di aggressione termo-chimica simulata in laboratorio.

2 INQUADRAMENTO GENERALE

Questo paragrafo è dedicato alla descrizione litologica del materiale. Per completezza d'informazione si procede alla geolocalizzazione del bacino di estrazione, fornendo qualche dato storiografico.

2.1 Inquadramento Geografico

I campioni di marmo di Carrara (per i Romani *marmor lunensis*), oggetto del caso studio di questa tesi, vengono estratti dal bacino delle Alpi Apuane, nel Nord-occidentale del territorio toscano, zona universalmente nota come uno dei maggiori depositi marmiferi di pregio al mondo.



Figura 3 Localizzazione geografica del Comune di Carrara:

a grande scala (Fig.A) e a piccola scala (Fig.B); Immagine satellitare della cava Gioia (Fig.C), sito di estrazione nel Comune di Carrara, Toscana (Google Maps®, 2019).

L'assetto geologico generale dell'area è riconducibile a una struttura monoclinale, inclinata a SW di 40-50°, con affioramenti di rocce in gran parte calcareo-dolomitiche, caratterizzate quindi da elevata competenza e permeabilità. Le cave di Carrara sono comprese nel bacino idrografico del torrente Carrione, suddiviso a monte della città nei rami di Torano e Colonnata, e sono convenzionalmente suddivise in quattro bacini estrattivi (da Nord a Sud i bacini di *Pescina-Boccanaglia*, *Torano*, *Fantiscritti* e *Colonnata*).

2.2 Cava Gioia

La cava da cui è estratto il materiale è denominata Gioia, situata nel bacino di Colonnata. Si sviluppa su una estensione coltivata di 50.000 m² e presenta mediamente 5-6 fronti di estrazione.

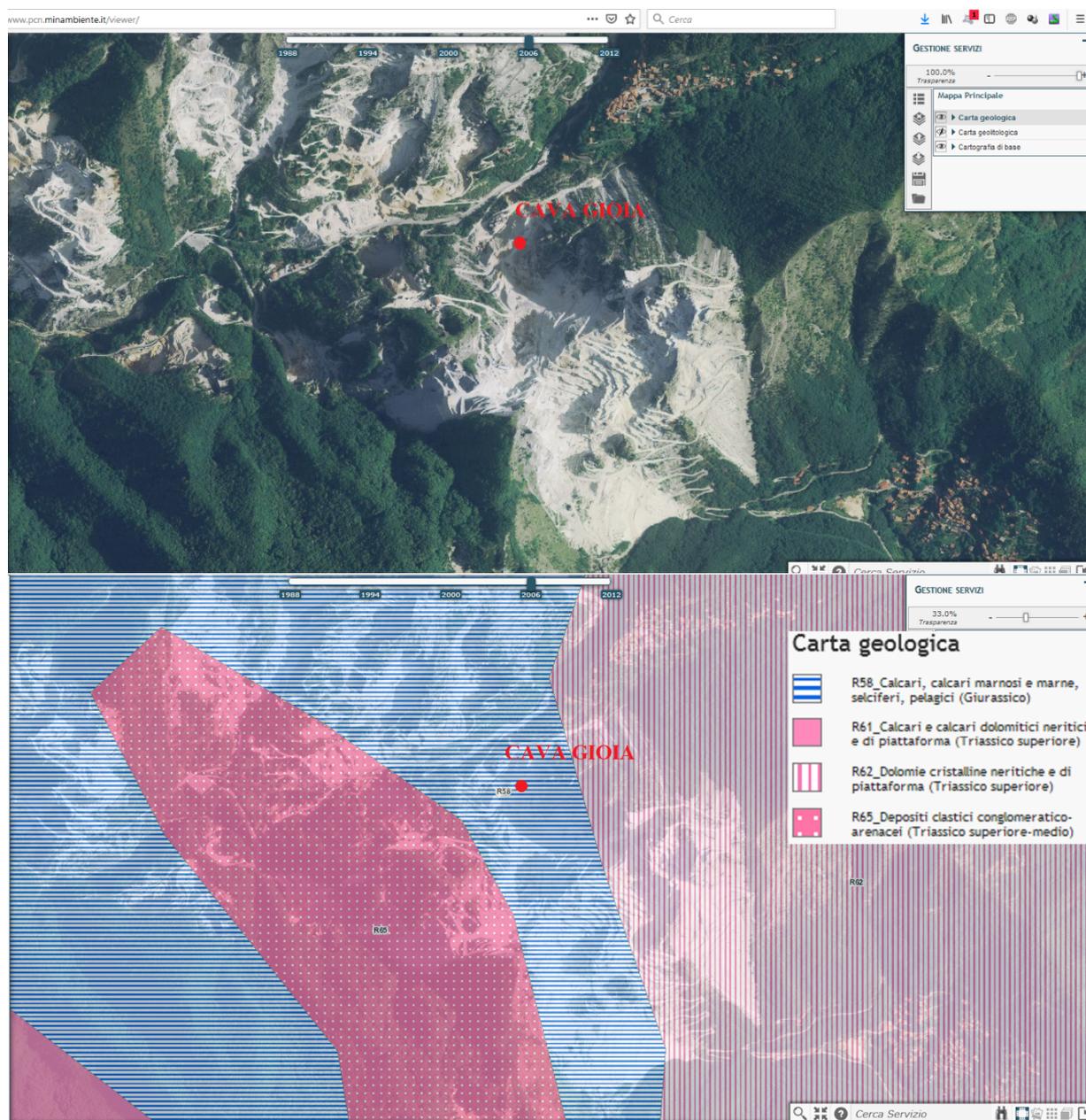


Figura 4 Inquadramento Geografico e Geologico (fonte <http://pcn.ambiente.it>, 2019)



Figura 5 Fronti estrattivi di Cava Gioia (fonte <http://marmobiancogioia.it>)

Con ogni probabilità il Bianco Carrara è la più rappresentativa e conosciuta tra le varietà dei marmi Apuani e, tuttavia, da cava Gioia vengono estratte molteplici qualità di marmo tra cui Venato Gioia, Brouillé, Venié Brouillé, Venatino Pencilvein.

L'andamento delle venature, che contraddistingue le diverse varietà di marmo, può essere smorzato o accentuato in base alla direzione di segagione del blocco. Nell'attività estrattiva, infatti, si deve analizzare, oltre all'aspetto qualitativo, la giacitura e cubatura della potenza utile dell'affioramento, in special modo la fratturazione presente. Questa fase condiziona i volumi utili alla coltivazione e la possibilità di estrazione di blocchi con misure idonee alla segagione.

I sistemi di fratturazione principali, apertisi nelle fasi tettoniche più recenti, insieme al clivaggio, acquisito dalle rocce nella fase tettonica compressiva principale, determinano l'orientazione dei tre piani nello spazio seguiti nell'apertura e nella coltivazione delle cave. Questi sono:

- il “verso”, piano di distacco preferenziale che segue la scistosità primaria;

- il “contro”, perpendicolare al precedente, presenta maggiore difficoltà ad aprirsi secondo piani regolari;
- il “secondo”, che offre buone capacità di distacco con mezzi meccanici o esplosivo.

I blocchi sono normalmente tagliati in lastre “al verso” o “al contro”, in modo da non accentuare il disegno delle venature.

2.3 Storiografia dell'estrazione

Le cave di marmo erano probabilmente già utilizzate durante l'età del rame dai primitivi abitanti della zona per produrre utensili vari, oggetti decorativi e commemorativi.

Fu estratto prima dagli Etruschi e successivamente, oltre 2000 anni fa, dai Romani, i quali svilupparono l'attività estrattiva vera e propria. A partire dall'epoca di Giulio Cesare, infatti, rifornirono di blocchi di marmo bianco le maggiori costruzioni pubbliche di Roma e numerose dimore patrizie. L'esportazione avveniva tramite navi, le quali salpavano dal porto di Luni, motivo per il quale veniva detto marmo lunense.

L'importanza del marmo in ambito strutturale crebbe durante il Cristianesimo, nell'edificazione di ambienti religiosi e in particolar modo per il loro adornamento interno.

‘Ogni blocco di pietra ha una statua dentro di sé ed è compito dello scultore scoprirla’, con questa frase Michelangelo (1475-1564), illustre scultore e protagonista del Rinascimento italiano, celebrava l'importanza del marmo di Carrara.

L'escavazione del marmo nelle Alpi Apuane risale ad epoche assai remote (I sec.a.C.) e ha subito nel secolo scorso profonde trasformazioni. Si passò dalla tecnica della “formella” usata anticamente dai Romani, alla successiva invenzione della polvere da sparo grazie a cui, mediante l'operazione di Varata, le dimensioni dei distacchi divenne più consistenti. La vera e grande rivoluzione nella tecnica estrattiva, tuttavia, avvenne alla fine dell'800 con le invenzioni del filo elicoidale e della puleggia penetrante. Il notevole sviluppo delle tecniche di taglio, fino all'attuale filo diamantato e le segatrici a catena, ha consentito un notevole incremento della produzione.

Al giorno d'oggi il marmo è commercializzato principalmente sotto forma di lastre che possono avere dimensioni diverse e uno spessore variabile da 1 a 30 cm: essi rappresentano i due estremi minimi e massimi al di sotto dei quali le lastre risulterebbero fragili e difficili da lavorare.

In architettura questo materiale è ampiamente utilizzato in pareti esterne e rivestimenti, pavimenti, elementi decorativi, scale e passerelle.

2.4 Descrizione del materiale

Il marmo è composto principalmente di calcite minerale (CaCO_3) come risultato della ricristallizzazione del calcare sotto intensa pressione e calore (metamorfismo) che crea una roccia con una struttura molto cristallina e una porosità piccola ma definita.

Nel caso studio in oggetto è stato analizzato il Gioia Venato, di cui si fornisce la scheda tecnica redatta da una delle imprese estrattrici:



Categoria: venato
Colore: Bianco
Nome petrografico (secondo EN 12407): Marmo
Descrizione macroscopica: Litotipo afanitico, compatto, dal colore d'insieme bianco tendente al grigio chiaro, con frequenti venature grigie di spessore micrometrico e ad andamento grossomodo perpendicolare. Sono frequenti plaghe e chiazze anche sub-centimetriche, sub-arrotondate, di colore grigio scuro. Rare le porosità superficiali.

Caratteristiche fisico-meccaniche

NORMA		U.M.	VAL. MEDIO	DEV. ST.
> EN 13755-08	Assorbimento d'acqua a pressione atmosferica	%	0,12	0,01
> EN 1936-07	Massa volumica apparente	KG/m3	2710	5,2
> EN 1936-07	Porosità aperta	%	0,4	0,02
> EN 12372-07	Resistenza a flessione con carico concentrato			
	(allo stato naturale)	MPa	11,6	2,5
	(EN 12371-03 dopo 48 cicli di gelo)	MPa	9,6	1,9
> EN 1926-07	Resistenza alla compressione	MPa	101,4	10,8
> EN 14231-04	Resistenza allo scivolamento			
	Finitura levigata (secco)	USRV	71	2,7
	Finitura levigata (bagnato)	USRV	33	2,4

Descrizione microscopica (EN 12407 e EN 12460)

Litotipo metamorfico cristalloblastico costituito da blasti calcitici di dimensioni variabili (da 60 a 600 μm) di forma subedrale/euedrale, con bordi suturati o rettilinei. La struttura è anisotropa a causa dell'orientazione preferenziale delle foliazioni presenti. Le venature sono costituite da individui calcitici particolarmente intorbidenti da minerali opachi e inclusi bollosi, da microblasti calcitici ($20 \div 30 \mu\text{m}$), da pirite idioblastica ($< 20 \mu\text{m}$), da quarzo e feldspati ($< 350 \mu\text{m}$) e da muscovite aciculare.

Figura 6 Immagine e caratterizzazione fornita da marmicarrara.it (Marmi Carrara SRL, 2019).

Il Bianco Venato possiede una tessitura saccaroide a grana medio-fine compatta con andamento delle venature ben definita. In accordo alla descrizione fornita in precedenza, il marmo appare di colore bianco tendente al grigio chiaro, con venature frequenti e senza particolari porosità superficiali. I provini impiegati nella sperimentazione oggetto della tesi provengono da un'unica lastra di dimensioni 1 x 0,6 x 0,06 m estratta da cava Gioia e da cui sono stati ricavati un totale di 64 cubi (di dimensioni 60 x 60 x 60 mm) e 61 barrette (193 x 31 x 60 mm).



Figura 7 Catalogazione dei campioni.(2019)

I provini utilizzati per lo scopo di questa tesi sono giunti al Laboratorio di Scienza della Terra (Università di Torino) dove sono stati catalogati in base alla giacitura seguendo la venatura del marmo: sono state identificate 48 barrette al verso e 13 al contro.

L'attività sperimentale ha previsto l'analisi di 28 barrette al verso, suddivise in 3 macro gruppi in base al trattamento di invecchiamento effettuato (vedi Tabella 2): alcuni provini sono stati analizzati nelle condizioni naturali, alcuni sono stati soggetti al solo trattamento termico (a 50° e 90°) ed altri a trattamento termo-chimico (a 50° e 90°)

Tabella 2 Suddivisione dei campioni nei rispettivi trattamenti.

	Trattamento previsto	Temperatura	Numero di campioni	Nome Campione
a.	Naturale (inalterato)	20°C	7	B4, B8, B26, B33, B38, B39, B43
b.	Termico	50°C	4	B19, B32, B42, B45
c.	Termico	90°C	5	B18, B24, B34, B36, B40
d.	Chimico (Acido Solforico)	50°C	8	B2, B3, B11, B12, B13, B14, B15, B17
e.	Chimico (Acido Solforico)	90°C	4	B5, B6, B31, B48

La prima fase della sperimentazione ha previsto la misura di precisione geometrica e del peso dei provini al fine di valutarne la densità apparente.

Come visibile in Figura 8 la densità media si attesta sui 2709 kg/m^3 con una deviazione standard pari a 28 kg/m^3 .

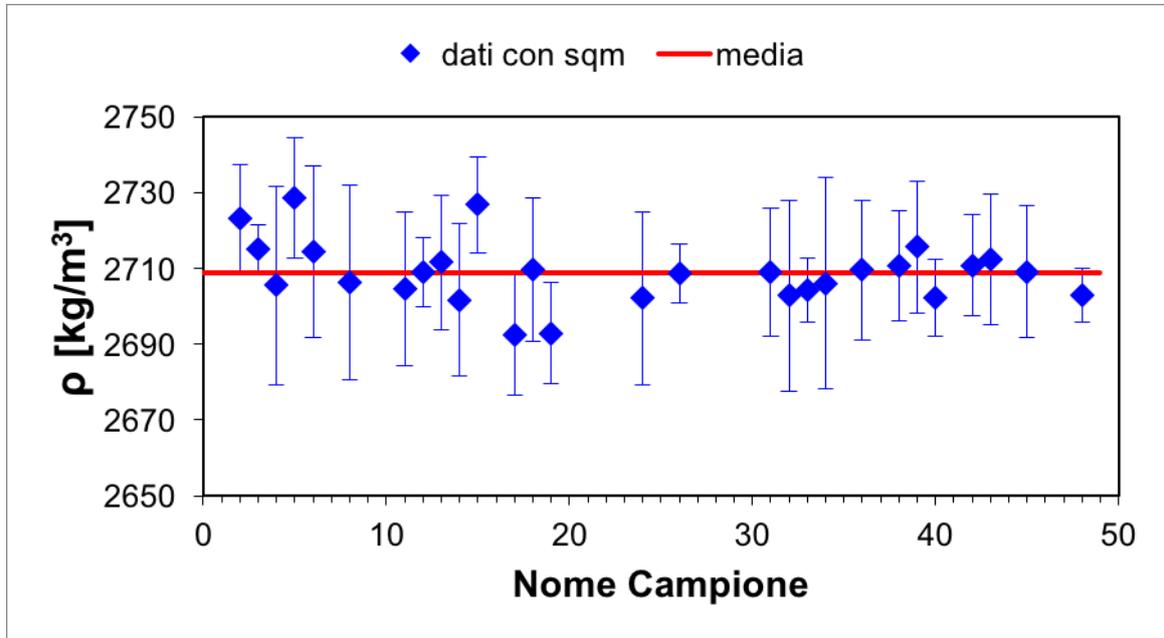


Figura 8 Valutazione della densità

In ascissa: ordine dei campioni in base alla nomenclatura assegnata; In ordinata: densità espressa in kg/m^3 e relativo scarto quadratico medio (indicato con la barra d'errore). In rosso posto il valor medio.

Volendo fornire un sintetico sguardo d'insieme a questa prima fase della caratterizzazione del materiale, si forniscono in *Tabella 3* i valori geometrici mediati dei campioni.

Per ogni barretta analizzata infatti, sono state effettuate più misurazioni nei 3 assi, al fine di descrivere adeguatamente i campioni.

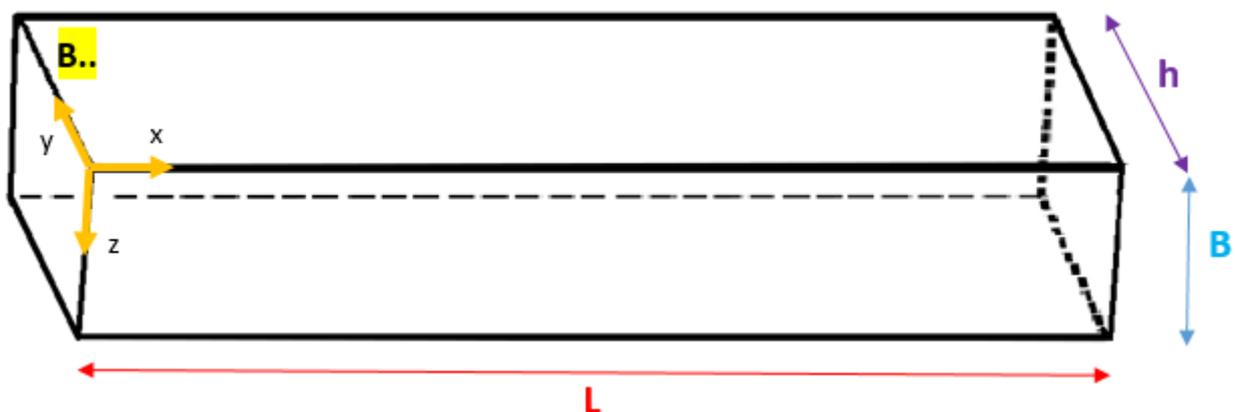


Figura 9 Schematizzazione del sistema di riferimento delle barrette.

L: lunghezza; h: altezza; B: profondità. x, y, z: sistema di riferimento.

Tabella 3 Valori numerici dei campioni analizzati presso il Laboratorio di Scienza della Terra.

(Università di Torino)

Sigle:

W= massa;

L=lunghezza;

h=altezza;

B= profondità;

V= volume;

ρ =densità.

Nome Campione	Nota	W [g]	L1 [cm]	L2 [cm]	L3 [cm]	L4 [cm]	L [cm]	dev.st L [cm]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h [mm]	dev.st H [mm]	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	B4 [mm]	B [mm]	dev.st B [mm]	V [mm ³]	dev.st V [mm ³]	ρ [kg/m ³]	dev.st ρ [kg/m ³]	
B2	al verso	992,00	19,30	19,40	19,40	19,40	19,38	0,05	59,94	60,01	60,02	59,99	0,04	31,40	31,29	31,37	31,30	31,34	0,05	364267	1830	2723,28	14,02	
B3	al verso	981,90	19,40	19,40	19,40	19,40	19,40	0,00	60,03	60,10	60,01	60,05	0,05	31,01	31,10	31,06	31,01	31,05	0,04	361645	793	2715,09	6,24	
B4	al verso	966,20	19,40	19,30	19,30	19,40	19,35	0,06	59,94	59,79	59,85	59,86	0,08	30,78	30,68	30,81	31,06	30,83	0,16	357130	3396	2705,46	26,26	
B5	al verso	974,00	19,30	19,30	19,40	19,40	19,35	0,06	59,79	59,81	59,88	59,83	0,05	30,79	30,90	30,87	30,78	30,84	0,06	356960	2035	2728,60	15,93	
B6	al verso	951,80	18,90	18,90	19,00	19,00	18,95	0,06	60,05	60,03	60,10	60,06	0,04	30,83	30,92	30,88	30,61	30,81	0,14	350660	2860	2714,31	22,60	
B8	al verso	969,40	19,30	19,30	19,40	19,40	19,35	0,06	60,29	60,06	60,04	60,13	0,14	30,87	30,64	30,73	30,90	30,79	0,12	358188	3323	2706,40	25,63	
B11	al verso	976,60	19,30	19,40	19,40	19,40	19,38	0,05	60,41	60,37	60,22	60,33	0,10	30,94	30,99	30,86	30,77	30,89	0,10	361091	2663	2704,58	20,37	
B12	al verso	974,50	19,40	19,40	19,40	19,40	19,40	0,00	60,11	59,88	59,91	59,97	0,13	30,94	30,94	30,87	30,94	30,92	0,04	359738	1158	2708,92	9,03	
B13	al verso	961,60	19,10	19,20	19,20	19,10	19,15	0,06	59,95	59,99	59,95	59,96	0,02	30,89	30,94	30,95	30,75	30,88	0,09	354623	2268	2711,61	17,74	
B14	al verso	960,60	19,20	19,20	19,30	19,20	19,23	0,05	60,06	60,02	59,99	60,02	0,04	30,74	31,00	30,75	30,76	30,81	0,13	355560	2583	2701,65	20,06	
B15	al verso	968,90	19,20	19,30	19,30	19,20	19,25	0,06	59,89	59,89	59,84	59,87	0,03	30,84	30,79	30,82	30,87	30,83	0,03	355335	1627	2726,72	12,82	
B17	al verso	957,90	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	0,00	59,79	59,83	59,83	59,82	0,02	30,90	30,57	30,87	30,93	30,82	0,17	355776	2064	2692,42	15,99	
B18	al verso	960,70	19,20	19,20	19,20	19,20	19,23	0,05	60,07	60,11	60,08	60,09	0,02	30,68	30,83	30,72	30,54	30,69	0,12	354549	2434	2709,64	19,01	
B19	al verso	964,60	19,20	19,20	19,20	19,20	19,23	0,05	60,02	60,04	60,09	60,05	0,04	30,96	31,06	31,02	31,07	31,03	0,05	358200	1725	2692,91	13,31	
B24	al verso	987,10	19,20	19,20	19,20	19,20	19,20	0,00	60,15	60,00	60,01	60,05	0,08	31,74	31,36	31,82	31,81	31,68	0,22	365307	3026	2702,11	22,85	
B26	al verso	985,80	19,20	19,20	19,20	19,20	19,20	0,00	59,96	59,96	59,95	59,96	0,01	31,60	31,73	31,60	31,53	31,62	0,08	363942	996	2708,68	7,71	
B31	al verso	997,60	19,20	19,30	19,30	19,30	19,28	0,05	59,95	59,96	59,96	59,96	0,01	31,94	31,71	31,87	31,94	31,87	0,11	368253	2248	2709,01	16,91	
B32	al verso	980,50	19,20	19,30	19,30	19,30	19,25	0,06	59,88	59,97	59,94	59,93	0,05	31,57	31,53	31,48	31,20	31,45	0,17	362766	3305	2702,84	25,13	
B33	al verso	973,80	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	0,00	60,02	60,02	60,01	60,02	0,01	31,12	31,02	31,20	31,01	31,09	0,09	360093	1077	2704,30	8,39	
B34	al verso	960,30	19,20	19,30	19,30	19,30	19,28	0,05	60,05	60,06	60,66	60,26	0,35	30,57	30,48	30,58	30,59	30,56	0,05	354880	3577	2705,98	27,83	
B36	al verso	966,10	19,20	19,30	19,20	19,20	19,23	0,05	59,96	59,98	59,99	59,98	0,02	31,01	30,75	30,95	30,98	30,92	0,12	356552	2378	2709,56	18,47	
B38	al verso	962,60	19,20	19,20	19,20	19,20	19,23	0,05	59,94	59,99	59,99	59,97	0,03	30,80	30,89	30,74	30,77	30,80	0,06	355120	1844	2710,63	14,44	
B39	al verso	999,50	19,20	19,20	19,30	19,30	19,25	0,06	59,81	59,83	59,79	59,81	0,02	31,98	31,84	31,99	32,06	31,97	0,09	368055	2292	2715,62	17,29	
B40	al verso	1006,10	19,30	19,40	19,40	19,40	19,38	0,05	59,87	59,83	59,84	59,85	0,02	32,13	32,12	32,08	32,11	32,11	0,02	372325	1342	2702,21	10,04	
B42	al verso	992,00	19,30	19,30	19,40	19,40	19,35	0,06	59,95	59,96	59,96	59,96	0,01	31,56	31,50	31,50	31,61	31,54	0,05	365944	1746	2710,80	13,27	
B43	al verso	969,10	19,30	19,30	19,40	19,40	19,35	0,06	60,09	60,08	60,07	60,08	0,01	30,67	30,87	30,88	30,71	30,73	0,09	357280	2213	2712,44	17,19	
B45	al verso	1001,60	19,40	19,50	19,50	19,50	19,48	0,05	59,99	59,97	59,97	59,98	0,01	31,62	31,53	31,66	31,80	31,65	0,11	369716	2337	2709,11	17,50	
B48	al verso	975,10	19,50	19,50	19,50	19,50	19,50	0,00	59,98	59,93	59,91	59,94	0,04	30,87	30,79	30,87	30,93	30,87	0,06	360759	889	2702,91	6,95	
Media		975,64					19,29	0,06				59,99	0,35					31,12	0,22		360168	3577	2708,85	27,83

3 METODI E PARAMETRI INVESTIGATI

In questo capitolo sono presenti dei richiami ai principi teorici e metodologici utilizzati per lo svolgimento della relazione: essi possono essere di particolare utilità per poter comprendere meglio i calcoli svolti nei capitoli successivi.

CENNI TEORICI

3.1 Richiami di Teoria dell'Elasticità

Si definisce *tensione* interna (o sollecitazione interna) una misura di forze di contatto esercitate tra le parti interne di un corpo continuo tridimensionale attraverso la relativa superficie di separazione. Essa è definita come la forza di contatto per unità di area, cioè è il limite del rapporto tra la forza agente e l'area della superficie su cui agisce

$$\sigma = \lim_{dA \rightarrow 0} \left(\frac{dF}{dA} \right)$$

Il concetto di tensione riveste un ruolo fondamentale in tutta la Meccanica del Continuo in quanto caratterizza lo stato delle forze interne / sollecitazioni interne di un corpo, e, di conseguenza, il comportamento del materiale costituente il corpo.

La *deformazione* di un corpo continuo è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica del corpo che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni. Al pari della tensione, riveste un ruolo fondamentale poiché la caratterizzazione meccanica del comportamento del materiale costituente il corpo è formulata da relazioni costitutive, convenientemente espresse in termini di legame tra i parametri che descrivono lo stato di sollecitazione e di deformazione del corpo stesso. La *legge costitutiva* è pertanto una relazione matematica atta a caratterizzare il comportamento macroscopico del materiale, correlando lo stato di tensione allo stato di deformazione ad esso associato; rappresentano un modello teorico che traduce in termini matematici le caratteristiche del fenomeno fisico "reale" definendo delle classi di comportamento ideali.

L'analisi delle sollecitazioni, o analisi delle tensioni, consiste nel determinare lo stato tensionale in materiali e strutture soggetti a forze o carichi applicati in modo statico o dinamico.

L'analisi della deformazione consiste nello studio della trasformazione che porta un corpo dalla configurazione indeformata alla configurazione deformata.

È necessario premettere che tutti i materiali reali hanno un comportamento assai complesso, soprattutto se esaminato in un ampio intervallo di tensioni o variazioni di temperatura, sicché non sempre un legame costitutivo può essere espresso in maniera semplice da una funzione.

Un *solido* ideale è definito *elastico* se, in qualunque fase di carico o scarico, la sua risposta è caratterizzata da una *corrispondenza biunivoca* tra tensioni e deformazioni. Ciò implica che il lavoro speso durante il processo deformativo viene completamente restituito una volta rimossa la causa perturbatrice e pertanto il processo è totalmente reversibile. Pertanto la variazione dei mutui rapporti tra le particelle (atomi, molecole) costituenti il materiale, al cessare della sollecitazione, tendono a ritornare nella posizione iniziale.

La legge di *Hooke*

$$\sigma = E\varepsilon$$

relaziona tensioni e deformazioni mediante E , ovvero il modulo elastico anche definito modulo di Young, ovvero la misura della entità della deformazione elastica di un materiale in seguito all'applicazione di uno sforzo.

3.2 Richiami di Meccanica della Frattura

Le rocce sono aggregati naturali di minerali, sottoforma di cristalli, e o di particelle mutuamente cementate tali da rendere il materiale come continuo alla scala del visibile (ad esempio alla scala del laboratorio). Alla microscala le rocce presentano microfratture inter o intra-granulari, dette crack o cricche, che influenzano notevolmente l'evolversi dei processi di rottura per effetto di stati tensionali o deformativi. La teoria di Griffith (1920), che ha portato all'evoluzione della moderna meccanica della frattura, presuppone che la propagazione dei difetti intrinseci nel materiale sia la causa della rottura del materiale fragile caricato. La meccanica della frattura valuta la resistenza di un corpo sollecitato attraverso la relazione tra le condizioni di carico, la geometria della fessura e la resistenza alla propagazione della fessura in termini di velocità di rilascio di energia critica (GC). Irwin (1957) descrisse la distribuzione dello stress K_I attorno all'apice della cricca e introdusse il concetto del fattore di intensità dello stress (SIF), valore critico chiamato tenacità a frattura (K_{IC}). Se il criterio di propagazione della frattura non è soddisfatto, cioè se $K_I < K_{IC}$, allora la frattura rimane stabile. Per molteplici materiali, è stato determinato sperimentalmente che si possono verificare significativi tassi di crescita delle fratture a valori $K < K_I$, spesso molto al di sotto dei valori critici di questi parametri. Questo fenomeno di crescita subcritica delle fessure (SCG), o a fatica, è uno dei meccanismi chiave nel comportamento di rottura temporale dipendente dalle rocce (Atkinson, 1984).

La frattura è il processo di rottura mediante il quale un corpo (ad esempio un campione di marmo) si disintegra in due o più pezzi. Una rottura fragile è definita come un processo di frattura che presenta una deformazione permanente (plastica) minima o nulla.

Il termine propagazione della cricca è definito come il processo di rottura mediante il quale una singola fessura o crepe preesistenti si estendono o crescono dopo l'inizio della cricca.

Si può fare una distinzione tra due tipi di propagazione delle cricche, vale a dire "stabile" e "instabile". La propagazione stabile della cricca prevede l'estensione della frattura in funzione del carico e perciò può essere controllata, invece per le cricche instabili l'estensione della frattura è governata anche da fattori diversi dal carico.

Nel materiale roccioso sottoposto a flessione, l'inizio della frattura, la propagazione instabile della frattura e la coalescenza delle cricche si verificano quasi contemporaneamente.

Dato che la resistenza a trazione di un materiale è generalmente molto più bassa di quella ipotizzata teoricamente, Griffith (1920) ha postulato che i tipici materiali fragili contengono inevitabilmente numerosi difetti sub-microscopici distribuiti casualmente, micro-incrinature o altre discontinuità.

I materiali rocciosi sono disomogenei e discontinui a tutte le scale e queste discontinuità servono come concentratori di stress.

Due requisiti per la rottura sono la concentrazione localizzata di stress, tale da superare la forza di coesione molecolare, e il fabbisogno energetico, che indica quanta energia potenziale è necessaria a superare la resistenza alla propagazione delle cricche. Dunque più energia assorbe un solido, maggiore è la sua resistenza alla propagazione della fessura.

3.3 Richiami di Teoria delle Onde

Le vibrazioni sono perturbazioni indotte da una sorgente in un dato mezzo fisico. A seconda del tipo di sorgente possono essere di natura meccanica, elettromagnetica etc.

Nel terreno lo stato vibratorio è legato al fatto che le particelle sono legate fra loro da vincoli elastici e non sono quindi totalmente libere di muoversi. Si generano così delle onde progressive di sforzo e di deformazione (longitudinali e/o trasversali rispetto alla direzione di propagazione) che si propagano con una velocità che dipende dalla tipologia di materiale attraversato. In generale le vibrazioni si attenuano con la distanza dalla sorgente e, a meno che il sistema oscillante non riceva continuamente energia dall'esterno (come nel caso delle macchine vibranti), sono per lo più smorzate nel tempo.

L'energia prodotta dalla sorgente si propaga nel mezzo producendo due tipologie di onde: le onde di superficie e le onde di volume.

Le prime sono perturbazioni che si generano in corrispondenza della superficie libera del corpo e le superfici di separazione intraposte fra mezzi con caratteristiche meccaniche diverse; questa tipologia di onde, però, non è stata studiata con la prova ad ultrasuoni.

Le onde di volume, invece, si propagano attraverso il volume del mezzo con fronti d'onda sferici o semisferici di raggio sempre più ampio. Questa tipologia di onde, in base alla direzione di vibrazione rispetto alla direzione di propagazione, può essere ulteriormente distinta in onde di compressione (onde P) e in onde di taglio (onde S).

Le *onde P* (o primarie) sono le più veloci e producono vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione dell'onda e sono perciò denominate "longitudinali". Conseguentemente al loro passaggio, il mezzo attraversato subisce deformazioni di compressione e dilatazione.

Le *onde S* (o secondarie) a differenza delle onde P, viaggiano più lentamente e con una direzione di propagazione differente: la vibrazione delle particelle risulta ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda, generando deformazioni di taglio che non sono trasmissibili nei fluidi dal momento che questi non presentano resistenza al taglio.

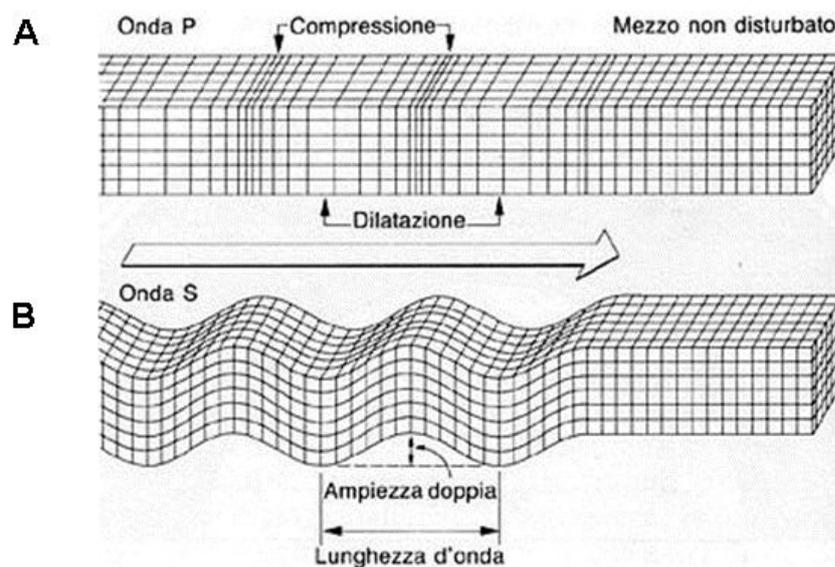


Figura 9 Schematizzazione della propagazione onde di volume in un mezzo non disturbato.

3.1 DIC (Digital Image Correlation)

Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica non a contatto, utilizzata per misurare spostamenti e deformazioni del materiale (Blaber et al., 2015) in un arco limitato di tempo.

La necessità di una stima quantitativa della curva sforzo-deformazione dei campioni ha reso la DIC popolare nell'ingegneria meccanica, specie nei test di roccia.

Nel campo della ricerca, in meccanica delle rocce, sono stati fatti molti tentativi di applicare la tecnica DIC durante le prove di carico: su marna sottoposte a test di compressione uniassiale (Ferrero et al.,

2009), su tufo sottoposto a test di compressione con deformazione piana (Nguyen et al., 2011), su pietra arenaria sottoposta ad indentazione (Zhang et al., 2012), su arenaria sottoposta a test brasiliani (Stirling et al., 2013), su granito sottoposto a prove di trazione uniassiale (Yang et al., 2015) ed anche per identificare la durezza delle fratture nelle rocce ricche di argilla (Guy et al., 2018). Non essendo, tuttavia, presenti in letteratura esempi di questa applicazione a campioni di marmo, questo lavoro di tesi vuole comprendere se la tecnica, nota la scarsa deformabilità del materiale, consenta di accrescere il campo di informazioni ottenute mediante fotogrammetria.

L' algoritmo utilizza immagini acquisite in momenti successivi di una prova meccanica da un punto di osservazione fisso per tracciare gli spostamenti relativi dei punti materiali tra un'immagine di riferimento (considerata indeformata) e un'immagine corrente (in genere deformata). La natura adimensionale dell' algoritmo DIC consente lo studio della deformazione a diverse scale di osservazione, da quella metrica a quella nanometrica, a condizione che il materiale possa essere adeguatamente fotografato e che le sue caratteristiche non siano omogenee, ma mostrino un'adeguata texture.

Negli algoritmi DIC basati su sottoinsiemi, l'immagine di riferimento viene suddivisa in regioni più piccole denominate sottoinsiemi (di pixel) o sottofinestre. Si presume che la deformazione omogenea all'interno di ciascun sottoinsieme e che i sottoinsiemi deformati possano essere riconosciuti nell'immagine corrente.

Ncorr® è un pacchetto DIC 2D, open source e implementato in MATLAB, in cui il risultato è una griglia con i dati di spostamento e di deformazione di ciascun sottoinsieme per ciascuna immagine analizzata rispetto all'immagine di riferimento (mappe degli spostamenti e delle deformazioni).

Alle mappe degli spostamenti è assegnabile un fattore di scala (pixel-mm) che consente di scalare i dati nell'unità di misura desiderata.

Ncorr®, valuta gli spostamenti orizzontali (u) e verticali (v) dei sottoinsiemi di pixel utilizzando l'algoritmo di Pan et al. (2009): viene effettuata una trasformazione dal sistema di coordinate dell'immagine di riferimento a quello dell'immagine corrente tramite un'equazione in funzione di un vettore ξ aumentato, contenente le coordinate x e y del sottoinsieme. Per trovare i dati di spostamento del sottoinsieme, l'algoritmo Ncorr® opera cercando una soluzione iniziale, che viene poi perfezionata per mezzo di un ottimizzatore non lineare. (Figura 20)

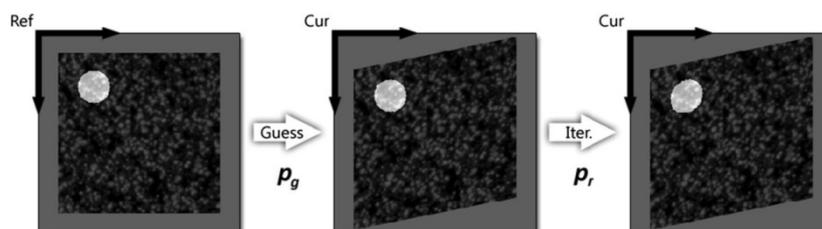


Figura 10 Passaggi di base dell'algoritmo DIC implementato in Ncorr®

Le deformazioni sono più difficili da risolvere rispetto agli spostamenti perché implicano un processo di differenziazione. Ciò significa che qualsiasi rumore nel campo degli spostamenti viene amplificato nel campo di deformazioni. Ncorr® usa le deformazioni Green-Lagrangiane, che sono ottenute usando i quattro gradienti di spostamento come segue:

$$E_{xx} = \frac{1}{2} \left[2 \frac{du}{dx} + \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right]$$

$$E_{yy} = \frac{1}{2} \left[2 \frac{dv}{dy} + \left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \right]$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} + \frac{dudu}{xdy} + \frac{dvdv}{xdy} \right)$$

La differenziazione è effettuata utilizzando l'algoritmo della finestra di calcolo della deformazione proposto da Pan et al. (2009). Il metodo si basa su una tecnica di minimizzazione puntuale: il campione è diviso in aree quadrate contenenti un numero finito di punti discreti (cioè la finestra di calcolo della deformazione). Tali finestre dovrebbero essere sufficientemente piccole da garantire che la distribuzione degli spostamenti al loro interno possa essere approssimata come piani i cui parametri, una volta risolti, possono essere usati nelle equazioni per determinare E_{xx} , E_{xy} ed E_{yy} . Il processo viene applicato all'intero campo di spostamento per ottenere un campo di deformazione corrispondente.

Le deformazioni sono quindi trovate come soluzione di un sistema di equazioni molto vincolato, mentre la dimensione della finestra secondaria (strain radius) per il calcolo delle deformazioni può essere controllata successivamente.

Una parte importante di questo processo comporta l'aggiornamento della regione d'interesse (ROI). Il metodo implementato in Ncorr® funziona automaticamente formando un limite attorno al ROI. Questo limite viene quindi aggiornato in base ai valori di spostamento ottenuti attraverso l'ultimo campo di spostamento calcolato per l'ultima immagine di riferimento.

È importante far notare che la maggior parte dell'errore di computazione si verifica per i punti in prossimità del limite della ROI, come evidenziato da verifiche effettuate sul software.

La definizione della dimensione del sottoinsieme è un passaggio importante nell'utilizzo del software: questo deve infatti contenere abbastanza caratteristiche distinte per ottenere una buona correlazione tra le diverse immagini. Inoltre, i sottoinsiemi con raggi più piccoli tendono ad essere maggiormente influenzati dal rumore presente in ogni immagine corrente.

DESCRIZIONE DELLE METODOLOGIE DI PROVA

Nel presente capitolo vengono descritte le attrezzature e le procedure impiegate nella campagna sperimentale, sui vari campioni di marmo. L'attività sperimentale ha avuto lo scopo di valutare, attraverso prove non distruttive (misura delle onde di volume V_P e V_S) e prove distruttive (prove a trazione per flessione a 3 e 4 punti di carico), i parametri meccanici di resistenza e deformabilità, nonché i parametri fisici quali la densità apparente.

3.2 Misurazione delle onde di Volume V_P e V_S

In questo studio sono state effettuate misurazioni della velocità ultrasonica per la stima delle proprietà fisiche, utili a ricavare indirettamente i moduli elastici del materiale analizzato.

Si è deciso di eseguire questa prova poiché è un test non distruttivo che consente di studiare lo stato di fratturazione della roccia causa di una riduzione della resistenza del materiale anche laddove non siano visibili segni di deterioramento.

La prova ad ultrasuoni consente di determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde S) nei provini, i quali devono rispettare alcuni criteri geometrici: la granulometria del campione roccioso, la frequenza naturale di risonanza dei trasduttori e la dimensione laterale minima del provino stesso sono fattori correlati che influenzano i risultati ricavati dai test.

In particolare, in accordo alla normativa ASTM D2845 (2017), per ottenere valori di velocità affidabile devono essere rispettati i seguenti requisiti geometrici:

- il rapporto tra la distanza di propagazione e la dimensione laterale minima del campione non deve essere superiore a 5;
- la distanza di propagazione dell'impulso attraverso il campione deve essere almeno 10 volte maggiore della dimensione media dei cristalli;
- la lunghezza d'onda, corrispondente alla frequenza principale del treno d'impulsi che attraversa il campione, è legata alla frequenza naturale di risonanza del trasduttore e alla velocità di propagazione degli impulsi (di compressione o taglio), secondo la relazione:

$$\lambda \sim V/f$$

in cui:

λ = lunghezza d'onda principale del treno d'impulsi [m],

V = velocità di propagazione dell'impulso (compressione o taglio) [m/s]

f = frequenza di risonanza naturale dei trasduttori [Hz].

In funzione di questa lunghezza d'onda, corrispondente alla frequenza principale λ , la dimensione laterale minima dei provini D deve essere almeno 5 volte la lunghezza d'onda delle onde di compressione λ :

$$D \geq 5\lambda.$$

Inoltre, la lunghezza d'onda deve essere almeno 3 volte la densità media d dei grani/cristalli costituenti la roccia:

$$\lambda \geq 3d.$$

Le 3 equazioni appena citate possono venire combinate per ottenere la seguente relazione, valida per le onde di compressione:

$$D \geq 5(V/f) \geq 15d.$$

Per determinare il tempo di propagazione dell'impulso, indipendentemente che sia dell'onda P o che sia dell'onda S, è fondamentale aumentare la tensione d'uscita del generatore d'impulsi, il guadagno dell'amplificatore, la sensibilità dell'oscilloscopio e portare il contatore ad un livello ottimale. Queste operazioni permettono di generare impulsi caratterizzati da un miglior rapporto segnale/rumore e di ottenere una stima affidabile di tempo.

Per la determinazione della velocità ultrasonica è stato tenuto presente che essa è fortemente influenzata dalla porosità, dalla presenza di anisotropie e di fratture e microfessure. In ciascun campione analizzato, al fine di stabilire le velocità V_P e V_S medie del mezzo, le misure sono state eseguite sia parallelamente alle facce nel piano xy (Figura 11) che perpendicolarmente ad essa. Dapprima sono stati stabiliti i riferimenti dei campioni e successivamente sono state effettuate le letture secondo i seguenti schemi:

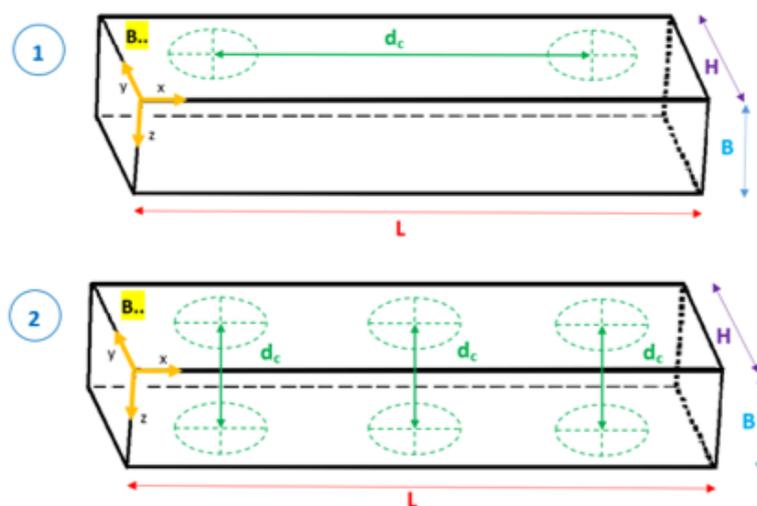


Figura 11 Direzione di lettura sorgente/ricevente.

Nei campioni la misura è stata effettuata sia nelle due facce contenute nel piano xy a distanza imposta pari a 15 cm (schema 1), sia nella direzione z (schema 2) con distanza pari allo spessore della barretta stessa (≈ 3 cm).

Per ciascuna direzione di misura sono state effettuate 10 registrazioni, al fine di diminuire l'influenza di possibili errori dovuto a scarso accoppiamento tra strumento e provino.

L'apparecchiatura utilizzata per lo svolgimento della prova (PunditLab, Proceq, in Figura 12) è costituita da un generatore d'impulsi e da due trasduttori, uno dei quali trasmette l'impulso (sorgente) e l'altro lo riceve (ricevente): le testine, a forma cilindrica, tarate a frequenza di 250 kHz sono state applicate sulle superfici del campione, le quali devono presentarsi parallele tra di loro, sufficientemente piane e lisce in modo da favorire l'accoppiamento testine - campione.



Figura 12 Strumentazione utilizzata per la misura della resistività elettrica (PunditLab®)

La trasmissione di energia tra il provino e ciascun trasduttore è stata migliorata utilizzando un sottile strato di un materiale di accoppiamento, il salicilato di fenile o una resina, e applicando una debole pressione al trasduttore per permettere una perfetta adesione tra il campione e le testine di misura.

La velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde S) è stata ricavata dal rapporto tra la lunghezza del campione e il tempo di propagazione dell'onda P o S.

La registrazione delle onde di compressione è ben definibile: leggendo il tempo di primo arrivo dell'onda t_1 nella traccia acquisita (a titolo esemplificativo è riportata la traccia ricavata da un campione cubico, Figura 13) e conoscendo la lunghezza del campione testato si è potuto calcolare la velocità di propagazione delle onde P, secondo la relazione:

$$\text{velocità di propagazione delle onde P} = \frac{\text{lunghezza del campione}}{\text{tempo di primo arrivo dell'onda } t_1}$$

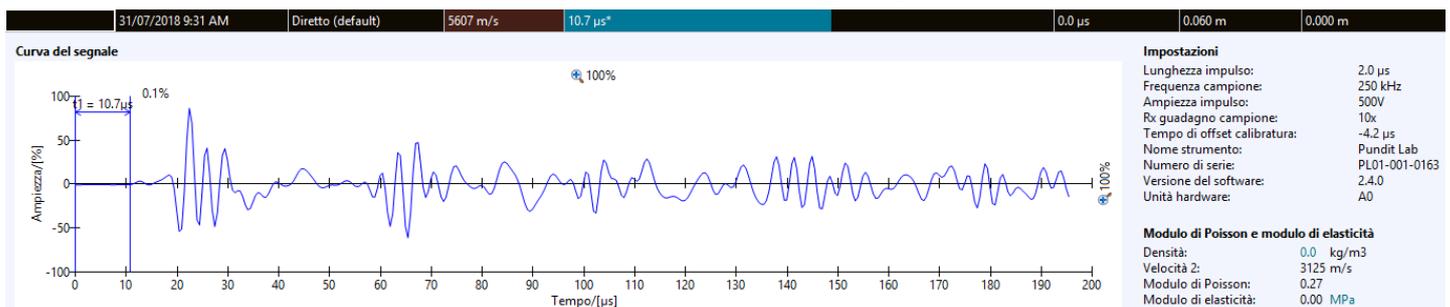


Figura 13 Esempio di traccia ampiezza-tempo:

acquisita con PunditLab Proceq su campione cubico, mostrante il tempo di primo arrivo dell'onda t_1 a 10,7µs.

La determinazione dell'arrivo delle onde di taglio, può essere più difficoltosa poiché potrebbe essere mascherata dalle vibrazioni dovute al “ringing” del trasduttore e dalla riflessione delle onde di compressione. Tuttavia le tracce analizzate hanno consentito un picking ben definito.

Analogamente alle onde P, rapportando il tempo di primo arrivo dell'onda S con la lunghezza del campione testato si è potuto calcolare la velocità di propagazione delle onde S.

Avendo determinato le velocità ultrasoniche V_P e V_S , si sono potute ricavare le costanti elastiche (modulo di taglio G , rapporto di Poisson ν e modulo elastico o di Young E), considerando il marmo oggetto del presente studio come un materiale omogeneo ed isotropo.

Il modulo di taglio G [GPa] è stato calcolato mediante la relazione empirica:

$$G = \rho V_S^2$$

in cui:

ρ = densità [g/cm³]

V = velocità di propagazione dell'impulso [m/s].

Il rapporto di Poisson ν [-] è stato ricavato attraverso il rapporto:

$$\nu = (V_P^2 - 2V_S^2) / [2(V_P^2 - V_S^2)]$$

in cui:

V_P = velocità di propagazione dell'onda P [m/s]

V_S = velocità di propagazione dell'onda S [m/s]

Infine il modulo elastico dinamico è derivato dai due parametri precedentemente ricavati, modulo di taglio G ed il rapporto di Poisson ν , tramite la relazione:

$$E_{din} = 2G(1 + \nu) = [\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)] / (V_P^2 - V_S^2)$$

È possibile che le costanti elastiche degli ultrasuoni possano differire da quelle determinate da altri metodi dinamici.

3.3 Prova di Flessione

La prova di flessione permette di determinare il modulo di Young e stimare la tensione di rottura di materiali fragili con comportamento lineare; tale tensione è indicata come tensione di rottura a flessione σ_{rf} .

In questo studio sono state utilizzate due metodologie di applicazione del carico. Una prima serie di prove è stata condotta sottoponendo i provini a tre punti di carico. In questo caso i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati al centro da un cuneo solidale alla traversa mobile della macchina. Una seconda serie di prove è stata condotta sottoponendo i provini a prove di flessione su quattro punti: in questo caso, il pistone spinge due cunei disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria del provino che rimane appoggiato simmetricamente su due appoggi inferiori.

Nel corso delle prove si misurano lo spostamento della traversa Y , coincidente con la freccia in mezzeria, e il carico applicato F .

Lo schema di carico a cui è soggetto il provino è tale da sollecitare a trazione il lembo inferiore compreso tra i due appoggi. Nella prova a tre punti di carico la sollecitazione a trazione risulta, da un punto di vista teorico, massima in mezzeria, mentre in quella a quattro punti è nominalmente costante nella parte centrale del lembo inferiore. Se il comportamento è elastico la tensione varia linearmente lungo lo spessore, lo snervamento viene raggiunto inizialmente solo in un sottile strato superficiale; superato il campo elastico, inoltre, gli spostamenti misurati non possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni e l'unica informazione utile è la forza a rottura F_r .

Le prove realizzate sui campioni prismatici rispettando le prescrizioni della normativa ASTM C880, quali:

- i provini devono essere prismatici con un rapporto luce/altezza compreso tra 3 e 4 e uno spessore minimo di 30 mm;
- la luce di prova deve essere minimo 5 volte lo spessore;
- le basi del provino devono essere lisce, con irregolarità non superiori a 0.01 mm;
- le superfici laterali del campione, lisce e prive di brusche irregolarità, devono risultare ad angolo retto con la parte superiore e inferiore.

Le prove sono state realizzate con presse MTS® servocontrollate oleodinamiche in dotazione del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino: la prima con schema statico su 4 appoggi e carico massimo 100 kN, la seconda con schema di castelletto a 3 con carico massimo tarato a 12,5 kN.

La struttura è composta da:

- una piastra inferiore, vincolata da un pistone che trasmette il carico, a cui erano collegati due supporti regolabili in larghezza e che una volta bloccati alla luce desiderata fungevano da supporti inferiori;
- una struttura superiore, fissa, a colonne e traversa che fungeva da vincolo superiore: nella prova di flessione a quattro punti, alla piastra circolare collegata alla traversa, in fase di azzeramento, per contrasto è stato applicato uno snodo con luce imposta pari a 50 mm;

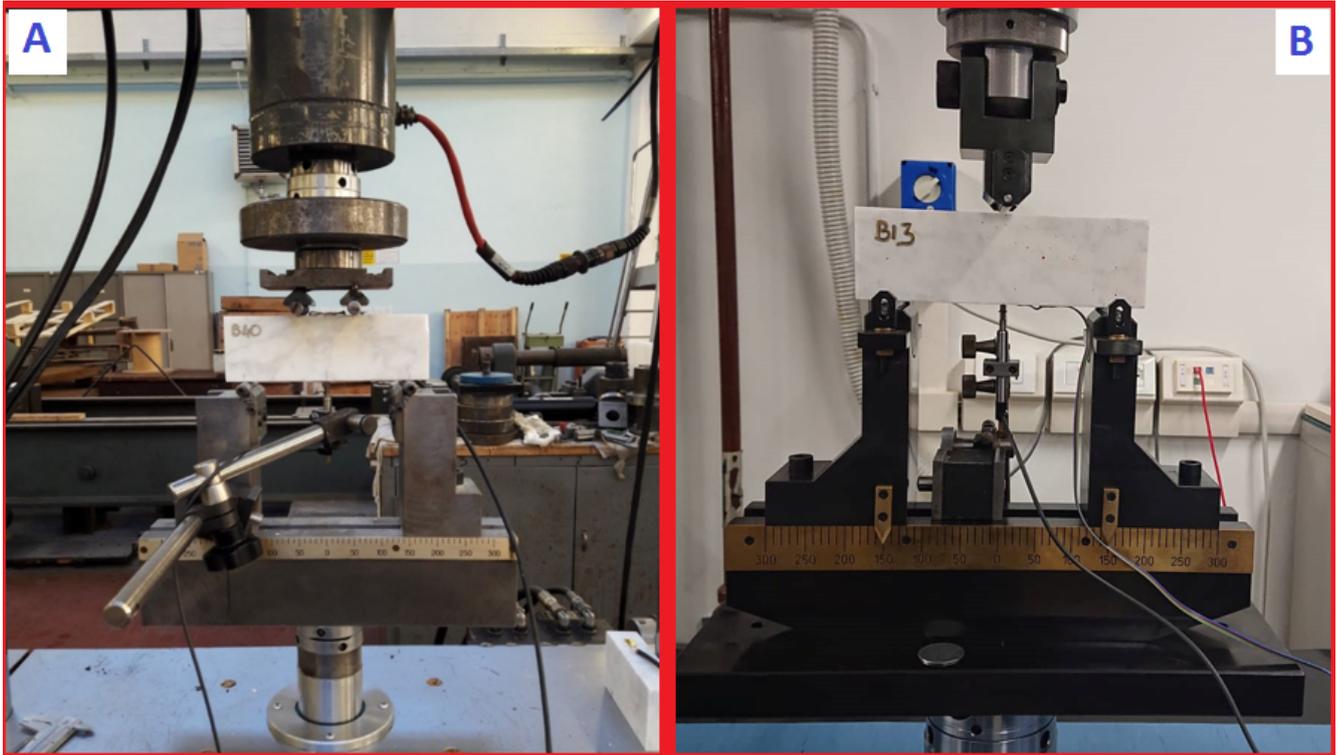


Figura 14 Alloggiamento provino su macchina servocontrollata per prove di flessione con schema statico a 4 punti (A) e 3 punti (B) eseguite presso il laboratorio del Politecnico di Torino. (2019)

Alla struttura è stato alloggiato un trasduttore di spostamento induttivo (LVDT), cioè un dispositivo elettrico che ha consentito la misura dell'inflessione (freccia) in mezzzeria del provino.

Inoltre, era presente una stazione di comando, controllo, misura, acquisizione ed allarmi costituita sostanzialmente da un computer collegato con la pressa.

A ciascun campione è stato accoppiato, a estradosso (nel caso dello snodo) e ad intradosso (nel castelletto a 3 punti), uno Strain Gauge (estensimetro tipo 10/120 LY41, resistenza $120 \Omega \pm 0.3 \%$, fattore k $2.06 \pm 1 \%$, sensibilità trasversale $- 0.3 \%$) mediante incollaggio.



Figura 15 Figura 15 Accoppiamento provini- estensimetri:

Processo di incollaggio sui campioni e successiva e saldatura ai cavi per la trasmissione dei dati acquisiti all'elaboratore (Politecnico di Torino, 2019)

I provini sono stati quindi posti tra i vincoli della pressa e progressivamente è stata applicata una forza assiale agente nella direzione perpendicolare alle piastre stesse fino a giungere a rottura del provino (*Figura 16 B*).

La prova è stata condotta in condizioni di controllo di spostamento, applicando una velocità del pistone pari a 0,001 mm/s e misurando il carico assiale applicato. Questa velocità di avanzamento ha permesso di portare a rottura i provini in circa 10 minuti (tempo medio).

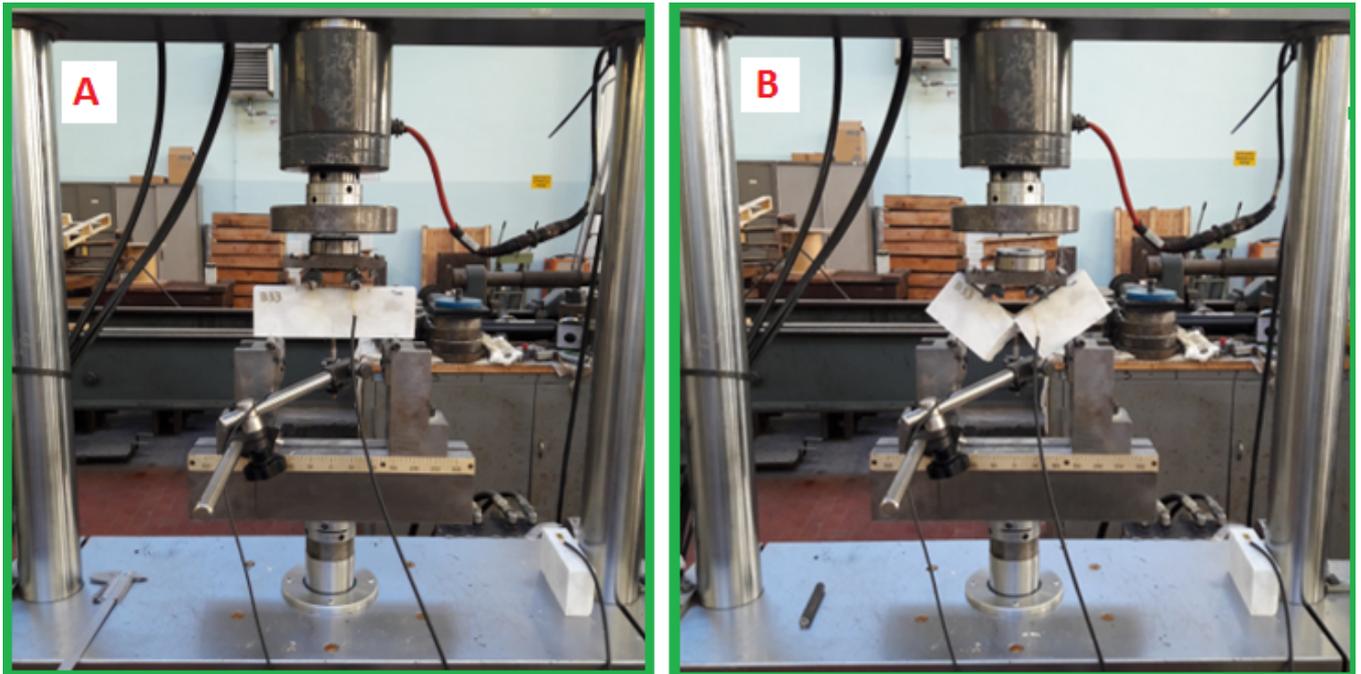


Figura 16 Campione preparato per la prova di flessione a 4 punti, attrezzato con estensimetro ad estradosso, e trasduttore LDVT alloggiato sul macchinario (figura A).

Applicando sul provino una forza assiale progressivamente crescente si è arrivati alla conclusione della prova, determinando la rottura del provino (Figura B).

Come visibile in *Figura 17*, in seguito all'applicazione del carico crescente, si sviluppano delle deformazioni che portano a rottura il campione: le coppie di valori carico - deformazione del provino registrate durante lo svolgimento della prova, sono rappresentabili con delle curve $\sigma - \epsilon$ ottenute per ciascuno dei campioni testati:

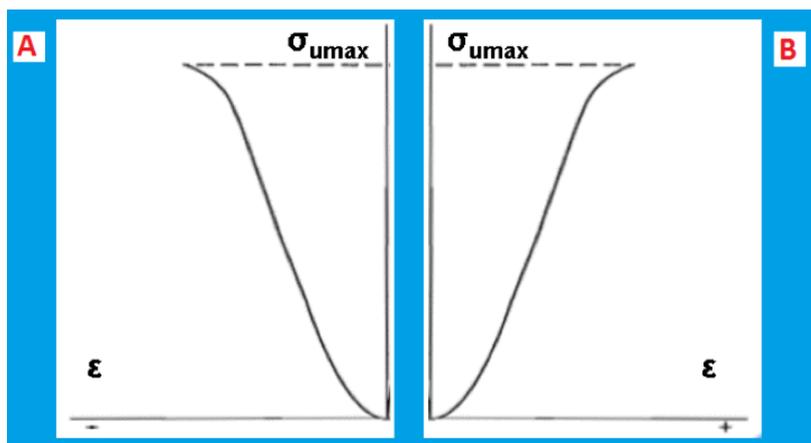


Figura 17 Diagramma tensioni - deformazioni.

Nella flessione a 4 punti, avendo l'estensimetro posto ad estradosso del provino le deformazioni registrate erano di compressione (Figura A); nella flessione a 3 punti, l'estensimetro posto ad intradosso ha registrato le deformazioni di trazione (Figura B).

Queste curve, mostrano un andamento non lineare a bassi e alti livelli di tensione e rappresentano il comportamento tipico dei materiali rocciosi a partire dal valore nullo della tensione fino alla resistenza ultima σ_{umax} .

La deformazione assiale ϵ , registrata dall'estensimetro, è valutata rapportando la variazione della lunghezza assiale Δl con la lunghezza assiale iniziale dello stesso l_0 secondo l'espressione $\epsilon_A = \Delta l / l_0$.

Il modulo elastico o di Young E rappresenta il rapporto fra la variazione di tensione assiale $\Delta\sigma$ e la variazione di deformazione assiale $\Delta\epsilon$:

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

Il modulo di Young secante E_S è calcolabile, in accordo alle raccomandazioni AGI (1994), considerando un intervallo compreso tra la tensione nulla e una percentuale prefissata di resistenza ultima, generalmente al 50% (Figura 18).

$$E_S = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

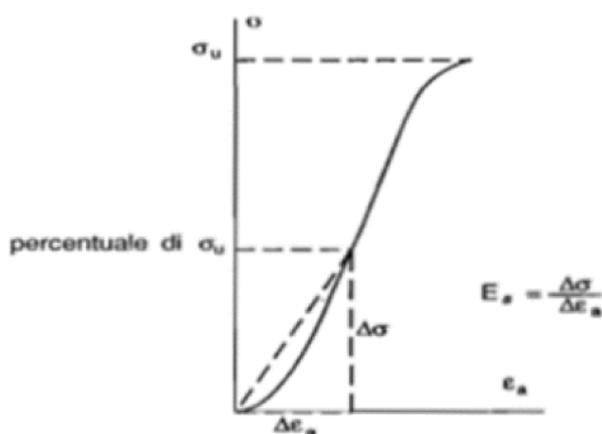


Figura 18 Calcolo del modulo di Young secante partendo dalla curva tensione - deformazione.

Al fine di massimizzare il meccanismo di rottura per flessione retta in mezzeria del provino, come previsto dalla prova, è possibile schematizzare gli schemi di carico come segue:

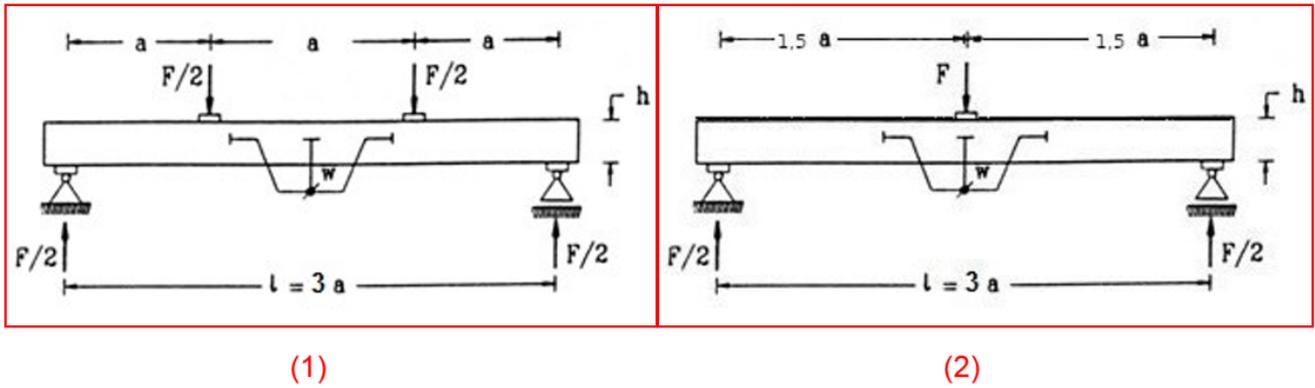


Figura 19 Schema di carico della prova a flessione su 4 punti; (2) Schema castelletto per prova a flessione su 3 punti.

La geometria del provino (Figura 19) è descritta dai seguenti parametri:

- l = lunghezza utile (la parte tra gli appoggi): 150 mm,
- h = altezza della sezione: 60 mm,
- a = interasse dei vincoli del sistema: 50 mm,
- b = larghezza della sezione 30 mm.
- w = freccia misurata nella mezzeria della sezione tramite LVDT [mm].

Ipotizzando in mezzeria del provino una distribuzione lineare “a farfalla” delle tensioni, in ipotesi di flessione retta si ha:

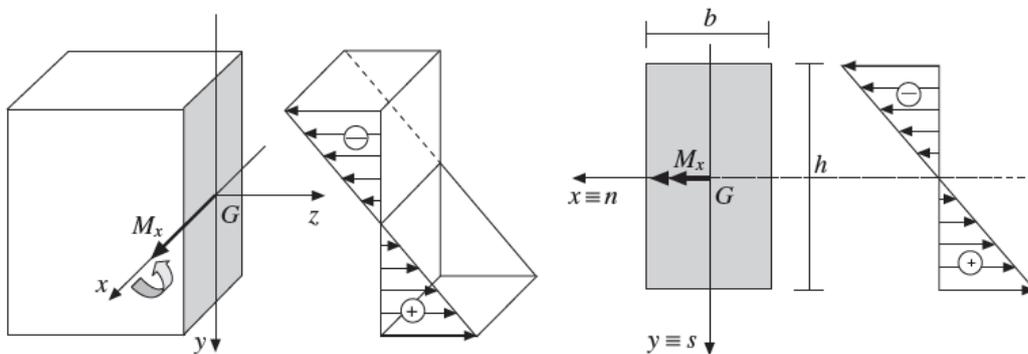


Figura 20 Stato di stress (ipotizzato) del provino in corrispondenza della mezzeria, prima del raggiungimento della rottura.

Le tensioni massime di trazione si avranno al lembo inferiore ($x = l/2, y = h/2$), quelle massime di compressione al lembo superiore ($x = l/2, y = -h/2$). Analiticamente è verificabile che, nello schema statico a 3 punti, a parità di momento flettente massimo raggiunto in mezzeria, rispetto allo schema su 4 punti, lo sforzo assiale necessario per portare a rottura il campione diminuisce:

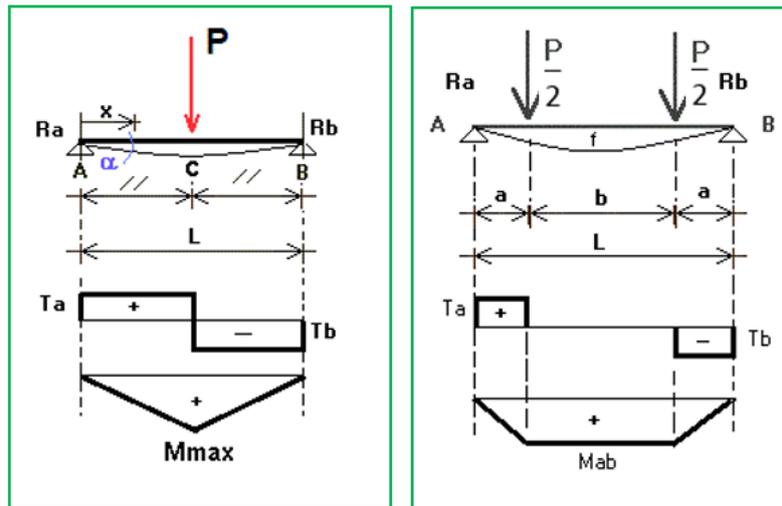


Figura 21 Diagrammi di taglio e momento sollecitante in ipotesi di elasticità lineare.

Infatti:

$$M_{max} = \frac{P * L}{4} \quad \text{mentre} \quad M_{ab} = \frac{P'}{2} * a$$

e per inversione:

$$P = \frac{M_{max} * 4}{L} \quad \text{mentre} \quad P' = \frac{M_{ab} * 2}{a}$$

Come detto in precedenza, noto il valore del carico di rottura P_r , è possibile stimare il valore della tensione di rottura a flessione del materiale tramite la relazione:

$$\sigma_t = \sigma_c = \frac{M_{max}}{W} = \frac{\frac{Pa}{2}}{\frac{bh^3}{12} * \frac{2}{h}} = \frac{3Pa}{bh^2}$$

Avendo posto:

$$P_r = \frac{P}{2} \quad \text{nella prova a flessione su 4 punti mentre nel castelletto a 3 punti } P_r = P,$$

noto che il momento d'inerzia di un rettangolo vale $J = \frac{bh^3}{12}$,

e indicato con W il modulo resistente.

Tra le metodologie di acquisizione del sistema di prova, servendosi di un LVDT (trasduttore di spostamento lineare a contatto), è stato possibile stimare l'inflessione del provino valutandone la freccia (f), ossia lo scostamento massimo dalla geometria non deformata di una trave soggetta a flessione, misurata perpendicolarmente al piano degli appoggi in mezziera del provino.

Durante l'esecuzione della prova per il sistema di acquisizione a 6 canali ha registrato ogni 40 ms:

- Canale 1: Scansione temporale della prova
- Canale 2: Carico applicato alla pressa secondo la scansione temporale
- Canale 3: Corsa del pistone del macchinario, utile per l'azzeramento della freccia

- Canale 4: Valori registrati dall'estensimetro
- Canale 5: Valore della freccia registrato dall'LVDT
- Canale 6: Temperatura a cui è svolta la prova.

Tabella 4 Risultato dell'acquisizione del sistema di controllo.

Time 1 - default sample rate	carico	corsa	estensimetro	freccia	temperatura	Parametri
s	kN	mm	$\mu\text{m/m}$	mm	$^{\circ}\text{C}$	Unità di misura
23/01/2019-11:59	23/01/2019-11:59	23/01/2019-11:59	23/01/2019-11:59	23/01/2019-11:59	23/01/2019-11:59	Data avvio
T0 =19/01/23 11:45:44	T0 =19/01/23 11:45:44	T0 =19/01/23 11:45:44	T0 =19/01/23 11:45:44	T0 =19/01/23 11:45:44	T0 =19/01/23 11:45:44	Tempo Avvio
dt =40 ms	dt =40 ms	dt =40 ms	dt =40 ms	dt =40 ms	dt =40 ms	Intervallo
CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5	CH 6	Canale
0,4 s	0,004 kN	0,004 mm	0.3 %	3E-7 mm	0.5 $^{\circ}\text{C}$	Fondo scala

I parametri riportati sotto le rispettive colonne, azzerati al punto di inizio di registrazione del carico di ciascuna prova, saranno utili per riportare su opportuni diagrammi i risultati in termini di risposta meccanica da comparare a quelli ottenuti tramite onde ultrasoniche.

A tale prova si affianca una tecnica fotogrammetrica (DIC) descritta di seguito.

3.4 Metodologia di esecuzione della tecnica DIC

Come anticipato nella descrizione teorica della tecnica DIC, la risoluzione (e conseguentemente dalla tessitura del materiale) influenza in larga parte la computazione del programma.

L'esecuzione della tecnica ha quindi richiesto una preparazione dei campioni prismatici al fine di migliorarne la corrispondenza delle matrici di punti (pixels) tra fotogrammi successivi: le facce dei provini oggetto dell'acquisizione sono state irrorate con una leggera patina di vernice spray, tale da creare una puntinatura superficiale.

Prima dell'avvio della prova di flessione, una fotocamera Nikon D800 (calibrata con frame rate: 24 frame / s, risoluzione: 1920x1080 pixels, lunghezza focale: 50 mm) è stata agganciata su un cavalletto fotografico frontalmente alla faccia del campione, con lo scopo di registrarne la deformazione fino a rottura del provino (vedi *Figura 21*).

Nei primi test eseguiti, l'acquisizione è avvenuta mediante video avviato in contemporanea all'inizio del test. Avendo notato come la risoluzione non elevata delle immagini estratte portasse a risultati dell'elaborazione DIC molto rumorosi, nei successivi test si è invece impostata una cattura immagini automatica (ogni 10 secondi) grazie a cui è stato possibile migliorare la computazione.

Acquisendo un fotogramma ogni 10 secondi si sarebbe perso l'istante di rottura che, tuttavia, per i fini della nostra computazione non risulta di fondamentale importanza. Infatti il software nella computazione, per valori di spostamento elevati, genera errori a video.



Figura 22 Modalità di acquisizione della prova con fotogrammetria (2019)

3.5 Computazione con Ncorr®

Per sviluppare l'analisi dei fotogrammi è stato utilizzato Ncorr®, un pacchetto DIC 2D implementato in MATLAB®, in cui il risultato è una griglia con i dati di spostamento e di deformazione di ciascun sottoinsieme per ciascuna immagine analizzata rispetto all'immagine di riferimento.

In Ncorr®, per ciascun campione, è stato necessario stabilire la sequenza dei fotogrammi e il loro tempo di acquisizione al fine di correlarli ai dati ottenuti dalla prova di flessione.

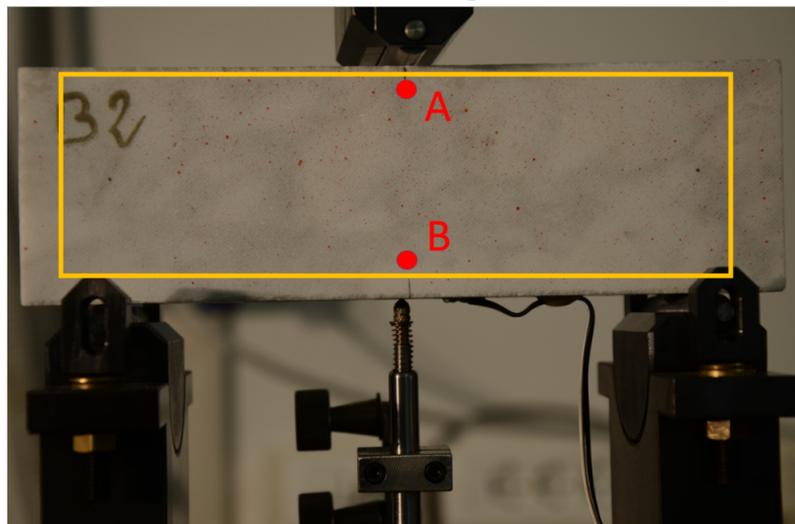


Figura 23 Maschera Ncorr®

In Giallo: Creazione della maschera in cui il software misura gli spostamenti tra fotogrammi successivi. In Rosso: punti di cui si richiede lo spostamento.

Per minimizzare il rumore e la durata della computazione del software tra fotogrammi successivi, l'elaborazione ha previsto la creazione di una maschera con posizione fissa in ogni scatto contenente esclusivamente il provino come mostrato in Figura 23.

Volendo ottenere le curve di tensione - deformazione è stato necessario stabilire le coordinate dei pixels che si volevano analizzare: si è scelto di valutare due punti in mezzeria del provino, uno in corrispondenza dell'estensimetro (A) e l'altro simmetrico rispetto all'orizzontale (B).

Il punto A è stato scelto per verificare se le deformazioni ottenute erano paragonabili a quelle rilevate dall'estensimetro, mentre il punto B è stato scelto per verificare se l'ipotesi di distribuzione lineare "a farfalla" delle tensioni risultava verificata.

Come presentato in Figura XY, il risultato mostra una immagine e due curve:

- la prima è il risultato grafico della computazione. Gli assi dell'immagine sono in pixels e affianco è presente la scala cromatica degli spostamenti ottenuti. La zona blu raffigura l'area esterna alla maschera che quindi non registra dati di deformazione. L'area interna indica la sommatoria dei dati di deformazione e in questo caso è ben evidente l'area bordò in cui è avvenuta la frattura.
- Le due curve rappresentano l'andamento di tensione – deformazione dei punti analizzati: in nero è presentata la curva registrata dell'estensimetro mentre in violetto è presentato il risultato numerico dell'elaborazione. Seppur con notevoli incertezze, è visibile un andamento qualitativo della deformazione in B mentre nel punto A si riscontra una controtendenza di deformazione come da ipotesi.

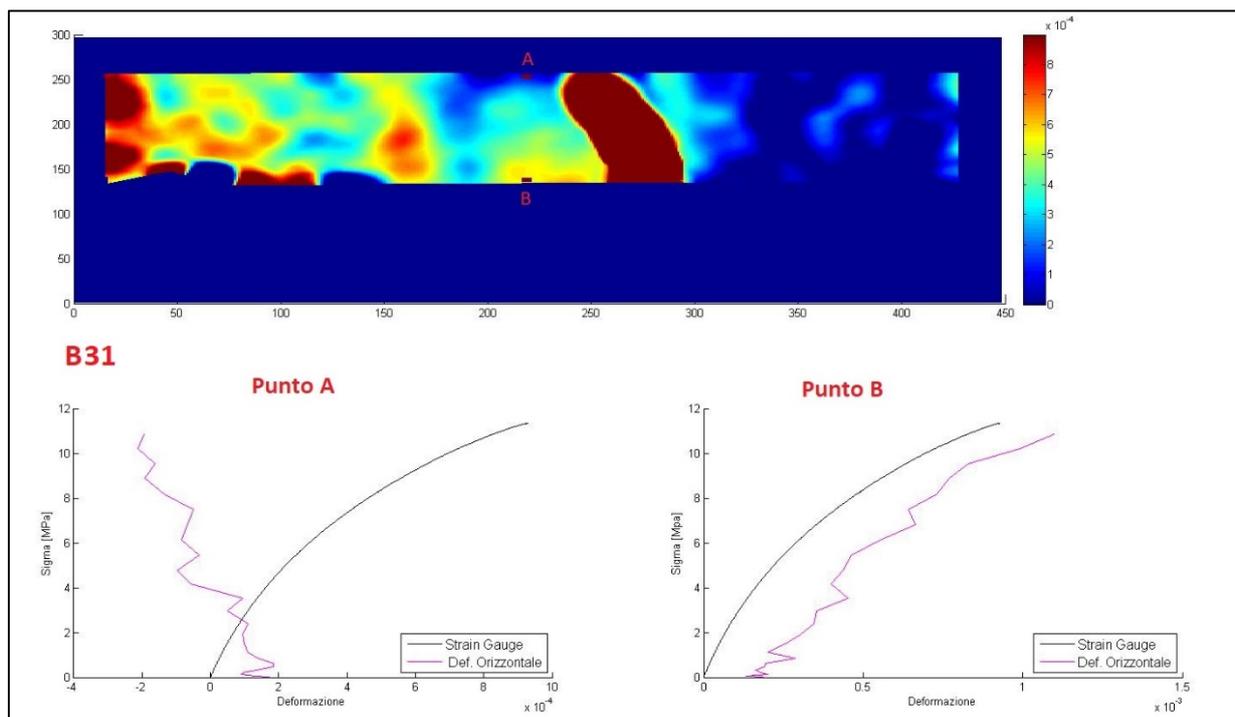


Figura 24 Grafici ottenuti dall'analisi con DIC

3.6 Sensitivity Analysis

Nell'ambito dell'analisi con DIC è stato necessario effettuare un'analisi di sensibilità (SA), misura tipica per quantificare l'impatto dell'incertezza dei parametri sull'incertezza complessiva della simulazione (o previsione). La SA è il passo fondamentale prima della calibrazione e tenta di fornire una misura della sensibilità dei parametri di maggiore interesse nel modello.

In accordo al manuale del programma, per la calibrazione dei parametri di Ncorr®, al fine di diminuire la presenza del rumore i parametri che necessitano di iterazione sono sostanzialmente 3:

- Subset Radius (1), Subset Spacing(2): pre-computazione, queste due opzioni sono i componenti principali dell'analisi DIC. Dettano rispettivamente quanto dovrebbero essere grandi i sottoinsiemi e la spaziatura tra i pixel considerati all'interno del sottoinsieme stesso. Il componente di spaziatura è puramente per ridurre il carico computazionale. L'opzione più importante è il raggio.
- Strain Radius(3): post-computazione, è il raggio di un cerchio che costituisce la finestra di calcolo nell'algoritmo di definizione della deformazione. Dovrebbe contenere un gruppo di punti i cui valori di deformazione possano adattarsi a un piano.

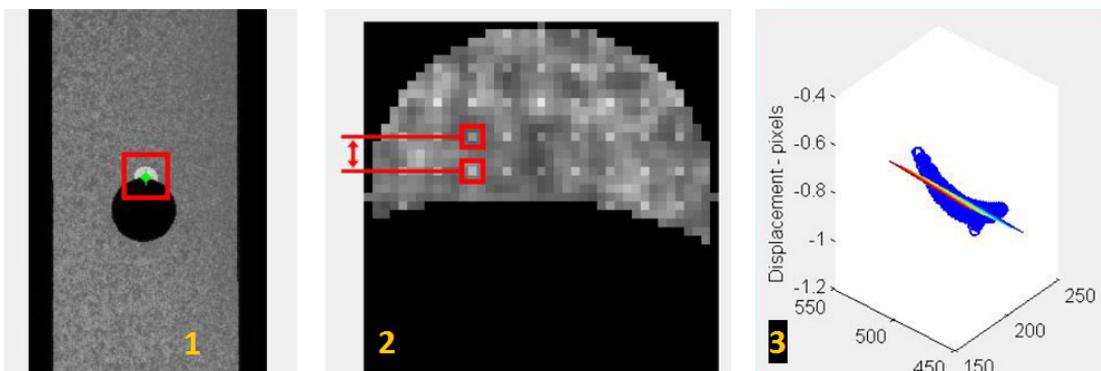


Figura 25 Calibrazione dei parametri: 1: Subset Radius, 2: Subset Spacing, 3: Strain Radius. (Ncorr®)

I parametri, difficili da determinare a priori, vengono calibrati utilizzando prima un intervallo di valori minimo o massimo del software con l'obiettivo di avere sottoinsieme (e raggio) più piccoli possibili, tali da generare il minor rumore nei risultati. Nel nostro caso, dopo ripetute computazioni, è stato adottato il seguente settaggio:

- Subset Radius (20÷43): 43
- Subset Spacing (3÷10): 3
- Strain Radius (5÷50): 15.

4 PROCESSI DI INVECCHIAMENTO DEL MATERIALE

In questo capitolo vengono illustrati i processi utilizzati per il trattamento superficiale a cui sono stati sottoposti parte dei campioni presi in analisi. Prima del trattamento termico, sono state misurate tutte le proprietà fisiche e meccaniche con lo scopo di fornire una base di confronto per la valutazione dell'eventuale cambiamento di queste proprietà in seguito al riscaldamento. L'obiettivo è la valutazione del degrado dei provini in base al condizionamento imposto: le procedure utilizzate sono suddivisibili in trattamento termico (TT) e trattamento termico e chimico (TTC).

4.1 Invecchiamento Termico

Questo processo ha visto la suddivisione dei campioni selezionati in due gruppi, ognuno dei quali ha seguito uno stesso ciclo di trattamento termico per giungere alle temperature di riferimento prefissate, ossia, 50° C (T50) e 90° C (T90).



Figura 26 Alloggiamento provini nel forno per riscaldamento a 50/90°C

È stato deciso non fossero necessari trattamenti a temperature superiori poiché difficilmente raggiungibili (se non in caso di incendio) a livello ambientale.

Ogni ciclo termico è stato costituito da tre fasi (Figura 27): in un primo momento i campioni sono stati posti in forno con una bassa velocità di riscaldamento pari a 0,06° C / s. Successivamente, raggiunta la temperatura desiderata (50° C – 90° C), i campioni sono stati tenuti in forno per 60 ore e, infine, sono stati raffreddati mantenendoli all'interno del forno stesso per 20 ore fino al raggiungimento della temperatura ambiente per preservarli da possibili shock termici.

Al fine di descrivere la procedura si è assunto un decadimento della temperatura con legge esponenziale.

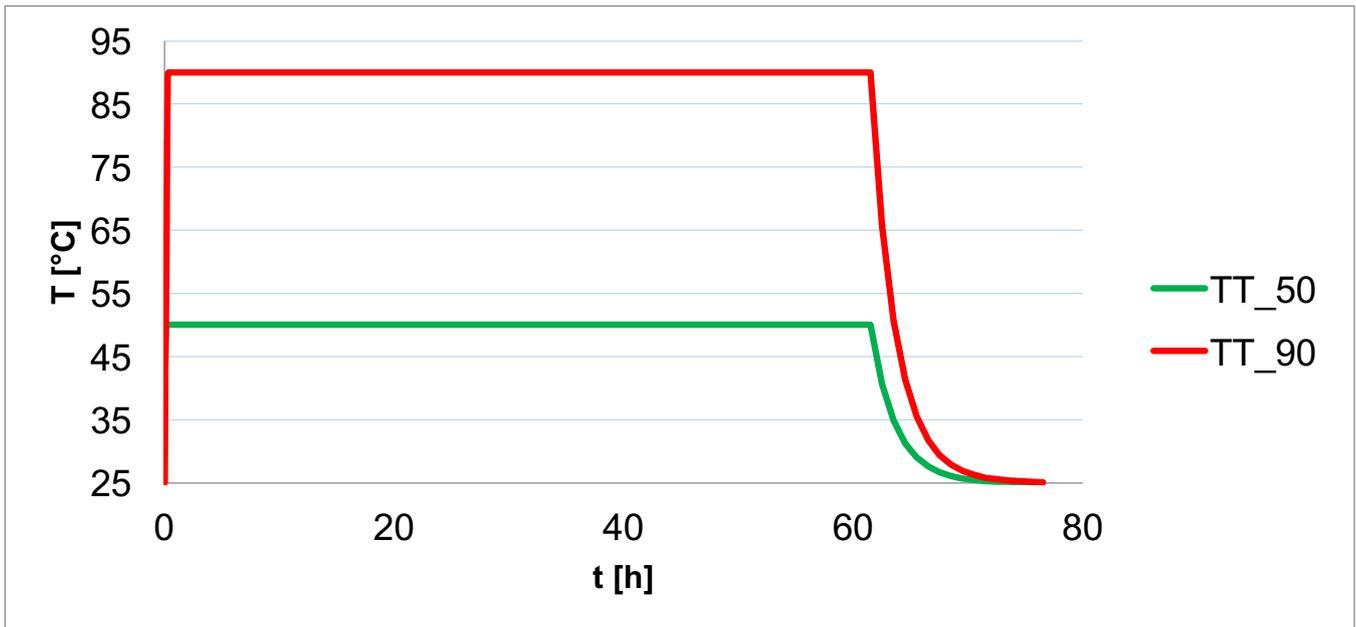


Figura 27 Grafico temperatura-tempo:

Raffigura gli step di riscaldamento a diverse temperature subito dai diversi campioni; Per ciascuna curva: nel primo tratto è rappresentato il riscaldamento partendo da temperatura ambiente fino a raggiungere la temperatura desiderata (50° C – 90° C); nel secondo tratto, una volta raggiunta il valore di temperatura prefissato, questa rimane costante e infine nell'ultimo tratto, la temperatura decresce gradualmente fino a raggiungere temperatura ambiente.

In seguito al processo di raffreddamento sono state nuovamente eseguite le prove fisiche e meccaniche di laboratorio.

Si osserva che, successivamente al trattamento, non risultano visive modificazioni dei provini.

4.2 Invecchiamento Termochimico

L'obiettivo di questo trattamento è la simulazione del degrado prodotto dalle piogge acide sui campioni di marmo, in combinazione ad un gradiente termico imposto. Questa sperimentazione viene fatta per comprendere se sussistono differenze sostanziali tra campioni alterati termicamente e campioni alterati termicamente e chimicamente. Inoltre può essere utile per comprendere se la temperatura funge da veicolo per una maggior diffusione della soluzione all'interno del campione, con conseguente aggravio delle proprietà meccaniche.

Questo processo ha visto la suddivisione dei campioni selezionati in due gruppi, ognuno dei quali ha seguito uno stesso ciclo di trattamento termico e chimico in bagno termostatico per giungere alle temperature di riferimento prefissate, ossia, 50° C e 90° C.

I bagni termostatici sono costituiti da vasche in acciaio inox, contenenti acqua termostata, isolate dall'ambiente esterno. I recipienti da riscaldare vengono immersi nel bagno il quale presenta il grande vantaggio di raggiungere rapidamente (e mantenere) la temperatura impostata.

La valutazione del meccanismo di aggressione chimica da adottare per il trattamento ha richiesto una ricerca bibliografica di studi effettuati da altri autori su campioni di marmo.

Il risultato viene brevemente schematizzato in Tabella 5:

Tabella 5 Ricerca bibliografica su concentrazioni e metodologie di aggressione del marmo.

Pubblicazione	Autori	Anno	Soluzioni Utilizzate	Concentrazioni	Modalità di esecuzione della prova
<i>Laboratory experiments on the investigation of the effects of sulphuric acid on the deterioration of carbonate stones and surface corrosion</i>	Lokman	1999	<ul style="list-style-type: none"> • Acido solforico • Idrossido di sodio • Acqua distillata 	[pH corretto a 4,5 usando NaOH]	Campioni di pietre prelevati dagli edifici storici sono stati rotti e setacciati per ottenere un diametro di 2-4 mm di campioni con forme non sferiche. Questa procedura è stata eseguita per avere materiale con un elevato rapporto superficie / volume. Successivamente, i campioni sono stati essiccati a 105°C per 24 ore e pesati, quindi collocati in uno speciale apparecchio in PVC e lavati per 5 giorni con H ₂ SO ₄ (pH = 4,5) paragonabile alle piogge acide (a Sivas, Turchia). La portata volumetrica della soluzione era di 6 cm ³ /min utilizzando una pompa peristaltica. L'aggiunta di H ₂ SO ₄ è stata calibrata ogni 4 ore in funzione del pH. Dopo il lavaggio con acido per cinque giorni, i campioni sono stati essiccati a 105 ° C per 24 ore e pesati per misurare la perdita di materiale.
<i>Effect of PH on the physico-mechanical properties of marble</i>	Singh et al.	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Acido cloridrico • Cloruro di potassio • Ftalato di idrogeno di potassio • Fosfato di potassio monobasico • Idrossido di sodio • Tetraborato di sodio • Acqua distillata 	<ul style="list-style-type: none"> •(pH=2) 11.90 ml of 0.2 M hydrochloric acid + 88.10 ml of 0.2 M potassium chloride, and dilute to 200 ml with water •(pH=4) 10.21 g of potassium hydrogen phthalate + 1 mL of 0.10 M HCl and dilute to 1 L with distilled water •(pH=6) 6.81 g of potassium phosphate monobasic + 56 mL of 0.10 M NaOH and dilute to 1 L with distilled water •(pH=7) 6.81 g of potassium phosphate monobasic + 291 mL of 0.10 M NaOH and dilute to 1 L with distilled water •(pH=8) 6.81 g of potassium phosphate monobasic + 467 mL of 0.10 M NaOH and dilute to 1 L with distilled water •(pH=10) 4.77 g of sodium tetraborate + 183 mL of 0.10 M NaOH and dilute to 1 L with distilled water •(pH=11) 2.10 g of sodium bicarbonate + 227 mL of 0.10 M NaOH and dilute to 1 L with distilled water 	<p>I nuclei cilindrici (NX) sono stati preparati e le estremità tagliate come richiesto dall'ISRM (1981). I campioni sono stati essiccati a 105°C per 24 ore e successivamente immersi lentamente in acqua con valori di pH diversi (da 0,89 a 12) per 15 ore fino a quando si è ipotizzato che avessero raggiunto la saturazione completa a temperatura ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se il pH è troppo alto, viene regolato sul valore corretto aggiungendo 1 M di HCl, sotto agitazione. • Se il pH è troppo basso, viene regolato sul valore corretto aggiungendo 1 M NaOH, con agitazione.
<i>Effect of different types of acid rain on carbonate stone</i>	Feigao et al.	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Acido solforico • Acido nitrico • Acidi Misto • Acqua distillata 	<p>[tutte le soluzioni con pH corretto a due valori: 4 e 5.6]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acido solforico (6mL*min-1) • Acido solforico (12mL*min-1) • Acido nitrico (6mL*min-1) • Acido nitrico (12mL*min-1) • Acido Misto (6mL*min-1) [% n.s.] • Acido Misto (12mL*min-1) [% n.s.] 	I campioni sono stati posizionati con un angolo di 45° in un imbuto di vetro. La velocità di flusso volumetrica della soluzione è stata calibrata (parametro fondamentale). I campioni di pietra sono stati spostati ogni 10 minuti al fine di spruzzare uniformemente la soluzione acida sull'intera superficie disponibile dei campioni. La quantità totale di volume di soluzione per ciascun getto era di 1000 ml, quindi i campioni furono essiccati nell'aria a temperatura ambiente per un giorno. Gli effetti delle piogge acide sono stati accelerati mediante cicli di wet-ting e di asciugatura. Ciascuna spruzzatura è stata formulata mediante una nuova soluzione di acido solforico, acido nitrico e una soluzione di acido misti i cui valori di pH erano tutti 4.0. L'irrorazione periodica è stata ripetuta 10
<i>Simulation of acid rain weathering effect on natural and artificial carbonate stones</i>	Eyssautier et al.	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Acido solforico (5E-6 mol L-1) • Acido nitrico (1E-5 mol L-1) • Acqua distillata 	<p>[tutte le soluzioni con pH corretto a 5]</p> <ul style="list-style-type: none"> • SPI: sulphuric passive immersion (1 L of sulphuric acid solution, 5 10-6 mol L-1, without agitation). • SAI: sulphuric active immersion (1 L of sulphuric acid solution, 5 10-6 mol L-1, with agitation). • NPI: nitric passive immersion (1 L of nitric acid solution, 10-5 mol L-1, without agitation). • NAI: nitric passive immersion (1 L of nitric acid solution, 10-5 mol L-1, with agitation). 	I campioni erano lastre 5x5x1 [cm], alloggiati in un contenitore chiuso di 4 L di volume. Per ciascuna soluzione si sono effettuati due test con 3 lastre. Test 1: immersione passiva dei campioni al fine di valutare la dissoluzione delle pietre a contatto con la soluzione. Test 2: immersione dei campioni collocati in uno shaker meccanico per simulare la pioggia battente (immersione attiva). Le sperimentazioni sono state condotte per 32 giorni inclusi cinque cicli di immersione e le successive fasi di essiccazione. La deriva della soluzione di pH dovuta alla reazione tra le pietre di carbonato e le soluzioni acide implicava un aggiustamento del pH due volte al giorno fino a raggiungimento pH = 5. La fase di essiccazione era simile per tutti i cicli e eseguita per 64 ore in un forno a 45°C.

Al fine di simulare il degrado ambientale dovuto alle piogge acide, si è scelto di optare per una soluzione contenente acido solforico (H₂SO₄). In analogia allo studio di Eyssautier et al. (2016) è stata utilizzata la concentrazione indicata nel caso studio (5E⁻⁶ mol/L): questa pubblicazione ha incentrato l'attenzione su differenti soluzioni e differenti metodologie. Queste ultime sono sintetizzabili in una attiva (shaker meccanico) e una passiva (immersione), ed il test ha riscontrato che lo shaker meccanico produce un maggior degrado delle proprietà meccaniche dovuto alla miglior capacità di penetrazione della soluzione nelle porosità dei campioni.

Non disponendo di tale strumentazione, per quanto concerne la sperimentazione di questo lavoro di tesi, due campioni per volta sono stati alloggiati in un contenitore (*Figura 28*) di plexiglass creato appositamente, sospesi su elementi cilindrici in plastica atti a creare uno spazio tra provino e fondo scatola per consentire il passaggio del liquido.

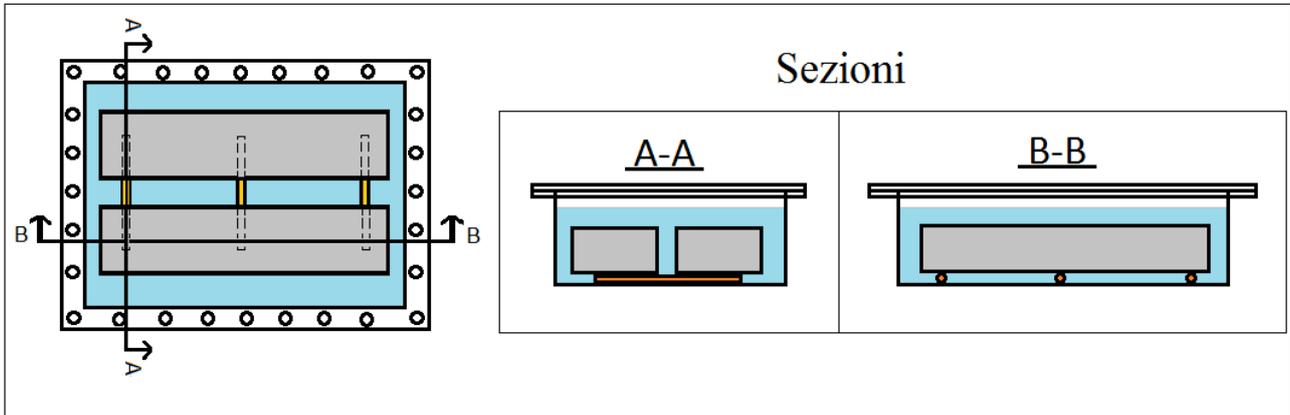


Figura 28 Prospetto dall'alto della scatola a tenuta stagna e relative sezioni orizzontali.

In grigio sono indicate le barrette poste nella soluzione (in azzurro) sospese dalla scatola grazie ad elementi plastici (in arancione).

Nota la capacità del contenitore pari a $2,00E+06 \text{ mm}^3$, è stato riempito con circa 1,25 L di soluzione contenente l'acido solforico nella concentrazione indicata, tale da ricoprire totalmente i campioni e lasciare tuttavia uno spazio vuoto ($3,9E+05 \text{ mm}^3$) adibito all'ossigeno. Questo poiché l'acido solforico per combinarsi con la calcite e produrre il solfato di calcio (gesso) necessita di apporto di ossigeno. Inoltre, a reazione avvenuta, si sprigiona anidride carbonica che potrebbe generare sovrappressioni e inficiare sulla tenuta stagna del recipiente. Successivamente è stato fissato il coperchio superiore con bullonatura, onde evitare perdite e/o contaminazioni, e la scatola a tenuta stagna è stata immersa nel bagno termostatico a cui era già imposta la temperatura di target:

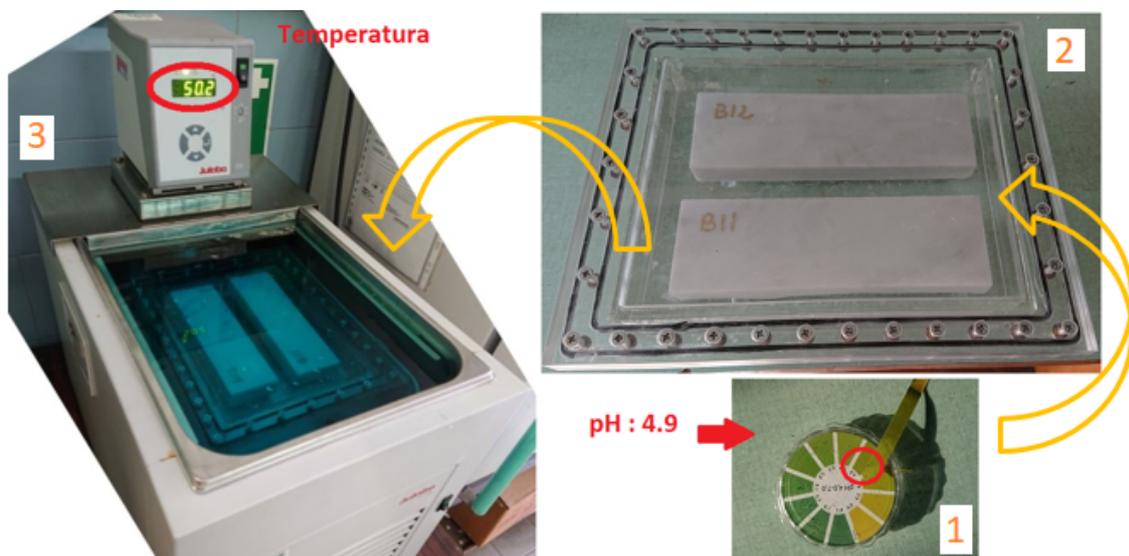


Figura 29 Preparazione al trattamento chimico sul marmo in bagno termostatico a 50°C. (2019):

Dopo aver realizzato la soluzione, nella concentrazione desiderata, è stato verificato il PH con una cartina tornasole (Fig. 1). I campioni sono quindi stati immersi nella scatola a tenuta stagna (Fig. 2) e posti in bagno termostatico alla temperatura imposta (Fig. 3). Identica procedura è stata applicata per il campione con temperatura imposta a 90°C.

La durata del trattamento di ciascuna coppia di provini è stata stabilita in 120 h: la scatola è stata aperta ogni 36 e 72 h per verificare anomalie e aggiungere piccoli quantitativi di soluzione poiché, col progredire del tempo e della reazione con il carbonato, la soluzione diminuiva il suo grado di acidità. Si è voluto mantenere il valore del PH prossimo a quello imposto inizialmente (ossia 4.9) per evitare che la reazione rallentasse il suo processo e diventasse neutra, rendendo di fatto nullo il suo effetto sulle barrette di marmo.

A fine trattamento non sussistono variazioni geometriche del campione nei campioni analizzati, tuttavia successivamente la sua rimozione dalla soluzione, la barretta presenta una tessitura superficiale meno definita poiché un sottile strato di gesso (una frazione di millimetro) si è formato in superficie, risultato del processo ossidativo della reazione.



Figura 30 Immagine di una faccia del provino B6 successivamente il trattamento chimico.

La superficie risulta meno lucida ed è possibile intravedere leggermente le striature della direzione di segazione del provino, dove il deposito di gesso risulta più evidente.

Ad ulteriore conferma dell'avvenuta reazione, nell'ultimo ciclo di trattamento, si è potuto osservare l'effetto della sovrappressione generata sul contenitore (Figura 31). Tuttavia, ciò non ha inficiato sulla tenuta stagna dello stesso.



Figura 31 Incurvatura della superficie inferiore del contenitore, dovuta alle sovrappressioni generate dal prodotto della reazione.

5 CAMPAGNA SPERIMENTALE

La caratterizzazione dei campioni di marmo, come asserito nei capitoli precedenti, ha previsto una serie di analisi che hanno preceduto la loro rottura mediante prova di flessione.

Riportando il diagramma di flusso del lavoro di tesi, si procede a fornire i risultati ottenuti dalle diverse sperimentazioni nell'ordine in cui sono stati acquisiti.

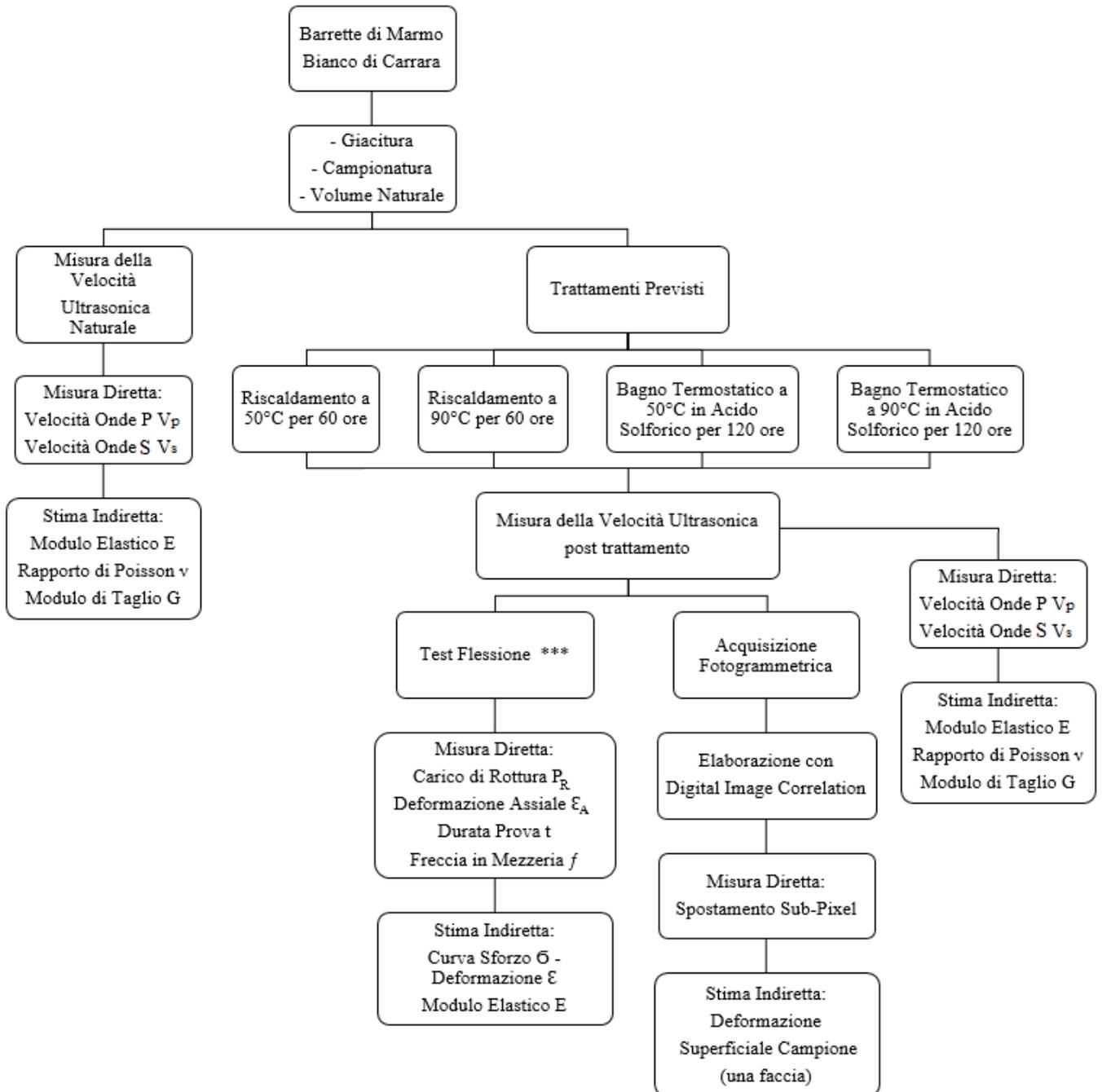


Figura 32 Diagramma di flusso.

Test flessione ***: gli schemi di carico della prova sono variati durante lo svolgimento della sperimentazione, maggiori dettagli sono forniti nel capitolo 'Metodi e Parametri Investigati'.

Per comodità si richiama *Tabella 2*:

Macro gruppi		Trattamento previsto	Temperatura	Numero di campioni	Nome Campione
1.	a)	Naturale (inalterato)	20°C	7	B4, B8, B26, B33, B38, B39, B43
2.	b)	Termico	50°C	4	B19, B32, B42, B45
	c)	Termico	90°C	5	B18, B24, B34, B36, B40
3.	d)	Termico e Chimico (Acido Solforico)	50°C	7	B2, B3, B11, B12, B13, B14, B15, B17
	e)	Termico e Chimico (Acido Solforico)	90°C	4	B5, B6, B31, B48

Per comprendere gli step eseguiti è necessario suddividere il capitolo in tre paragrafi:

- Stato Naturale: vengono riportati i valori misurati dei parametri iniziali del marmo, non trattato, mantenuto in condizioni termoigrometriche ambientali. I risultati ottenuti sono necessari ad indagare la variabilità del marmo e come base per comprendere il meccanismo di degrado che inciderà maggiormente sulle proprietà del materiale.
- Alterazione Termica: viene presentata la risposta del secondo e terzo gruppo di campioni soggetti al trattamento termico, a due distinte temperature di riferimento.
- Alterazione Termica e Chimica: sono forniti i risultati relativi all'ultimo step di trattamento previsto da questa sperimentazione, dove il quarto e quinto gruppo di campioni sono stati immersi in una soluzione acida a due cicli termici differenti.

Il confronto dei dati ottenuti da ciascun meccanismo di alterazione verrà esaminato nel capitolo dedicato, ovvero ne il '*Confronto dei Risultati*'.

Per i dettagli dei trattamenti si rimanda al capitolo '*Processi di Invecchiamento del Materiale*'.

5.1 Stato Naturale

Analisi delle proprietà fisiche

In *Figura 2 e 3* che seguono, si riportano i valori di velocità ultrasonica delle onde P, V_P , delle onde S, V_S , ed i relativi scarti quadratici medi per ogni barretta di marmo analizzata. Inoltre viene riportato il valore medio della V_P e della V_S che, per il marmo analizzato, risulta rispettivamente pari a 5552 m/s e 2976 m/s.

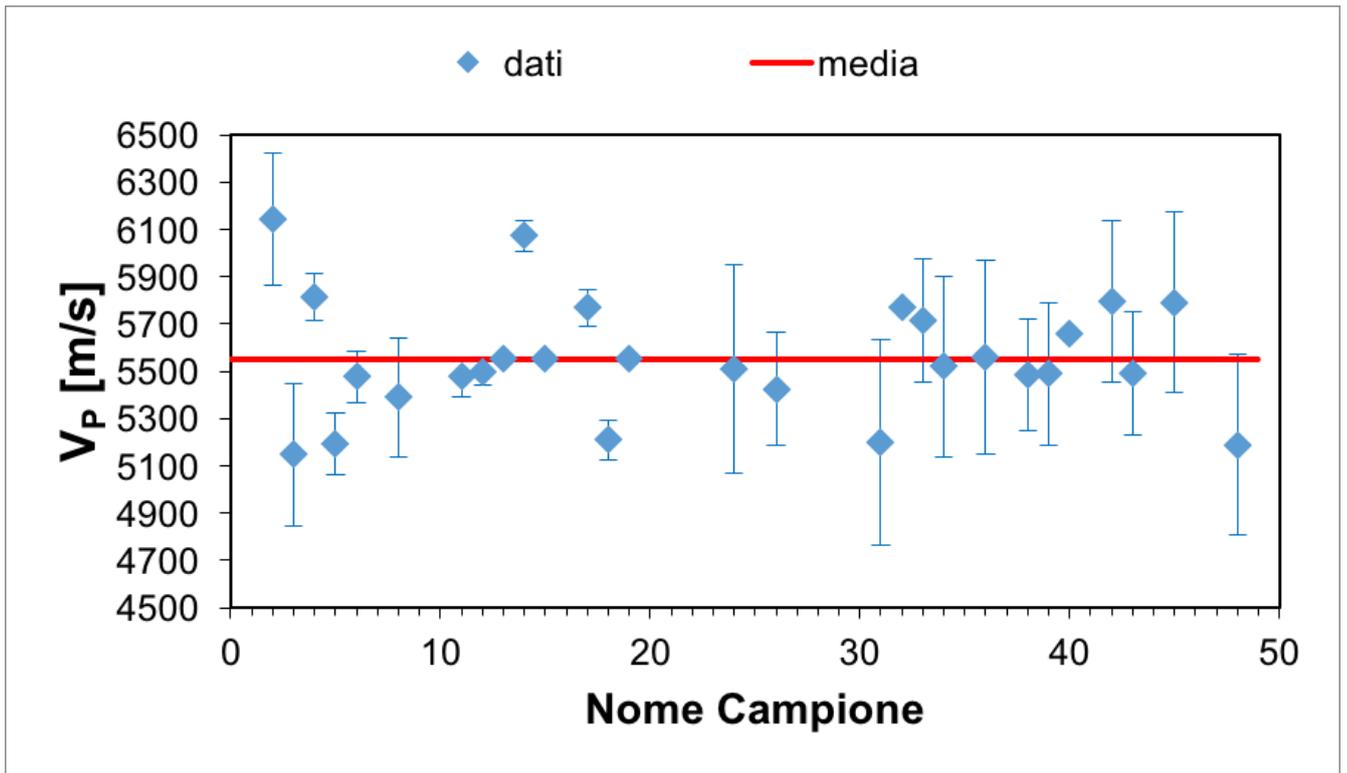


Figura 33 Variabilità V_p nei campioni insalterati.

In ascissa: ordine dei campioni in base alla nomenclatura assegnata; In ordinata: valor medio di V_p nel mezzo valutato per ciascun campione e relativo scarto quadratico medio (indicato con la barra d'errore).

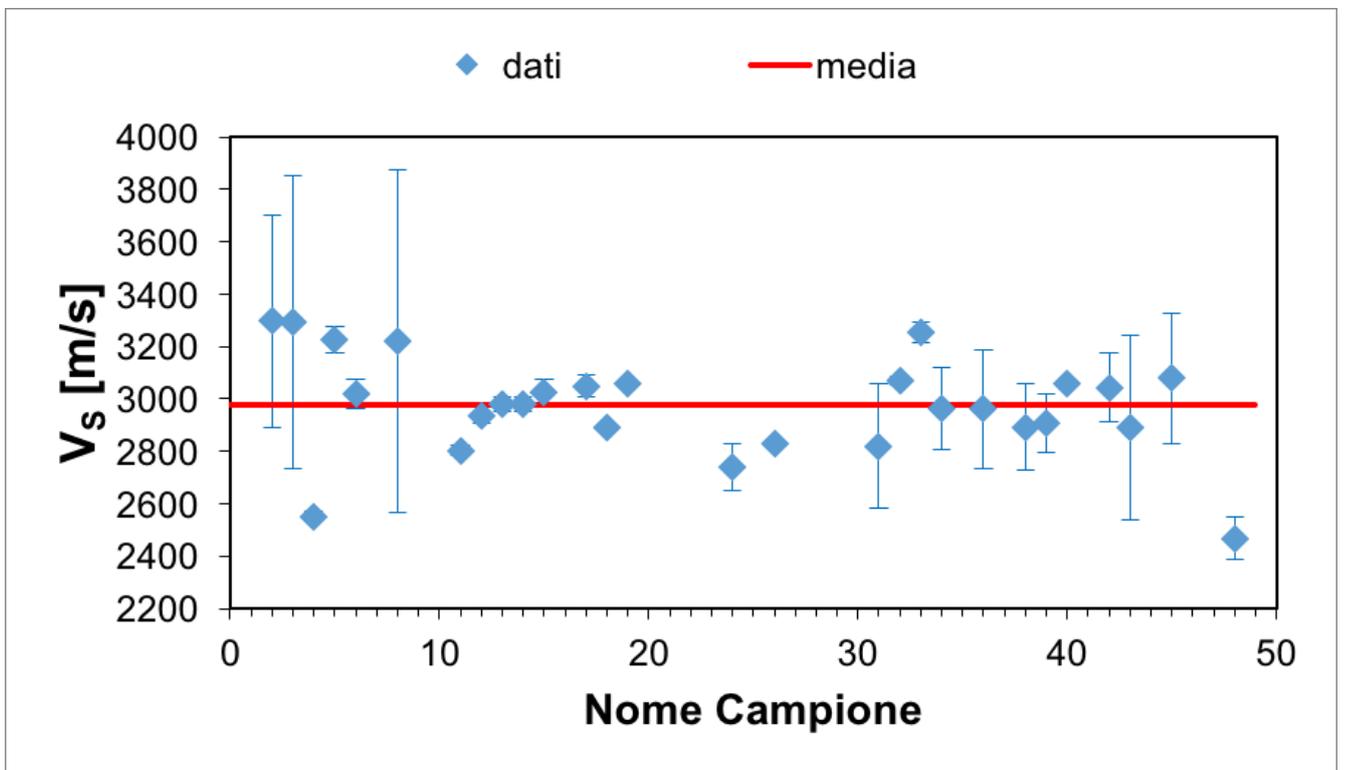


Figura 34 Variabilità V_s nei campioni insalterati.

In ascissa: ordine dei campioni in base alla nomenclatura assegnata; In ordinata: valor medio di V_s nel mezzo valutato per ciascun campione e relativo scarto quadratico medio (indicato con la barra d'errore).

Appare evidente, in entrambi i grafici, una discreta differenza tra i valori dei provini.

Lo scarto quadratico medio V_P si attesta sui 442 m/s, mentre per V_S lo scarto quadratico medio è pari a 651 m/s.

La valutazione del modulo elastico E_{din} è basata dalla relazione che lega le V_P , V_S e il coefficiente di Poisson e sarà quindi direttamente influenzata dalla variazione degli stessi.

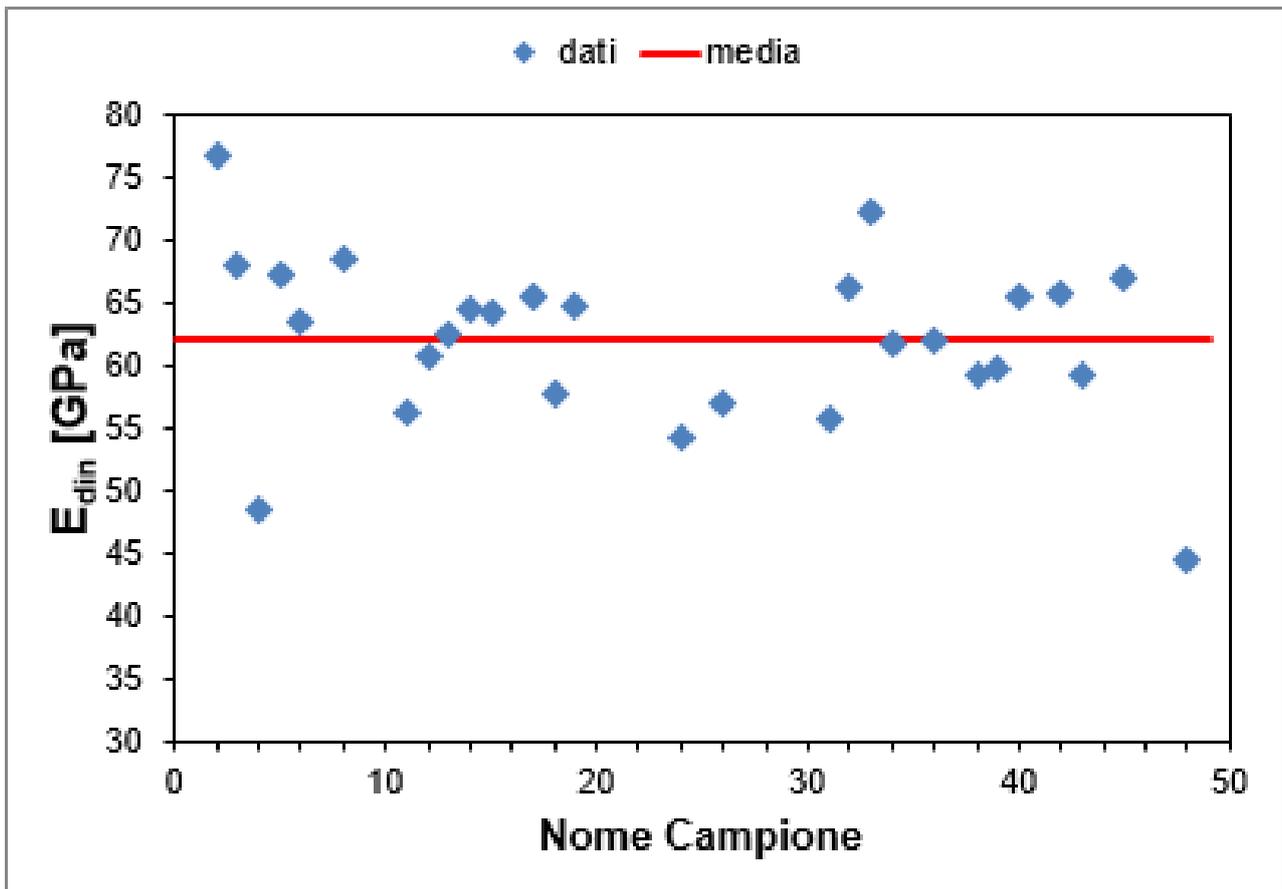


Figura 35 Valori medi di E_{din} ricavati analiticamente.

I risultati numerici ottenuti da tutti i campioni inalterati sono forniti nella *Tabella 6* che segue:

Tabella 6 Parametri ricavati nell'analisi ultrasonica.

Nome Campione	W [g]	L [cm]	h [mm]	B [mm]	V [mm ³]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	Vs [m/s]	dev.st Vs [m/s]	VP/Vs [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
B26	985,80	19,20	59,96	31,62	363942	2708,68	5425	241	2830	0	1,92	0,31	56,97	21,69
B33	973,80	19,30	60,02	31,09	360093	2704,30	5715	260	3254	39	1,76	0,26	72,17	28,63
B43	969,10	19,35	60,08	30,73	357280	2712,44	5491	262	2891	351	1,90	0,31	59,33	22,67
B19	964,60	19,23	60,05	31,03	358200	2692,91	5556	0	3061	0	1,82	0,28	64,70	25,23
B32	980,50	19,25	59,93	31,45	362766	2702,84	5769	0	3068	16	1,88	0,30	66,29	25,44
B42	992,00	19,35	59,96	31,54	365944	2710,80	5797	340	3044	131	1,90	0,31	65,80	25,12
B45	1001,60	19,48	59,98	31,65	369716	2709,11	5791	383	3080	249	1,88	0,30	66,95	25,69
B18	960,70	19,23	60,09	30,69	354549	2709,64	5209	83	2891	13	1,80	0,28	57,86	22,65
B40	1006,10	19,38	59,85	32,11	372325	2702,21	5660	0	3061	0	1,85	0,29	65,49	25,32
B24	987,10	19,20	60,05	31,68	365307	2702,11	5509	442	2740	87	2,01	0,34	54,18	20,28
B34	960,30	19,28	60,26	30,56	354880	2705,98	5520	380	2963	155	1,86	0,30	61,65	23,76
B36	966,10	19,23	59,98	30,92	356552	2709,56	5558	410	2963	227	1,88	0,30	61,91	23,78
B2	992,00	19,38	59,99	31,34	364267	2723,28	6143	280	3297	406	1,86	0,30	76,81	29,60
B3	981,90	19,40	60,05	31,05	361645	2715,09	5148	303	3293	559	1,56	0,15	67,93	29,44
B11	976,60	19,38	60,33	30,89	361091	2704,58	5476	83	2804	18	1,95	0,32	56,24	21,26
B12	974,50	19,40	59,97	30,92	359738	2708,92	5495	55	2936	31	1,87	0,30	60,72	23,35
B13	961,60	19,15	59,96	30,88	354623	2711,61	5556	0	2982	27	1,86	0,30	62,58	24,11
B14	960,60	19,23	60,02	30,81	355560	2701,65	6073	67	2982	27	2,04	0,34	64,44	24,02
B15	968,90	19,25	59,87	30,83	355335	2726,72	5556	0	3025	50	1,84	0,29	64,34	24,95
B17	957,90	19,30	59,82	30,82	355776	2692,42	5770	78	3049	42	1,89	0,31	65,39	25,03
B5	974,00	19,35	59,83	30,84	356960	2728,60	5193	132	3227	49	1,61	0,19	67,37	28,41
B6	951,80	18,95	60,06	30,81	350660	2714,31	5476	109	3019	55	1,81	0,28	63,41	24,74
B31	997,60	19,28	59,96	31,87	368253	2709,01	5198	433	2820	238	1,84	0,29	55,64	21,54
B48	975,10	19,50	59,94	30,87	360759	2702,91	5190	383	2468	79	2,10	0,35	44,59	16,47
Media campioni	975,64	19,29	59,99	31,12	360168	2708,85	5552	442	2976	651	1,87	0,29	62,11	24,09

Analisi Campioni Non Alterati

Analisi delle proprietà meccaniche

Lo schema statico adottato è quello dei 4 appoggi, con i riferimenti già elencati nel capitolo ‘*Metodi e Parametri Investigati*’.

I dati elaborati dalla macchina MTS servocontrollata accoppiati alle deformazioni registrate dagli estensimetri hanno consentito di diagrammare l’andamento delle deformazioni nel tempo al crescere del carico. Avendo effettuato prove di flessione con differenti schemi statici, in sostituzione del carico, si procede a valutare il momento in mezzzeria fino a rottura in accordo alla teoria elastica.

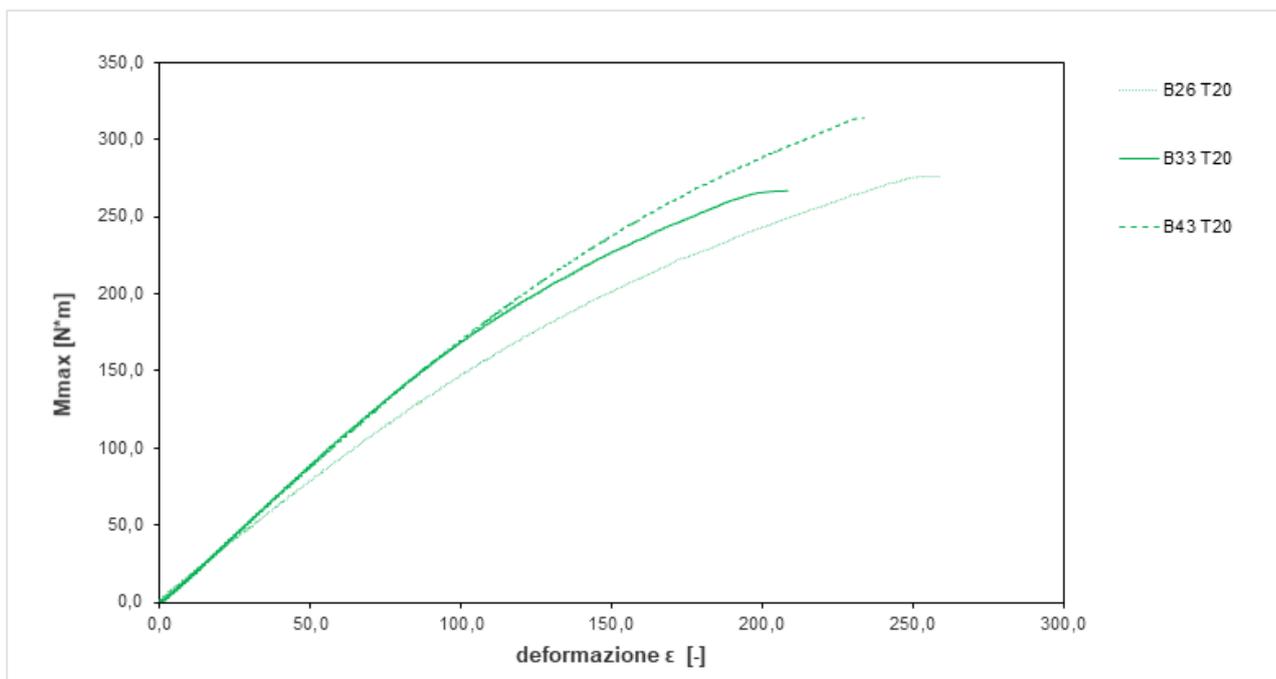


Figura 36 Grafico Momento- Deformazione dei provini inalterati.

Vengono diagrammati esclusivamente i provini attrezzati con strain gauge.

Le curve ottenute sono depurate dalla corsa del pistone: si evidenzia una variabilità dei provini già dai primi test eseguiti. Tuttavia si valuterà in seguito quanto questa incida nell’analisi.

Le pendenze risultano lineari ed il tratto plasticizzato è praticamente inesistente, indice che il materiale ha un comportamento fragile. Per le stime numeriche dei moduli elastici secanti, si rimanda ai dati forniti in Tabella 3.

In maniera analoga, grazie al trasduttore di spostamento posto inferiormente ai campioni, è stato possibile diagrammare la progressiva inflessione dei provini al crescere del carico nel tempo.

Nel grafico che segue (Figura 5) sono presenti ulteriori quattro provini, indicati con colorazione azzurra, non attrezzati con estensimetri ed analizzati per la taratura della prova e per verificare la qualità dei dati acquisiti:

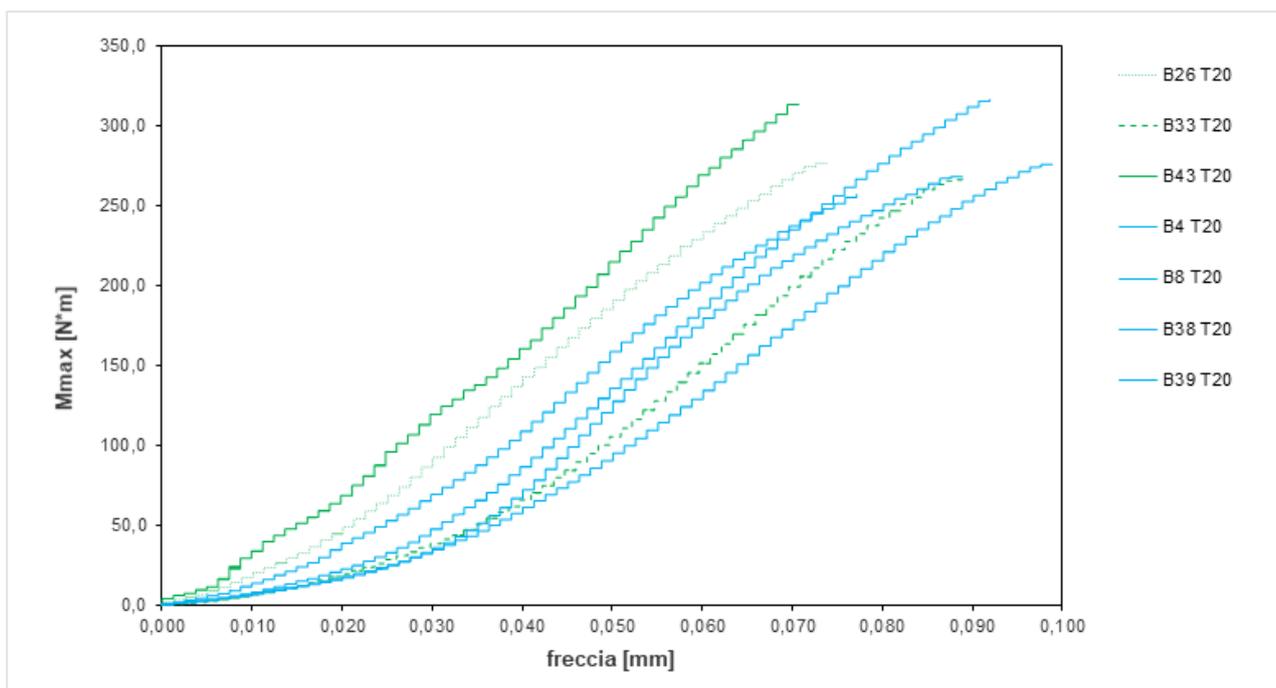


Figura 37 Grafico Inflessione-Tensioni (analizzati 7 provini: B26,B33,B43 attrezzati con estensimetri)

Nonostante la variabilità del materiale, l'inflessione massima registrata prima della rottura è del tutto comparabile tra i diversi campioni, e, aumenta linearmente all'aumentare del momento.

Come effettuato per le proprietà fisiche si procede a tabellare i risultati e le stime numeriche ottenute mediante la prova di flessione su 4 punti:

Tabella 7 Caratterizzazione meccanica dei campioni inalterati

	Nome Campione	P,max [kN]	f,max [mm]	M,max [N*m]	σ_t ,max [MPa]	Es50 [GPa]	Es ($\epsilon=10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
Inalterati	B26	11,06	0,074	276,40	14,59	78,69	99,77
	B33	10,67	0,089	266,70	14,29	92,94	80,09
	B43	12,55	0,071	313,70	16,97	93,23	93,72
	B4	10,28	0,077	257,10	13,96	-	-
	B8	10,74	0,089	268,40	14,47	-	-
	B38	11,03	0,099	275,80	14,94	-	-
	B39	12,66	0,092	316,50	16,61	-	-
	Media	11,28	0,084	282,09	15,12	88,29	91,19

La Tabella 7 conferma il sussistere di una variabilità del naturale che potrebbe essere indicativamente posta nel 10%, giudicando i dati derivanti dai moduli secanti. Ciò, a fini ingegneristici, risulta accettabile.

Come anticipato in precedenza, non si hanno dati sulla resistenza meccanica di 4 provini (B4, B8, B38, B39) poiché non erano attrezzati con strain gauge.

5.2 Alterazione Termica

Successivamente il trattamento termico imposto alle barrette selezionate, sono state nuovamente valutate le proprietà dei campioni degli stessi al fine di stabilirne la variazione dovuta al condizionamento imposto.

Analisi delle proprietà fisiche

In Tabella 4 vengono presentati i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con onde ultrasoniche sui provini, successivamente il loro riscaldamento.

Tabella 8 Valori medi ottenuti post trattamento termico alle differenti temperature.

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
TT 50 [°C]	B19	963,80	2690,67	5516	92	2836	29	1,94	0,32	57,15	21,64
	B32	979,70	2700,64	5227	50	2757	12	1,90	0,31	53,67	20,53
	B42	991,40	2709,16	5102	39	2778	0	1,84	0,29	53,91	20,91
	B45	1000,80	2706,95	5556	0	2753	55	2,02	0,34	54,87	20,52
	Media	983,93	2701,85	5350	92	2781	55	1,92	0,31	54,90	20,90

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
TT 90 [°C]	B18	960,10	2707,94	4387	58	2479	0	1,77	0,27	42,12	16,64
	B40	1005,30	2700,06	4238	50	2521	0	1,68	0,23	42,08	17,16
	B24	986,40	2700,20	4348	0	2565	51	1,70	0,23	43,81	17,77
	B34	959,70	2704,29	4540	204	2419	0	1,88	0,30	41,20	15,82
	B36	965,30	2707,32	5034	47	2632	51	1,91	0,31	49,21	18,75
	Media	975,36	2703,96	4509	204	2523	51	1,79	0,27	43,68	17,23

Per un confronto si procede a riportare i valori ottenuti dalle stesse barrette inalterate (stato naturale):

Tabella 9 Valori medi ottenuti pre trattamento termico.

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
Inalterati	B19	964,60	2692,91	5556	0	3061	0	1,82	0,28	64,70	25,23
	B32	980,50	2702,84	5769	0	3068	16	1,88	0,30	66,29	25,44
	B42	992,00	2710,80	5797	340	3044	131	1,90	0,31	65,80	25,12
	B45	1001,60	2709,11	5791	383	3080	249	1,88	0,30	66,95	25,69
	Media	984,68	2703,91	5728	383	3063	249	1,87	0,30	65,93	25,37

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
Inalterati	B18	960,70	2709,64	5209	83	2891	13	1,80	0,28	57,86	22,65
	B40	1006,10	2702,21	5660	0	3061	0	1,85	0,29	65,49	25,32
	B24	987,10	2702,11	5509	442	2740	87	2,01	0,34	54,18	20,28
	B34	960,30	2705,98	5520	380	2963	155	1,86	0,30	61,65	23,76
	B36	966,10	2709,56	5558	410	2963	227	1,88	0,30	61,91	23,78
	Media	976,06	2705,90	5491	442	2923	227	1,88	0,30	60,22	23,16

Come atteso, appare marcata la diminuzione della velocità delle onde V_p e V_s , e conseguentemente la stima dei valori medi di modulo elastico e di taglio da essi derivanti.

Non risultano significative variazioni di forma o peso successivamente i cicli di riscaldamento.

Ulteriori riflessioni verranno affrontate nel capitolo successivo (*Confronto dei risultati*).

Analisi delle proprietà meccaniche

Lo schema statico adottato è invariato rispetto ai test precedenti (4 appoggi). Nei grafici che seguono sono presenti le curve momento-deformazione e momento-freccia ricavate dalla prova a flessione dei campioni alterati termicamente (50°C e 90°C).

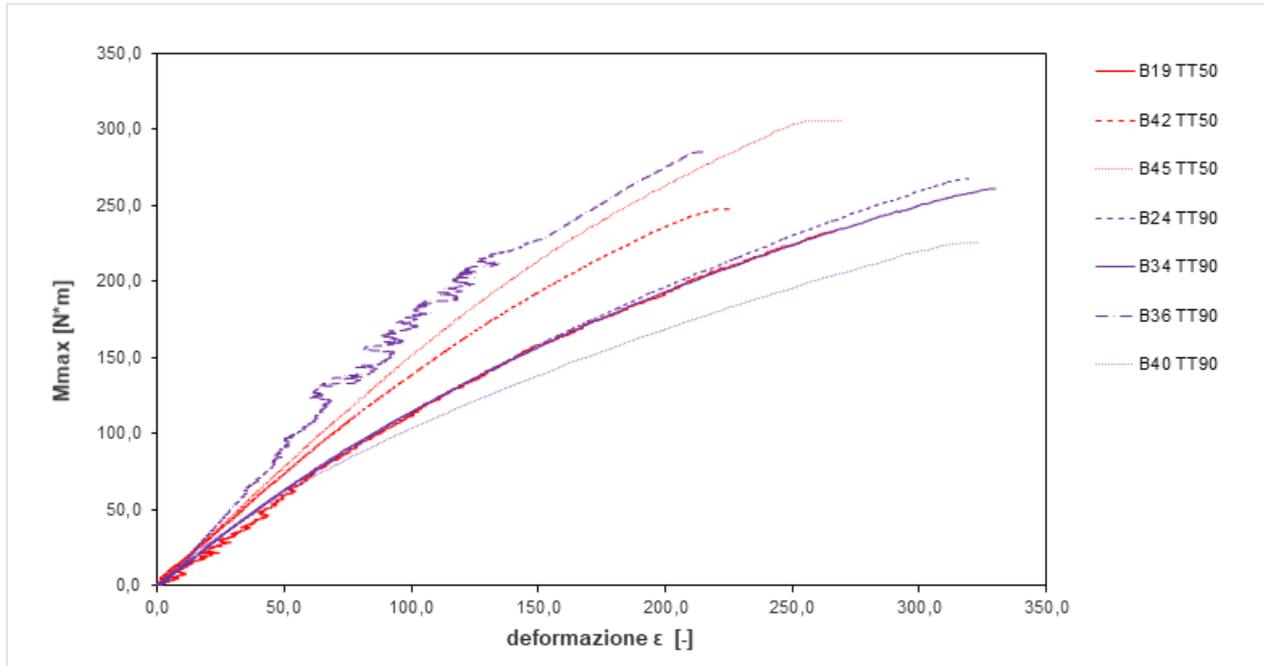


Figura 38 Grafico Momento-Deformazione dei campioni alterati termicamente alle temperature di riferimento: sono diagrammati esclusivamente i provini attrezzati con strain gauge.

In Figura 37 non vengono mostrati i risultati dei campioni B32 (TT50) e B18 (TT90) poiché sono state registrate anomalie: il primo ha avuto problemi nell'azzeramento del macchinario e il secondo ha registrato un meccanismo di rottura a taglio, inutile per la nostra trattazione. Il test B24 (TT90) presenta un'oscillazione anomala della curva dovuta ad uno spostamento accidentale del provino di riferimento della temperatura.

In generale la pendenza delle curve tende ad abbassarsi ed appare come se il meccanismo tendesse a plasticizzare, anche se con valori di momento ultimo minore.

Nel grafico che segue (Figura 39) manca il contributo della freccia ottenuto dal campione B19, poiché lo schema di carico aveva distanze appoggio-forza differenti (i test erano ancora in fase di calibrazione).

Sono ben distinguibili i due rami ottenuti dalle due temperature di riscaldamento.

Il provino B42 (TT50) presenta un salto attorno al valore 0,24 mm della freccia probabilmente generato da una discontinuità presente nel campione.

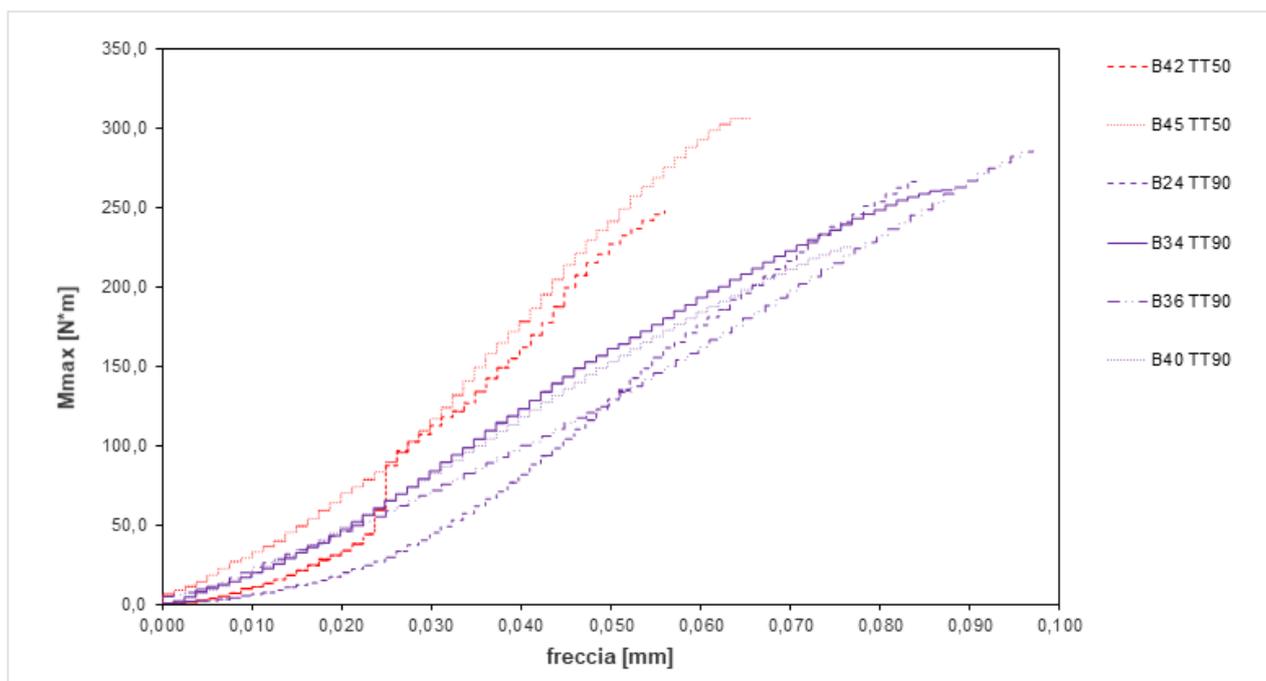


Figura 39 Grafico Momento-Freccia ottenuto dalle barrette trattate termicamente

Come fatto precedentemente, si tabellano i valori ultimi ottenuti dal test a flessione:

Tabella 10 Valori ottenuti nei test di flessione dai campioni trattamenti termicamente.

	Nome Campione	P,max [kN]	f,max [mm]	M,max [N*m]	$\sigma_{t,max}$ [MPa]	Es50 [GPa]	Es ($\epsilon=10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
TT 50 [°C]	B19	14,58	0,076	233,22	12,51	60,20	57,07
	B32	10,12	0,179	252,90	13,44	39,48	1,03
	B42	9,90	0,056	247,60	13,10	74,83	90,13
	B45	12,24	0,066	306,00	16,13	79,36	89,33
	Media	12,24	0,066	262,27	13,91	71,46	78,84

	Nome Campione	P,max [kN]	f,max [mm]	M,max [N*m]	$\sigma_{t,max}$ [MPa]	Es50 [GPa]	Es ($\epsilon=10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
TT 90 [°C]	B18	15,54	0,115	248,58	13,46	24,36	17,63
	B40	9,03	0,077	225,70	11,78	52,02	70,73
	B24	10,71	0,084	267,80	14,06	57,72	69,46
	B34	10,44	0,088	261,10	14,12	59,75	69,95
	B36	11,42	0,097	285,40	15,39	93,25	72,89
	Media	10,40	0,087	260,00	13,84	65,68	70,76

Da un valore dei moduli secanti che si aggirava attorno ai 90 GPa per i provini incondizionati, anche questa metodologia di prova conferma una diminuzione delle caratteristiche di resistenza, resa ancora più evidente nei provini riscaldati ad una temperatura maggiore. La differenza ottenuta tra i due trattamenti termici si aggira attorno al 10%.

Le barrette B32 e B18 (segnalate in grigio), come accennato in precedenza, avuto problemi e vengono riportati per completezza di informazione rispetto alle analisi delle proprietà fisiche. Tuttavia non vengono tenuti in conto per la valutazione dei parametri medi.

5.3 Alterazione Termica e chimica

Analisi delle proprietà fisiche

Successivamente il trattamento in bagno termostatico, alle due temperature di riferimento, i campioni risultano superficialmente meno lucidi ed è possibile intravedere leggermente le striature della direzione di segazione del provino, dove il deposito di gesso risulta più evidente.

In analogia ai paragrafi precedenti, si riportano le proprietà dei provini misurati successivamente il trattamento termico e chimico.

Tabella 11 Valori medi ottenuti post trattamento termico e chimico.

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
TTC 50 [°C]	B2	991,80	2722,73	5556	0	2970	0	1,87	0,30	62,44	24,02
	B3	981,40	2713,71	5000	0	2885	0	1,73	0,25	56,49	22,59
	B11	976,40	2704,03	5085	0	2836	44	1,79	0,27	55,43	21,75
	B12	974,50	2708,92	5109	803	2944	0	1,74	0,25	58,76	23,48
	B13	961,50	2711,33	5085	0	2902	38	1,75	0,26	57,47	22,83
	B14	960,40	2701,09	5085	0	2953	38	1,72	0,25	58,68	23,55
	B15	968,50	2725,60	5085	0	2830	0	1,80	0,28	55,69	21,83
	B17	957,70	2691,86	5085	0	2885	20	1,76	0,26	56,58	22,40
	Media	971,53	2709,91	5136	803	2901	44	1,77	0,26	57,69	22,81

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
TTC 90 [°C]	B5	973,60	2727,48	4361	29	2970	0	1,47	0,07	51,37	24,06
	B6	951,40	2713,17	4088	76	2609	0	1,57	0,16	42,71	18,47
	B31	997,60	2709,01	4054	0	2542	0	1,59	0,18	41,17	17,50
	B48	974,60	2701,52	3797	0	1990	21	1,91	0,31	28,04	10,70
	Media	974,30	2712,79	4075	76	2528	21	1,63	0,18	40,82	17,68

Per semplice confronto si procede a tabellare anche i valori ottenuti allo stato naturale degli stessi:

Tabella 12 Valori medi ottenuti pre trattamento termico e chimico.

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
Inalterati	B2	992,00	2723,28	6143	280	3297	406	1,86	0,30	76,81	29,60
	B3	981,90	2715,09	5148	303	3293	559	1,56	0,15	67,93	29,44
	B11	976,60	2704,58	5476	83	2804	18	1,95	0,32	56,24	21,26
	B12	974,50	2708,92	5495	55	2936	31	1,87	0,30	60,72	23,35
	B13	961,60	2711,61	5556	0	2982	27	1,86	0,30	62,58	24,11
	B14	960,60	2701,65	6073	67	2982	27	2,04	0,34	64,44	24,02
	B15	968,90	2726,72	5556	0	3025	50	1,84	0,29	64,34	24,95
	B17	957,90	2692,42	5770	78	3049	42	1,89	0,31	65,39	25,03
	Media	971,75	2710,53	5652	303	3046	559	1,86	0,29	64,81	25,22

	Nome Campione	W [g]	ρ [kg/m ³]	VP [m/s]	dev.st VP [m/s]	VS [m/s]	dev.st VS [m/s]	VP/VS [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
Inalterati	B5	974,00	2728,60	5193	132	3227	49	1,61	0,19	67,37	28,41
	B6	951,80	2714,31	5476	109	3019	55	1,81	0,28	63,41	24,74
	B31	997,60	2709,01	5198	433	2820	238	1,84	0,29	55,64	21,54
	B48	975,10	2702,91	5190	383	2468	79	2,10	0,35	44,59	16,47
	Media	974,63	2713,71	5264	433	2883	238	1,84	0,28	57,75	22,79

Non risultano significative modifiche della densità volumica, mentre spicca la marcata diminuzione della stima del modulo elastico prodotta dal trattamento termico e chimico a 90° in acido solforico. Infatti la diminuzione del valor medio rispetto allo stato naturale risulta del 30% circa.

Analisi delle proprietà meccaniche

Per questa tipologia di prova lo schema statico è variato poiché è stato adottato un castelletto a 3 punti, la cui forza è applicata nella mezzeria del provino e le distanze dagli appoggi sono poste a 75 mm da esso. La variazione di schema statico comporta conseguentemente la variazione dei valori di carico a rottura, che nel caso in esame risulteranno inferiori in accordo alla teoria elastica.

Inoltre non sarà possibile un confronto con le frecce ricavate dalle analisi precedenti.

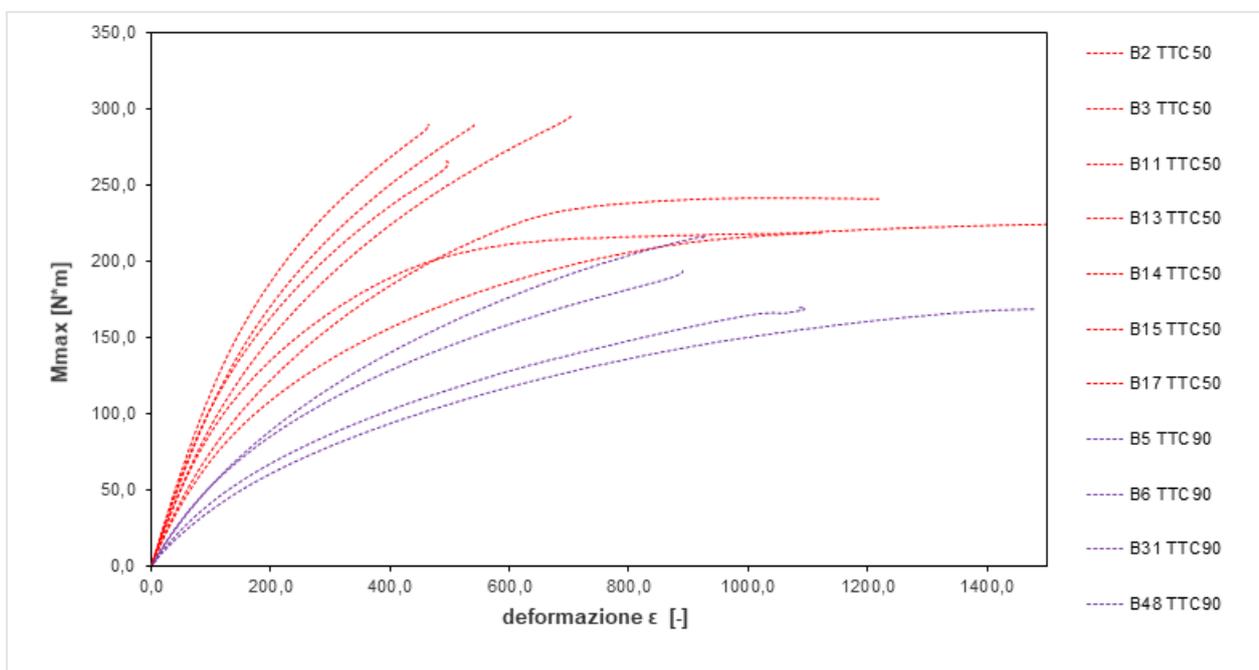


Figura 40 Grafico Momento-Deformazione ottenuto per le barrette trattate termicamente e chimicamente.

Il comportamento dei provini, come avvenuto nel solo trattamento termico, ha prodotto un abbassamento delle curve con tendenza al comportamento plastico. Anche in questo caso il valore del momento corrispondente alle deformazioni è diminuito. Nonostante la variabilità delle curve, il grafico (Figura 9) consente di visualizzare bene il decremento prodotto dalle temperature più elevate.

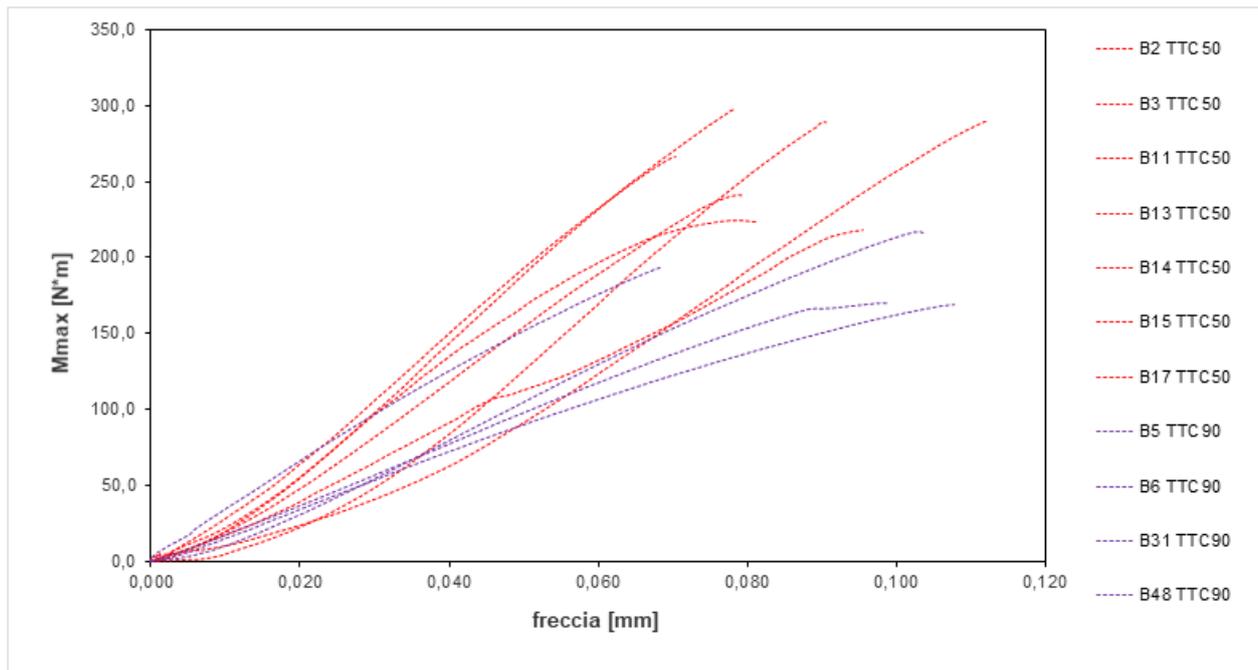


Figura 41 Grafico Momento-Freccia risultante dalle barrette trattate termicamente e chimicamente.

Le frecce misurate hanno un campo di variabilità non ben definito, specie per bassi valori del momento. La tendenza è comunque ad inflettersi maggiormente nei test eseguiti con temperatura a 90°C.

Infine si riportano i dati in forma tabellare:

Tabella 13 Valori ottenuti nei test di flessione dai campioni trattamenti termicamente e chimicamente.

	Nome Campione	P,max [kN]	f,max [mm]	M,max [N*m]	σ_t ,max [MPa]	Es50 [GPa]	Es ($\epsilon=10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
TTC 50 [°C]	B2	7,93	0,078	297,33	15,82	40,33	60,45
	B3	6,44	0,080	241,50	12,94	33,01	52,45
	B11	6,00	0,081	224,90	12,00	28,38	51,50
	B13	7,73	0,091	289,70	15,65	57,80	70,10
	B14	5,83	0,096	218,68	11,82	42,34	61,96
	B15	7,09	0,070	265,82	14,43	50,68	67,36
	B17	7,73	0,112	289,99	15,78	50,98	64,44
	Media	6,96	0,087	261,13	14,06	43,36	61,18

	Nome Campione	P,max [kN]	f,max [mm]	M,max [N*m]	σ_t ,max [MPa]	Es50 [GPa]	Es ($\epsilon=10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
TTC 90 [°C]	B5	5,18	0,069	194,39	10,57	21,61	38,31
	B6	4,53	0,099	169,90	9,17	15,89	29,89
	B31	5,78	0,104	216,83	11,36	21,40	34,61
	B48	4,51	0,108	169,30	9,16	13,67	27,26
	Media	5,00	0,095	187,60	10,06	18,14	32,52

I dati elaborati dai test a flessione confermano al ribasso la stima del modulo elastico già riscontrata nei test ad ultrasuoni, a conferma che il trattamento termico combinato all'azione chimica è risultato il meccanismo più usurante per le proprietà del marmo.

5.4 Risultati DIC

La tecnica, come detto nel capitolo dedicato alla descrizione dei metodi d'indagine, ha richiesto un processo di calibrazione in quanto non era disponibile da letteratura uno standard per provini di marmo. Come atteso e riscontrato dalle prime analisi meccaniche non eseguite con la tecnica DIC, la scarsa deformabilità del materiale avrebbe potuto inficiare la computazione del programma.

Il primo macro gruppo dei test a flessione ha previsto l'acquisizione mediante video.

L'analisi effettuata con Ncorr ricava le curve di tensione - deformazione di un pixel selezionato dalla maschera virtuale (per specifiche si rimanda al *paragrafo 3.5*).

Nel grafico che segue si riportano le curve ottenute dall'analisi di sensibilità, in funzione della variazione dei diversi parametri del programma.

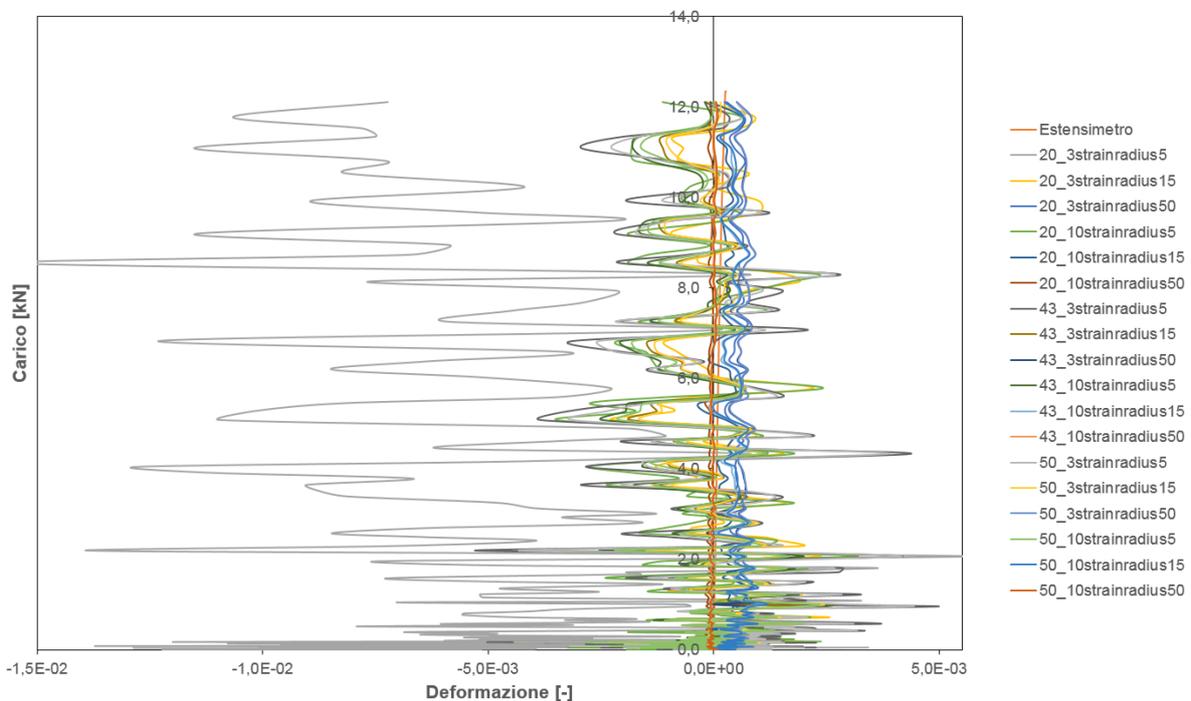


Figura 42 Curve derivanti dall'analisi di sensibilità, set di parametri personalizzati.

I risultati dell'elaborazione, tuttavia, sono risultati molto rumorosi, non confrontabili con i valori degli estensimetri e perciò di scarsa utilità.

Una volta ricavata la curva che qualitativamente ricalca l'andamento della registrazione effettuata dall'estensimetro si è proceduto a graficare l'andamento delle deformazioni superficiali del provino. Come detto in precedenza la scarsa deformabilità del materiale, la sua tessitura omogenea e la bassa qualità dei fotogrammi acquisiti dovuto ad una acquisizione continua non ha consentito di descrivere adeguatamente il campione. Viene riportata (Figura 42) a titolo di esempio l'analisi condotta sul campione B45, che schematizza la deformazione in funzione del carico applicato:

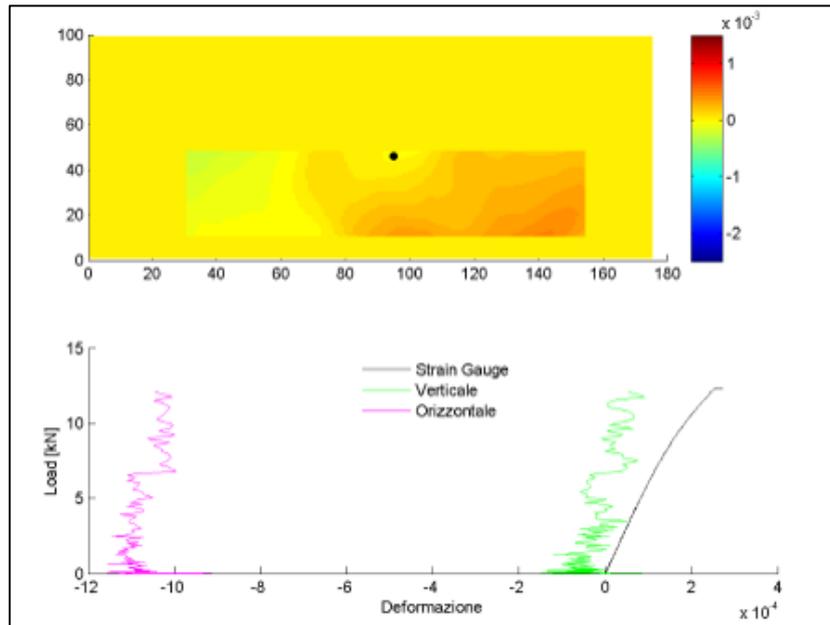


Figura 43 Analisi DIC campione B45, set di parametri: subset radius 5, subset spacing 10, strain radius 50

Nell'ultimo macro gruppo di campioni è stato deciso di acquisire i fotogrammi ad intervallo di acquisizione fisso a 10 secondi, potendo così garantire una qualità maggiore delle immagini.

Il risultato dei diversi campioni è graficato come segue (Figura 43):

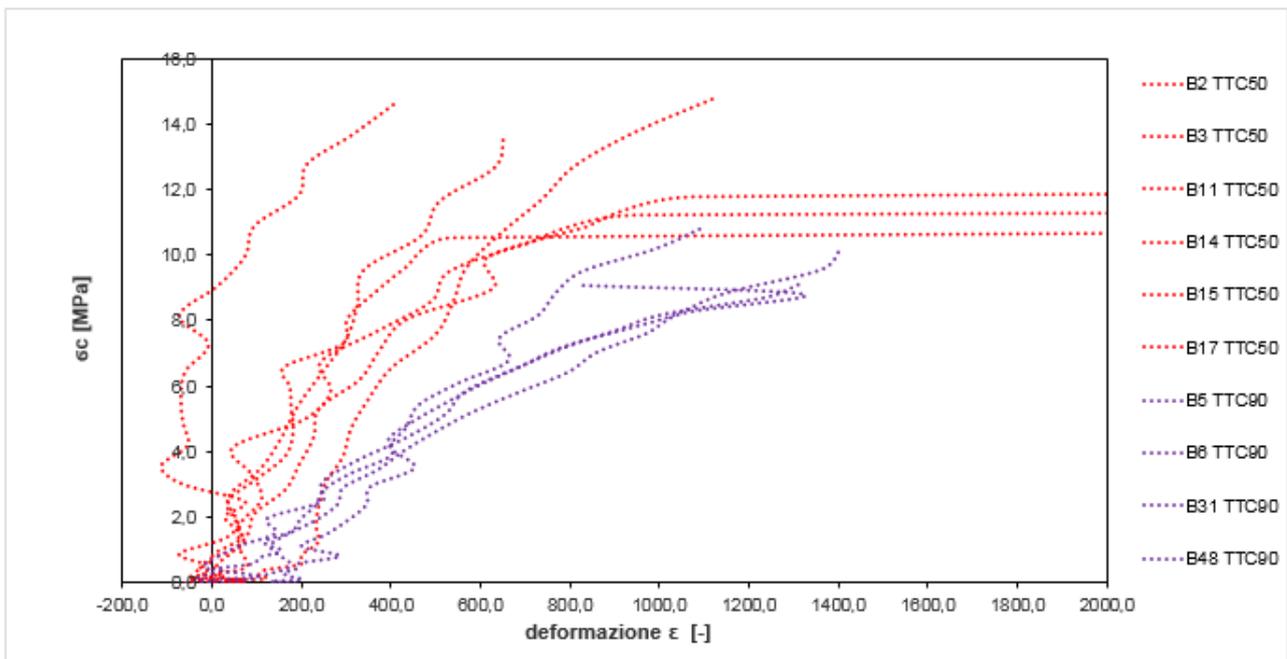


Figura 44 Analisi DIC su campioni trattati termochimicamente, ottenuta con parametri di default suggeriti dal software.

Le curve ottenute dal punto in corrispondenza dell'estensimetro, nonostante le ottimizzazioni apportate rispetto alle precedenti prove, generano curve oscillanti che non consentono misure affidabili del modulo elastico.

Come visibile dai grafici che seguono, nonostante si sia proceduto ad un'analisi di sensibilità e al miglioramento della qualità delle immagini, vengono generati dati non lineari (Figura 44) o privi di senso (Figura 45).

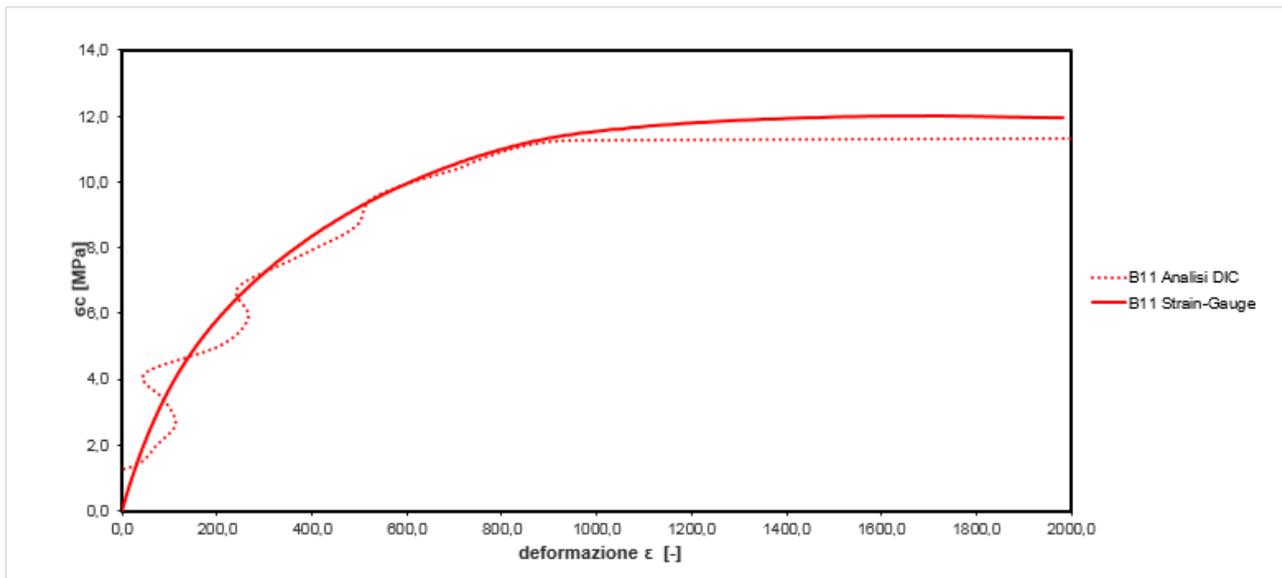


Figura 45 Risultato dell'analisi di sensitività del campione B11 confrontato con la registrazione dell'estensimetro.

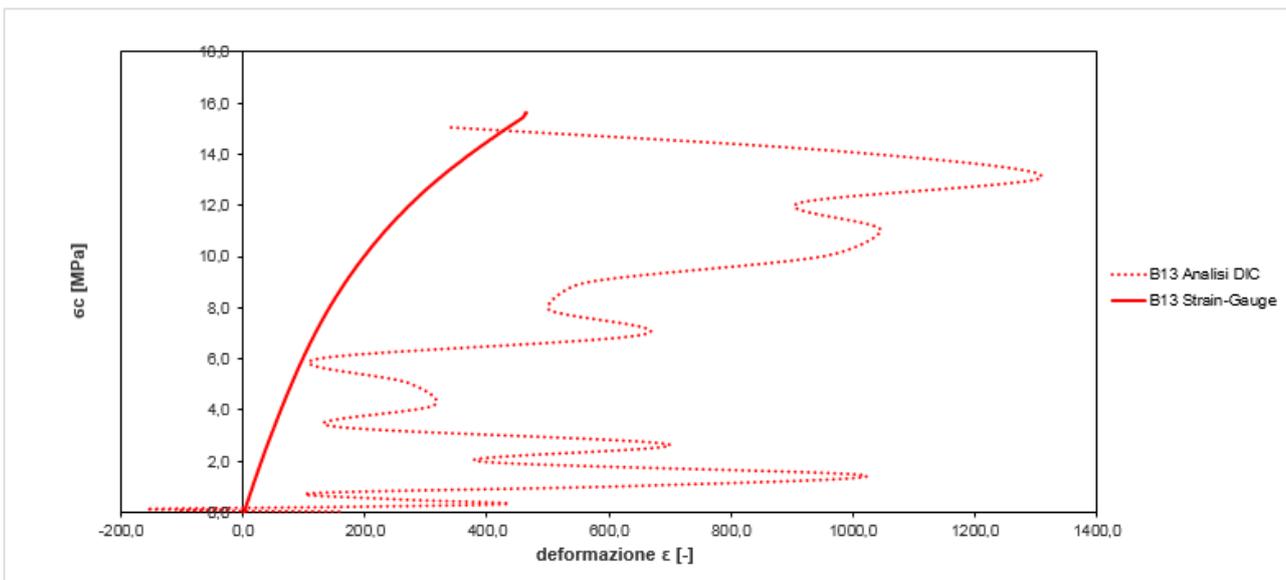


Figura 46 Risultato dell'analisi di sensitività del campione B13 confrontato con la registrazione dell'estensimetro.

Da queste curve, perciò, non è ricavabile il modulo elastico e ciò porta ad affermare che per questo litotipo la tecnica può dirsi non applicabile.

6 CONFRONTO DEI RISULTATI

In questo capitolo si procede ad analizzare la variazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei campioni di marmo, in conseguenza dei vari meccanismi di degrado.

6.1 Variabilità del Naturale

Avendo caratterizzato fisicamente ciascun campione incondizionato grazie ad una tecnica non distruttiva, come visibile in *Tabella 6* al paragrafo 5.1, è possibile stabilire le caratteristiche medie che forniscono indicativamente la variabilità del naturale del marmo oggetto di questa tesi.

Tabella 14 Caratteristiche fisiche medie dei campioni incondizionati.

ρ media [kg/m ³]	dev.st ρ media [kg/m ³]	VP media [m/s]	dev.st VP media [m/s]	VS media [m/s]	dev.st VS media [m/s]	ν medio [-]	Edin medio [GPa]	Gdin medio [GPa]
2709	28	5552	442	2976	651	0,29	62,11	24,09

I dati qui forniti devono tenere conto dell'incertezza delle misurazioni. La taratura dei provini è di semplice esecuzione e comporta piccoli margini di errore. Quello che è più complesso stabilire è come il meccanismo di prova (incertezza del macchinario, competenza dell'operatore etc) possa inficiare sul dato acquisito. Ritendendo di aver operato in maniera quanto più possibile corretta, è riscontrabile una variabilità del naturale riflessa anche nei test a flessione, che possiamo assumere nell'ordine del 10% come evidenziato nel capitolo precedente (paragrafo 1.1).

6.2 Stato Naturale – Alterazione Termica

Come testimoniato in *Tabella 15* la perdita media in peso non è risultata significativa (0.7 g) in entrambi i trattamenti termici, indice che il contenuto naturale d'acqua è costante, così come la densità (variazione media 2 kg/m³).

Tabella 15 Differenza delle proprietà fisiche registrate post trattamento termico.

Nome Campione	ΔW [g]	$\Delta \rho$ [kg/m ³]	ΔVP [m/s]	ΔVs [m/s]	$\Delta \nu$ [-]	ΔE [GPa]	ΔG [GPa]
B19	0,80	2,23	40	225	-0,04	7,55	3,59
B32	0,80	2,21	542	311	0,00	12,62	4,91
B42	0,60	1,64	695	266	0,02	11,88	4,21
B45	0,80	2,16	235	327	-0,03	12,07	5,18
Media	0,75	2,06	378	282	-0,01	11,03	4,47

Nome Campione	ΔW [g]	$\Delta \rho$ [kg/m ³]	ΔV_P [m/s]	ΔV_S [m/s]	Δv [-]	ΔE [GPa]	ΔG [GPa]
B18	0,60	1,69	822	412	0,01	15,74	6,01
B40	0,80	2,15	1422	540	0,07	23,41	8,16
B24	0,70	1,92	1161	175	0,10	10,37	2,52
B34	0,60	1,69	980	544	0,00	20,45	7,93
B36	0,80	2,24	524	331	-0,01	12,70	5,03
Media	0,70	1,94	982	400	0,03	16,53	5,93

I valori sono ricavati sottraendo i dati di *Tabella 5* a quelli di *Tabella 4*.

Indicando con i termini ΔV_P e ΔV_S la differenza ottenuta dagli stessi provini esaminati precedentemente allo stato naturale, si riscontra in media un abbassamento della velocità delle onde ultrasoniche V_P e V_S . La differenza più significativa appare in corrispondenza del riscaldamento a 90° con una perdita media di circa 982 m/s per le V_P e 400 m/s per le V_S . Conseguentemente le stime empiriche del modulo elastico e di taglio diminuiscono con esse.

I test a flessione, eseguiti su 3 campioni allo stato naturale e su 7 campioni alterati termicamente (3xT50, 4xT90), hanno portato ad ottenere i seguenti risultati:

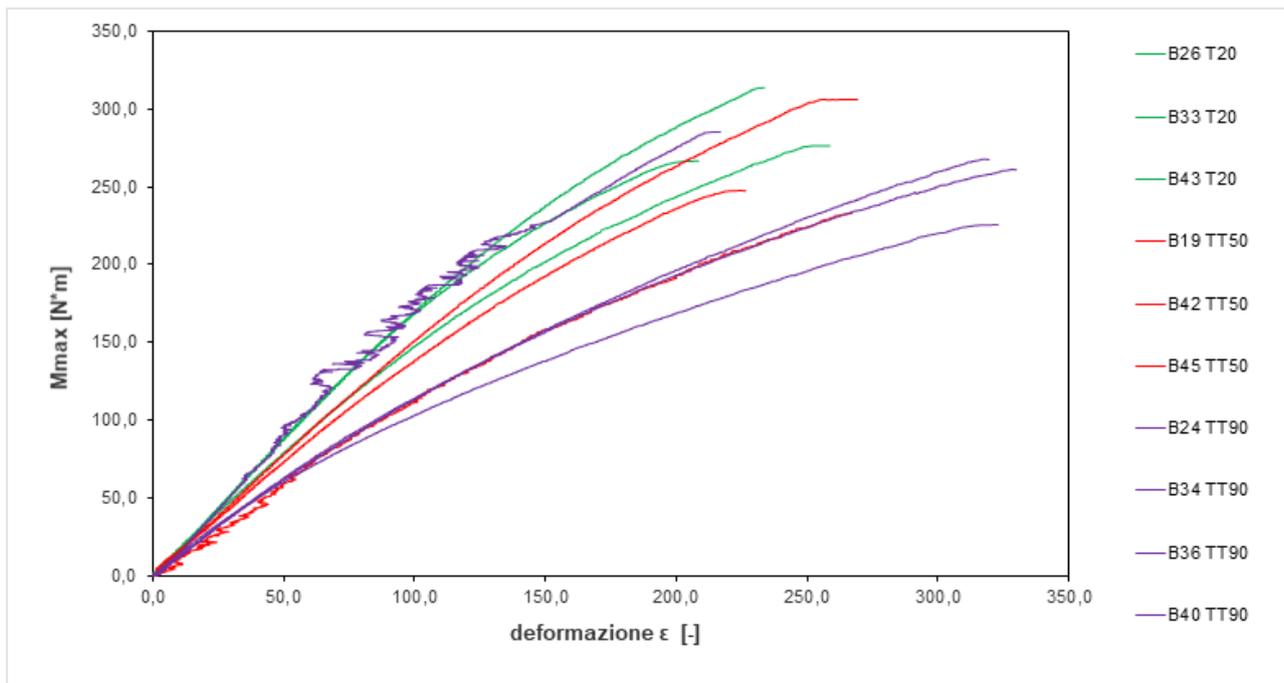


Figura 47 Grafico Momento-Deformazione, confronto barrette inalterate con trattate termicamente

Considerati i valori medi ottenuti dai campioni inalterati e riportati in *Tabella 3*:

$P_{,max}$ [kN]	$f_{,max}$ [mm]	$M_{,max}$ [N*m]	$\sigma_{t,max}$ [MPa]	E_{s50} [GPa]	E_s ($\epsilon = 10$ [$\mu\epsilon$]) [GPa]
11,28	0,084	282,09	15,12	88,29	91,19

la *Tabella 16* che segue esplicita la riduzione media dei parametri di resistenza.

Tabella 16 Differenza media delle proprietà meccaniche ottenute tramite test di flessione, post trattamento termico.

	T [°C]	ΔM_{max} [N*m]	$\Delta \delta t_{max}$ [MPa]	ΔE_{s50} [GPa]	$\Delta E_s (\epsilon = 10 [\mu\epsilon])$ [GPa]
TT	50	-19,81	-1,21	-16,82	-12,35
	90	-22,09	-1,28	-22,60	-20,44

Volendo porre in termini percentuali il confronto con i provini non condizionati, la riduzione si attesta sul 20% con riscaldamento a 50°C e attorno al 25% per i 90°C.

6.3 Stato Naturale – Alterazione Chimica e Termica

Analogamente al confronto effettuato in precedenza, si procede dapprima alla valutazione della variazione dei parametri fisici e successivamente a quelli meccanici.

In questo caso, nonostante il test fosse immerso nella soluzione, non sono state registrate significative modificazioni di peso ai campioni (0.3 g) in entrambi i trattamenti, indice che la porosità è scarsa o scarsamente interconnessa. Ciò è riscontrabile nella *Tabella 17* che segue:

Tabella 17 Differenza delle proprietà fisiche registrate post trattamento termico e chimico.

Nome Campione	ΔW [g]	$\Delta \rho$ [kg/m ³]	ΔVP [m/s]	ΔVs [m/s]	Δv [-]	ΔE [GPa]	ΔG [GPa]
B2	0,20	0,55	587	327	0,00	14,37	5,58
B3	0,50	1,38	148	408	-0,10	11,44	6,85
B11	0,20	0,55	391	-32	0,05	0,81	-0,48
B12	0,00	0,00	386	-8	0,05	1,96	-0,13
B13	0,10	0,28	471	80	0,04	5,11	1,28
B14	0,20	0,56	988	29	0,10	5,76	0,47
B15	0,40	1,13	471	195	0,01	8,65	3,12
B17	0,20	0,56	685	164	0,04	8,81	2,62
Media	0,23	0,63	516	145	0,02	7,11	2,41

Nome Campione	ΔW [g]	$\Delta \rho$ [kg/m ³]	ΔVP [m/s]	ΔVs [m/s]	Δv [-]	ΔE [GPa]	ΔG [GPa]
B5	0,40	1,12	832	257	0,12	16,00	4,36
B6	0,40	1,14	1388	410	0,13	20,70	6,27
B31	0,00	0,00	1144	278	0,12	14,46	4,03
B48	0,50	1,39	1393	478	0,04	16,54	5,77
Media	0,32	0,91	1189	356	0,10	16,93	5,11

Secondo l'analisi ad ultrasuoni, la riduzione di $E_{dinamico}$ rimane nell'ordine di grandezza del solo trattamento termico.

La prova di flessione, al contrario, mostra un netto calo di resistenza, specie nel meccanismo di aggressione più gravoso (ovverosia termochimico a 90°C):

Tabella 18 Differenza media delle proprietà meccaniche ottenute tramite test di flessione, post trattamento termochimico.

	T [°C]	ΔM_{max} [N*m]	$\Delta \delta t_{max}$ [MPa]	ΔE_{s50} [GPa]	$\Delta E_s (\epsilon = 10 [\mu\epsilon])$ [GPa]
TTC	50	-20,95	-1,05	-44,93	-30,01
	90	-94,48	-5,05	-70,14	-58,67

La stima di riduzione dei parametri elastici rispetto ai campioni allo stato naturale risulta molto significativa poiché si attesta dal 40% ottenuto a 50°C, fino ad arrivare al 70% dei 90°C.

Considerati i valori ottenuti nel solo trattamento termico, confrontando i target di temperatura equivalenti, la perdita di resistenza è più che raddoppiata grazie all'apporto dell'umidità e delle sostanze acide che hanno intaccato la sezione dei provini, inficiandone le proprietà.

Questa diminuzione è ben visibile graficando i test di flessione, riportati in *Figura 47*:

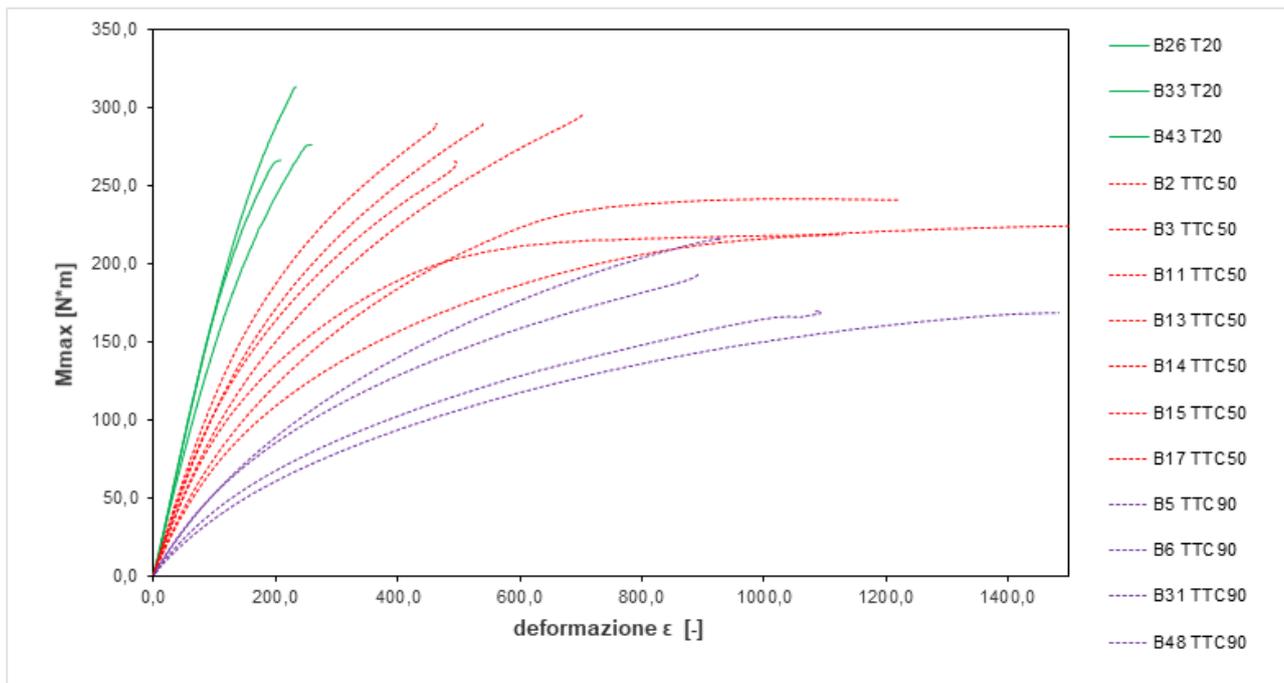


Figura 48 Grafico Momento-Deformazione, confronto barrette inalterate con trattate termicamente e chimicamente

Mantenendo in verde le barrette inalterate come base di riferimento, la pendenza delle curve rosse (TTC 50) e viola (TTC 90) vanno riducendosi (e conseguentemente i loro moduli), il momento ultimo pre-rottura diminuisce e la deformazione corrispondente aumenta assumendo un comportamento quasi plastico. Inoltre i range di variazione risultano significativamente più ampi.

I valori di momento massimo raggiunti in mezzeria, nelle diverse tipologie di schemi statici applicati, ipotizzando valida la teoria elastica fino all'istante di rottura, sono ricavati analiticamente e riportati in *Tabella 19*.

Altresi si riepilogano le stime medie ricavate dai test a flessione, in funzione del trattamento eseguito, in *Tabella 20*: i dati confermano la diminuzione di resistenza nei provini trattati termicamente, come già noto da altri studi, ed evidenziano come l'effetto combinato con umidità ed acido solforico incida in maniera ancora più rilevante.

Tabella 19 Calcolo del momento sollecitante a rottura, in ipotesi elastica lineare.

Data prova	Nome Campione	Trattamento	P _{max} [kN]	Schema Statico [mm]	M _{max} [N*m]	M _{max} medio [N*m]	
25.10.18	B4	-	10,28	50-50-50	257,10	282,09	
25.10.18	B8	-	10,74	50-50-50	268,40		
24.10.18	B26	-	11,06	50-50-50	276,40		
25.10.18	B33	-	10,67	50-50-50	266,70		
25.10.18	B38	-	11,03	50-50-50	275,80		
25.10.18	B39	-	12,66	50-50-50	316,50		
23.01.19	B43	-	12,55	50-50-50	313,70	262,27	
24.10.18	B19	TT50 [°C]	14,58	32-86-32	233,22		
24.10.18	B32	TT50 [°C]	10,12	50-50-50	252,90		
23.01.19	B42	TT50 [°C]	9,90	50-50-50	247,60		
23.01.19	B45	TT50 [°C]	12,24	50-50-50	306,00		
24.10.18	B18	TT90 [°C]	15,54	32-86-32	248,58		
23.01.19	B24	TT90 [°C]	10,71	50-50-50	267,80	260,00	
23.01.19	B34	TT90 [°C]	10,44	50-50-50	261,10		
23.01.19	B36	TT90 [°C]	11,42	50-50-50	285,40		
25.10.18	B40	TT90 [°C]	9,03	50-50-50	225,70		
30.05.19	B2	TTC50 [°C]	7,93	75-75	297,33		261,13
30.05.19	B3	TTC50 [°C]	6,44	75-75	241,50		
30.05.19	B11	TTC50 [°C]	6,00	75-75	224,90		
30.05.19	B13	TTC50 [°C]	7,73	75-75	289,70		
30.05.19	B14	TTC50 [°C]	5,83	75-75	218,68		
30.05.19	B15	TTC50 [°C]	7,09	75-75	265,82		
30.05.19	B17	TTC50 [°C]	7,73	75-75	289,99	187,60	
30.05.19	B5	TTC90 [°C]	5,18	75-75	194,39		
30.05.19	B6	TTC90 [°C]	4,53	75-75	169,90		
30.05.19	B31	TTC90 [°C]	5,78	75-75	216,83		
30.05.19	B48	TTC90 [°C]	4,51	75-75	169,30		

Tabella 20 Valori medi delle proprietà meccaniche riscontrati con test di flessione.

	T [°C]	P _{max} [kN]	f _{max} [mm]	M _{max} [N*m]	σ _{t,max} [MPa]	Es50 [GPa]	Es (ε= 10 [μ€]) [GPa]
INCOND.	20	11,28	0,084	282,09	15,12	88,29	91,19
TT	50	12,24	0,066	262,27	13,91	71,46	78,84
	90	10,40	0,087	260,00	13,84	65,68	70,76
TTC	50	6,96	0,087	261,13	14,06	43,36	61,18
	90	5,00	0,095	187,60	10,06	18,14	32,52

Il progressivo aumentare della temperatura, combinato all'effetto prodotto dalla soluzione acida, comporta significative modificazioni ai moduli elastici ricavati analiticamente. Per completezza sono stati riportati i valori medi della freccia massima registrata, ma tuttavia non risultano utili al confronto causa la variazione di schemi statici.

I risultati medi delle analisi fisiche possono riassumersi come di seguito (Tabella 21):

Tabella 21 Valori medi delle proprietà fisiche ottenuti dai test ad ultrasuoni.

	T [°C]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Vp/Vs [-]	vdin [-]	Edin [GPa]	Gdin [GPa]
NATURALE	20	5552	2976	1,87	0,29	62,11	24,09
TRATTAMENTO TERMICO	50	5350	2781	1,92	0,31	54,90	20,90
	90	4509	2523	1,79	0,27	43,68	17,23
TRATTAMENTO TERMICO E CHIMICO	50	5136	2701	1,90	0,26	53,68	20,31
	90	4075	2528	1,61	0,18	40,82	16,68

Nel **trattamento termico** si riscontra in media un abbassamento della velocità delle onde ultrasoniche V_P e V_S , con l'aumentare della temperatura del trattamento. La differenza più significativa risulta dal riscaldamento a 90°C con una perdita media di circa 980 m/s per le V_P e 400 m/s per le V_S .

Nei campioni che hanno subito un **trattamento termico e chimico**, l'analisi ad ultrasuoni ha riscontrato una riduzione di E_{din} poco superiore al solo trattamento termico.

Al fine di valutare una possibile correlazione tra i valori di modulo E_{dinamico} ed $E_{(\mu=10)}$ a basse deformazioni, si procede a graficare i valori ottenuti.

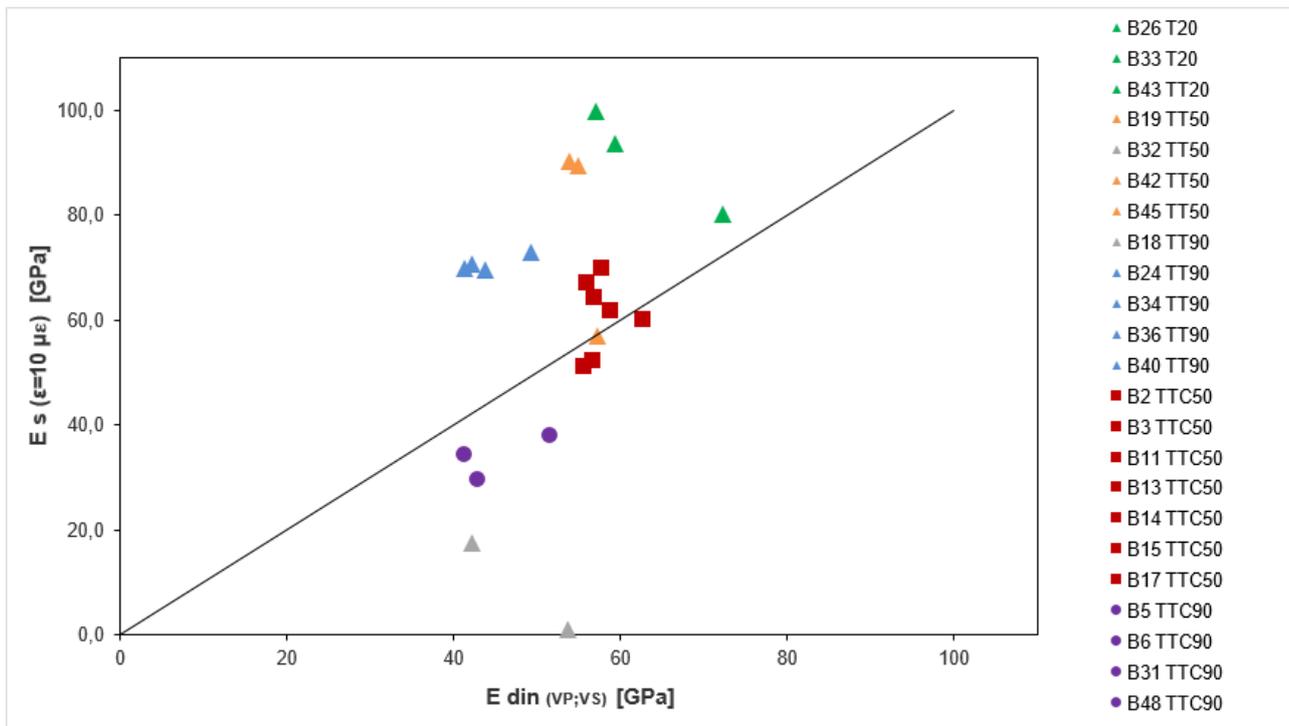


Figura 49 Confronto E_s a bassa deformazione (test di flessione) e E_{din} ottenuto con onde ultrasoniche (PunditLab).

La bisettrice del grafico (Figura 49) consente di evidenziare come non vi sia una corrispondenza diretta tra i dati acquisiti con prova ad ultrasuoni (ordinate) e test di flessione (ascisse). Gli unici che parrebbero avere un legame sono i test termici a 50°C , che tuttavia non risultano sufficienti a giustificare la correlazione.

Ponendo in ascissa dei grafici le temperature target ed in ordinata il modulo E_{S50} possiamo ricavare le equazioni ottenute interpolando i dati (Figura 50).

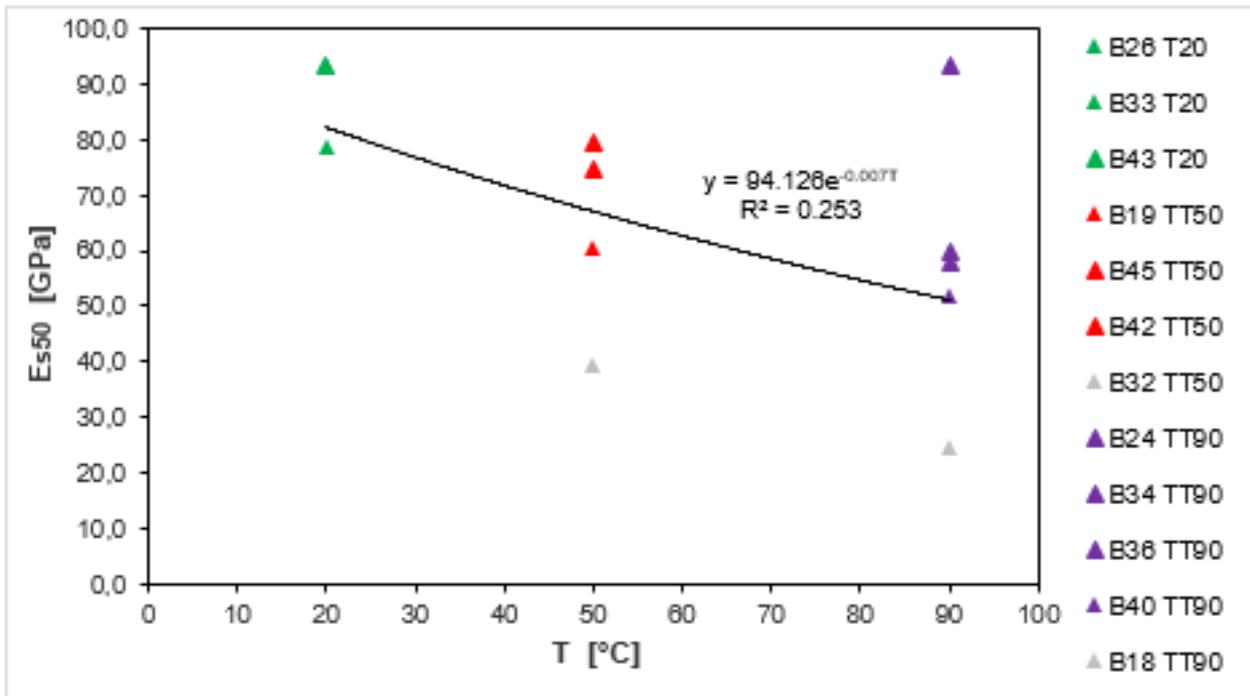


Figura 50 Diminuzione del modulo tangente E_{S50} in relazione al riscaldamento imposto ai provini di marmo.

Identicamente si può procedere per il trattamento termico e chimico:

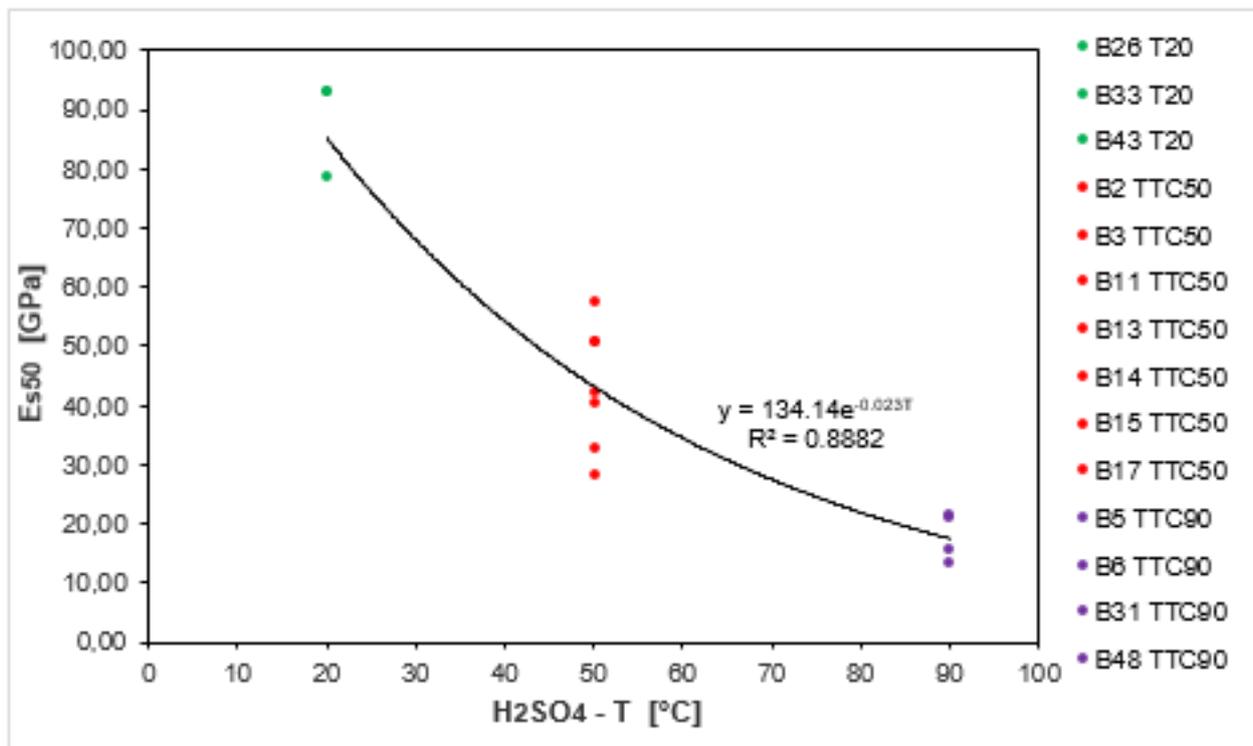


Figura 51 Diminuzione del modulo tangente E_{S50} in relazione al condizionamento termico e chimico imposto.

Il fattore R^2 di Figura 50 risulta prossimo all'unità e quindi il dato risulta ben correlato.

Confrontando le diminuzioni dei moduli E_{S50} la legge esponenziale cambia significativamente, evidenziando l'effetto generato dall'umidità e dall'acidità del trattamento.

È stata riscontrata una netta riduzione delle onde V_P con l'aumento della temperatura del trattamento termico, mentre le onde V_S hanno subito variazioni minori.

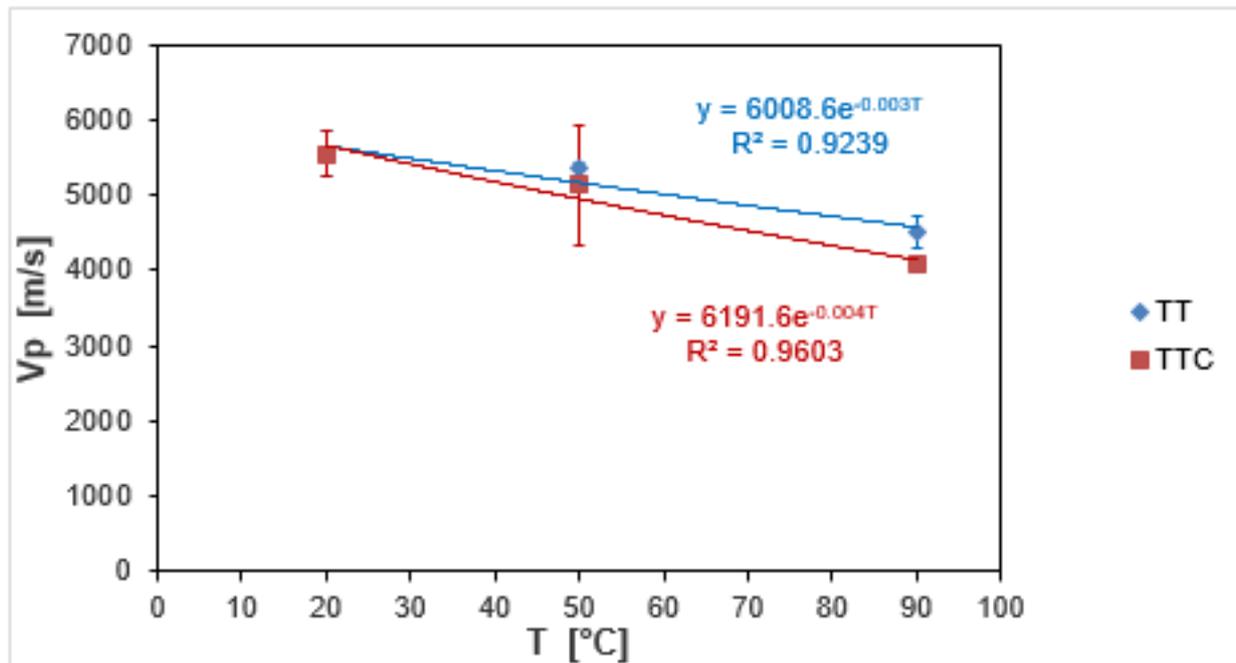


Figura 52 Diminuzione della velocità di V_P in funzione del condizionamento imposto in laboratorio.

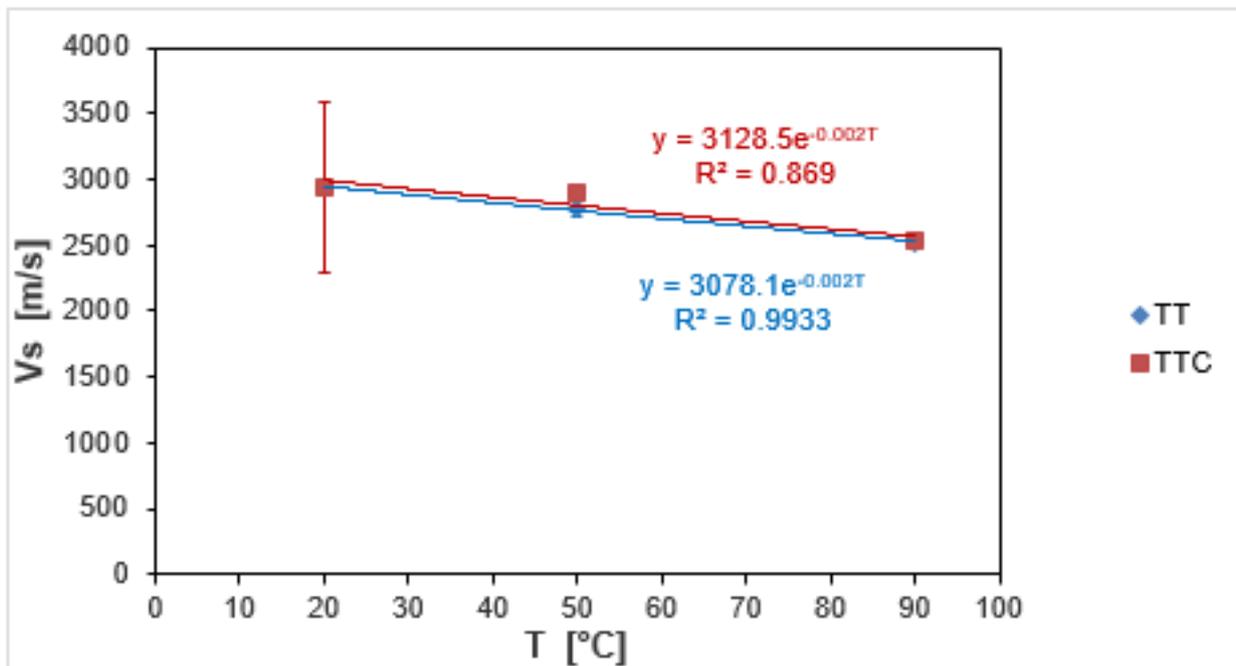


Figura 53 Trend di V_S in funzione del condizionamento imposto in laboratorio.

Le relazioni ottenute nei grafici (Figura 52 e 53) mostrano valori del fattore R^2 alti. I risultati sono in accordo con l'aumento delle microcricche interne causate dal riscaldamento, che rallentano progressivamente il tempo di primo arrivo dell'onda ultrasonica. Inoltre la diminuzione del rapporto V_P/V_S comporta un cambiamento delle proprietà meccaniche. Il ruolo dell'aggressione chimica è più evidente sulle onde P, probabilmente causato dal sottile strato di gesso creatosi in superficie.

Per completare il confronto generale dei test di flessione, si riportano le curve in *Figura 54*:

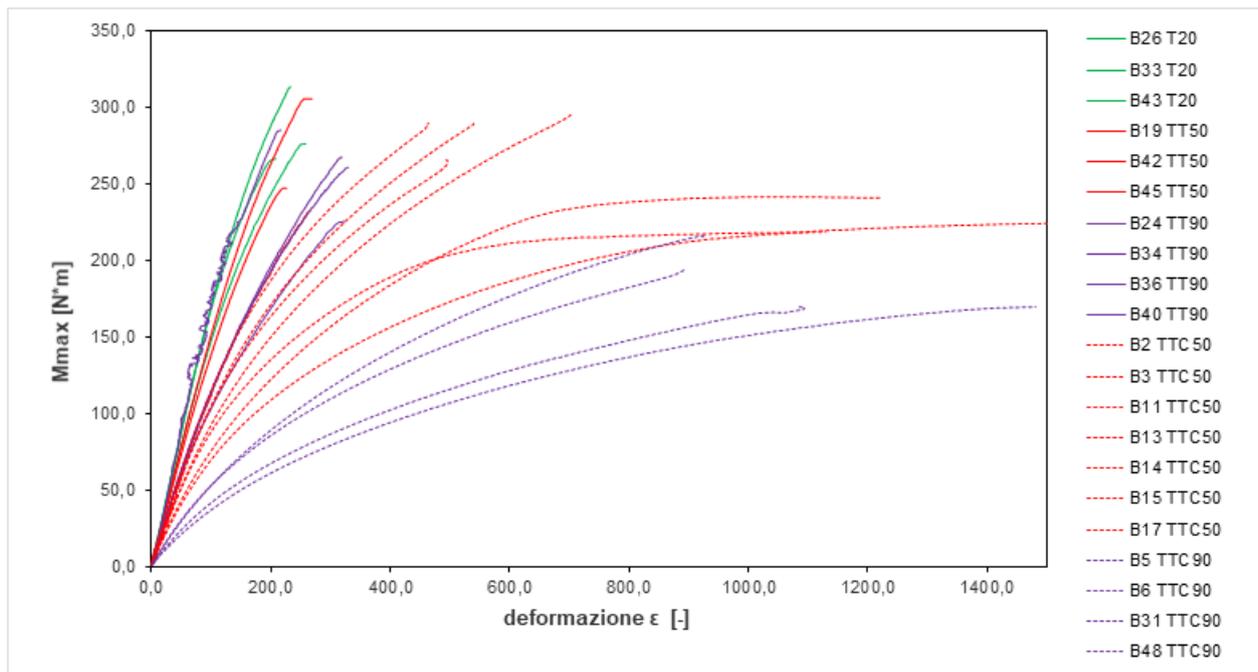


Figura 54 Curve ricavate dai test di flessione. In verde: campioni incondizionati; In rosso (tratto continuo): campioni trattati termicamente a 50°C; In viola (tratto continuo): campioni trattati termicamente a 90°C; In rosso (puntinatura): campioni trattati termicamente e chimicamente (50°C); In viola (puntinatura): campioni trattati termicamente e chimicamente (90°C).

Da questo grafico appare evidente la differente risposta generata dai campioni trattati termicamente e chimicamente.

6.4 Deformazione Strain Gauge – DIC

Si procede ora ad un confronto tra i dati ottenuti dall'analisi dei fotogrammi tramite Ncorr® ed i dati macchina ricavati mediante gli estensimetri. A calibrazione della tecnica, mediamente, sono state analizzate 35 sequenze per ciascun campione. Per le precisazioni sui parametri calibrati si rimanda al capitolo 'Metodi e Parametri Investigati'.

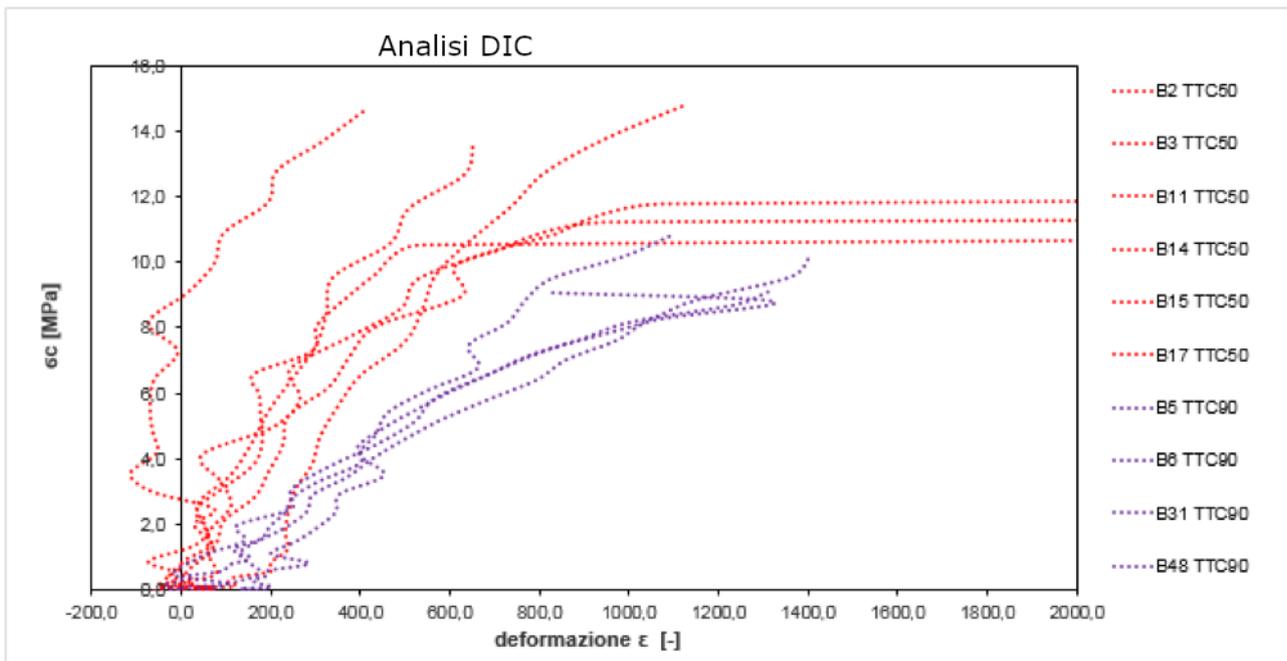
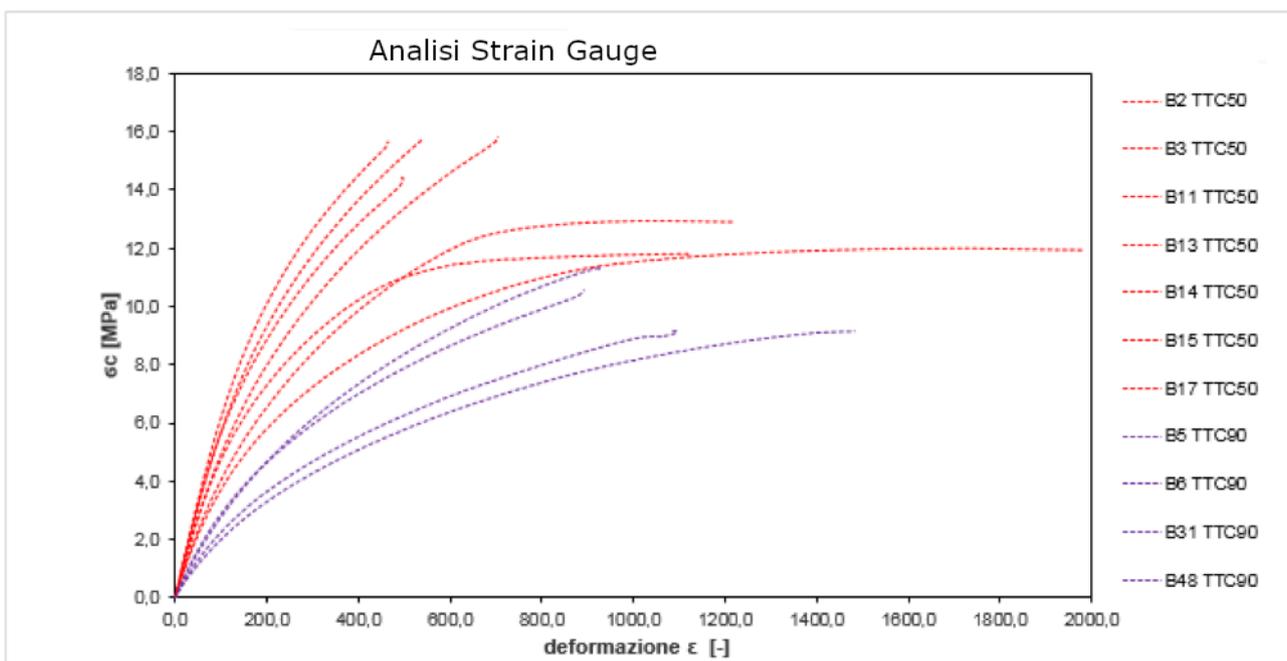


Figura 55 Analisi DIC su campioni trattati termochimicamente, ottenuta con parametri di default suggeriti dal software.



I risultati (Figura 52), presentano una curva oscillante che non consente una stima corretta del modulo elastico. Questo fatto, combinato con la bassissima deformabilità del materiale in questa specifica prova, fanno sì che il rapporto misura su rumore del campo delle deformazioni generato dall'analisi DIC sia molto basso, con valori di rumore dello stesso ordine di grandezza del dato misurato. Ciò induce a considerare la tecnica non applicabile per il materiale in esame e per lo scopo della tesi.

7 CONCLUSIONI

Le proprietà fisiche e meccaniche delle pietre da costruzione possono variare a causa dei diversi meccanismi di degrado generati da variazioni termiche e dagli agenti chimici. Il problema dell'aggressione ambientale causato da piogge acide e gradienti termici sulle rocce di marmo è un aspetto importante da tenere in considerazione per la progettazione delle facciate degli edifici, poiché può causare inflessione, microfessure e spalling. Mentre gli stress termici sono stati ampiamente studiati negli ultimi anni, l'effetto combinato degli agenti atmosferici termici e chimici (inteso come l'azione combinata di acqua piovana e inquinanti atmosferici) è ancora poco compreso.

Con l'obiettivo fornire indicazioni sulla variazione della risposta del materiale una volta soggetto al degrado ambientale, sono stati eseguiti test non distruttivi (velocità degli impulsi ultrasonici e analisi DIC) e distruttivi (test di flessione) su lastre di marmo bianco di Carrara in condizioni naturali e dopo il trattamento termico (con temperature rispettivamente di 50 e 90 °C) e termo-chimico. I trattamenti termo-chimici sono stati eseguiti immergendo i campioni in una soluzione contenente acido solforico, in concentrazione 10^{-6} mol/l, con pH = 5 per simulare il comportamento della pioggia acida, a temperature costanti, per una settimana.

Durante il test di flessione, condotto in controllo di deformazione, a cui è stato accoppiato un trasduttore di spostamento induttivo, sono stati acquisiti fotogrammi con intervallo temporale fisso.

Grazie alla misura della velocità ultrasonica, è stato possibile ottenere indicazioni sulla **variabilità del naturale** che può dirsi del 10%, ordine di grandezza che ai fini ingegneristici risulta accettabile.

Successivamente il **trattamento termico** si riscontra in media un abbassamento della velocità delle onde ultrasoniche V_P e V_S , con l'aumentare della temperatura del trattamento. La differenza più significativa risulta dal riscaldamento a 90°C con una perdita media di circa 980 m/s per le V_P e 400 m/s per le V_S . Conseguentemente le stime analitiche del modulo elastico e di taglio diminuiranno.

Le prove di flessione hanno registrato una riduzione di resistenza meccanica che si attesta in media al 20% nei campioni trattati termicamente a 50°C e attorno al 25% per quelli a 90°C.

I risultati concordano con l'aumento delle micro-cricche interne causate dal riscaldamento che rallentano progressivamente il tempo di primo arrivo dell'onda ultrasonica. Inoltre la diminuzione del rapporto V_P/V_S comporta un cambiamento delle proprietà meccaniche.

Nei campioni che hanno subito un **trattamento termico e chimico**, l'analisi ad ultrasuoni ha riscontrato una riduzione di E_{din} poco superiore al solo trattamento termico.

La prova di flessione, al contrario, mostra un netto calo di resistenza, specie nel meccanismo di aggressione a temperatura più elevata: la stima di riduzione dei parametri elastici rispetto ai campioni non condizionati risulta molto significativa poiché mediamente si attesta sul 40% ottenuto a 50°C, fino ad arrivare al 70% dei 90°C.

Considerati i valori ottenuti nel trattamento termico, confrontando i target di temperatura equivalenti, la perdita di resistenza è più che raddoppiata nell'ultima sperimentazione.

In generale si può asserire che il progressivo aumentare della temperatura, combinato all'effetto prodotto dalla soluzione acida, comporta significative modificazioni ai moduli elastici ricavati.

Altresì è da notare come non vi sia una corrispondenza diretta tra i dati di modulo elastico ottenuti con prova ad ultrasuoni e quelli ricavati dai test di flessione per bassi livelli deformativi.

Confrontando le diminuzioni dei moduli E_{S50} ottenuti dai due diversi condizionamenti, la legge esponenziale cambia significativamente, accentuata dall'umidità e dall'acidità del trattamento.

I trattamenti eseguiti hanno quindi portato a variazioni misurabili: in generale, per ciascun meccanismo di alterazione, è stata osservata una progressiva degradazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei campioni di marmo. In particolare, un marcato calo della resistenza a trazione, riflesso da un'ampia variazione della velocità dell'onda P e S, è stato riscontrato in campioni trattati chimicamente alla temperatura target pari a 90 °C.

Relazionando temporalmente i dati di carico del test di flessione, l'analisi effettuata con la DIC ha consentito di ricavare le curve di tensione-deformazione di un pixel selezionato nei fotogrammi, in corrispondenza dell'estensimetro.

Tuttavia la scarsa deformabilità del materiale, la sua tessitura omogenea e la bassa qualità di acquisizione dovuta ad una cattura video continua non hanno consentito, nella prima serie di test, di descrivere adeguatamente i campioni.

Sono state dunque effettuate ottimizzazioni per aumentare la qualità di acquisizione, un'analisi di sensibilità dei parametri del programma ma, tuttavia, i risultati dell'elaborazione sono risultati molto rumorosi: le curve ottenute risultano oscillanti e non consentono misure affidabili del modulo elastico, né tantomeno sono confrontabili con le deformazioni registrate degli estensimetri.

Ciò consente di stabilire che la tecnica DIC applicata a materiali con comportamento rigido-fragile come quello evidenziato dal marmo di Carrara nelle prove meccaniche eseguite, non genera misure affidabili.

Il lavoro di questa tesi rientra in uno studio più ampio, in cui saranno effettuate ulteriori prove con soluzioni chimiche differenti, o, eventualmente con innalzamento delle temperature per simulare gli effetti di un incendio sul rivestimento di un edificio.

In quest'ottica la tesi vuole dunque essere una base di partenza per lo sviluppo di un eventuale trattamento che possa ridurre la porosità superficiale, così da ridurre l'effetto delle aggressioni acide anche in edifici di rilevanza storica.

BIBLIOGRAFIA

- Logan J.M., Hadedt M., Lehnert D., Denton M. (1993) - A case study of the properties of marble as building veneer. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*, 30:1531–1537.
- Royer Carfagni G. (1999) - On the thermal degradation of marble. *Int J Rock Mechanics*, 36:119–126.
- S. Siegesmund, J. Ruedrich, A. Koch (2008) - Marble bowing: comparative studies of three different public building facades. *Environmental Geology*, 56:473–494.
- Koch A., Siegesmund S. (2004) - The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46:350–363.
- Jornet A., Rück P. (2000) - Bowing of Carrara marble slabs: a case study. *Proceedings of the international congress “Quarry Laboratory Monument”, Pavia*: 355–360.
- Grimm, W.D. (1999) - Observations and reflections on the deformation of marble objects caused by structural breaking-up. *Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft*, 150:195-236.
- Rayleigh L. (1934) - The bending of marble. *For. Sec. R.S.:*266-279.
- Malaga K., Åkesson U., Lindqvist J., Schouenborg B. (2006) - Microscopic and macroscopic characterization of the porosity of marble as a function of temperature and impregnation. *Construction and Building Materials*, 20:939-947.
- Siegesmund, S., Ullemeyer K., Weiss T., Tschegg E. (2000) - Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *International Journal of Earth Sciences*, 89:170-182.
- Shushakova V., Fuller E., Siegesmund S. (2012) - Microcracking in calcite and dolomite marble: Microstructural influences and effects on properties. *Environmental Earth Sciences*, 69.
- Weiss T., Siegesmund S., Fuller E. (2003) - Thermal degradation of marble: Indications from finite-element modelling. *Building and Environment*, 38:1251-1260.
- Jornet A., Teruzzi T., Rück P. (2001) - Bowing of Carrara marble slabs: Comparison between natural and artificial weathering.
- Ferrero A. M., Migliazza, M., Spagnoli A. (2009) - Un modello teorico per lo studio del fenomeno di imbarcamento in rivestimenti di marmo soggetti a cicli termici. *Convegno Nazionale IGF XX, Torino 24-26 giugno 2009*:218-224.
- Atkinson B. K. (1984) - *Introduction to fracture mechanics and its geophysical applications*.
Department of Geological Sciences, London
- Blaber J. et al. (2015) - Ncorr analysis of DIC challenge datasets. *Matlab Software*
- Caselle C., Umili G., Bonetto S., Ferrero A. M. (2019) - Application of DIC analysis method to the study of failure initiation in gypsum rocks. *Géotechnique Letters*.

Nguyen T.L., Hall S., Vacher, P., Viggiani G. (2011) - Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation', *Tectonophysics*, 503:117-128.

Pan B., Anand A., Huimin X., Jianxin G. (2009) - Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 47:865-874.

Stirling RA, Simpson DJ, Davie CT (2013) - The application of digital image correlation to Brazilian testing of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60:1-11

Wong L., Einstein H. (2009) - Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 1. Macroscopic Observations and Interpretation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42:475-511.

Yang G., Cai Z., Zhang X., Fu D. (2015) - An experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 73

Guy N., Seyedi D.M., Hild F. (2018) - Characterizing Fracturing of Clay-Rich Lower Watrous Rock: From Laboratory Experiments to Nonlocal Damage-Based Simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51:1777-1787.

Zhang H., Huang G., Song H., Kang Y. (2012) - Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 96:667-675.

Shen, Baotang (2013) - Introduction to Rock Fracture Mechanics. Springer:5-18.

Hoke G., Turcotte, D. (2004) - Weathering of stones due to dissolution. *Environmental Geology*, 46:305-310.

Yardley, B., Lloyd, G. (1989). An application of cathodoluminescence microscopy to the study of textures and reactions in high-grade marbles from Connemara, Ireland. *Geological Magazine*, 126:333-337.

Compton R., Brown C. (1994) - The inhibition of calcite dissolution/Precipitation: Mg^{2+} Cations. *Journal of Colloid and Interface Science*, 165:445-449.

Pastero L., Giustetto R., Aquilano D. (2017) - Calcite passivation by gypsum: The role of the cooperative effect. *CrystEngComm*. 19.

Renato Lancellotta (2010) – Geotecnica: Teoria dell'elasticità. Zanichelli, Terza edizione Cap. 2.20

Madaï et al. (2013) - Richiami di teoria di propagazione delle onde sismiche.

Petrucci G. (2018) - Lezioni di costruzioni di macchine.

ASTM C880-98 (2000): 'Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.

Proceq (2017) - Pundit Lab – Operating Instructions.

Tecer, L.H. (1999). Laboratory Experiments on the Investigation of the Effects of Sulphuric Acid on the Deterioration of Carbonate Stones and Surface Corrosion. *Water, Air, and Soil Pollution*, 114:1-12.

Singh T.N., Sharma P., Khandelwal M. (2007) - Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66:81-87

Feigao X., Dan L. (2015) - Effect of different types of acid rain on carbonate stone. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24.

Eyssautier-Chuine S., Marin B., Thomachot-Schneider C., Fronteau G., Schneider A., Gibeaux S., Vazquez P. (2016). Simulation of acid rain weathering effect on natural and artificial carbonate stones. *Environmental Earth Sciences*, 75:1-19.

SCHEDE TECNICHE

In questo paragrafo vengono allegate le schede tecniche di ciascun provino analizzato nella tesi. I risultati schematizzati sono ottenuti dalle diverse prove impiegate nella campagna sperimentale, sui vari campioni di marmo: sono presenti i dati ricavati dalle prove ultrasoniche e dai test di flessione.

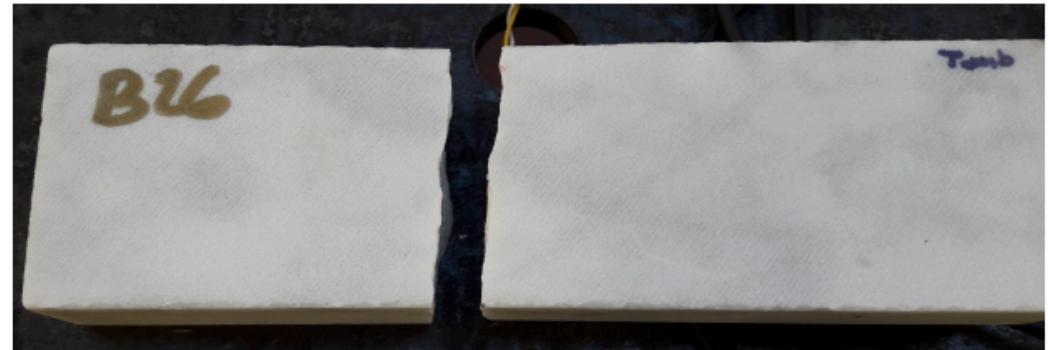
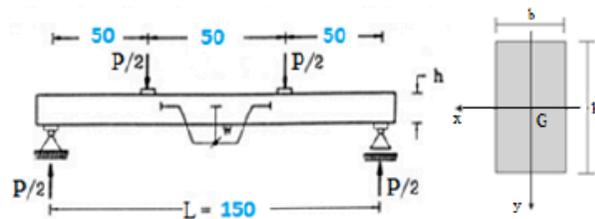
Per quest'ultima prova, a causa della variazione di schema di carico (da tre a quattro punti), si specificano le quote imposte per portare a rottura ciascun provino.

Per questioni di impaginazione si procede a riportarli a partire dalla pagina successiva.

Campione B26

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)



Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
985,8	19,20	59,96	31,62	363942	2708,7

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5425	2830	1,92	0,31	56,97	21,69

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [kN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μe]) sec} [GPa]
24/10/2018	11,06	0,0738	258,76	0,001	606	276,40	78,69	99,77

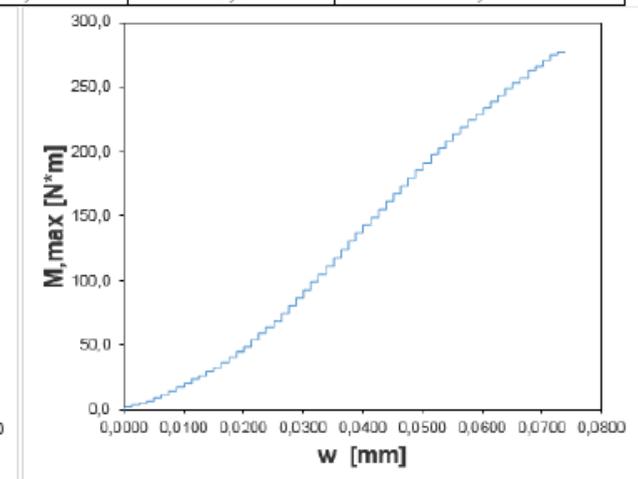
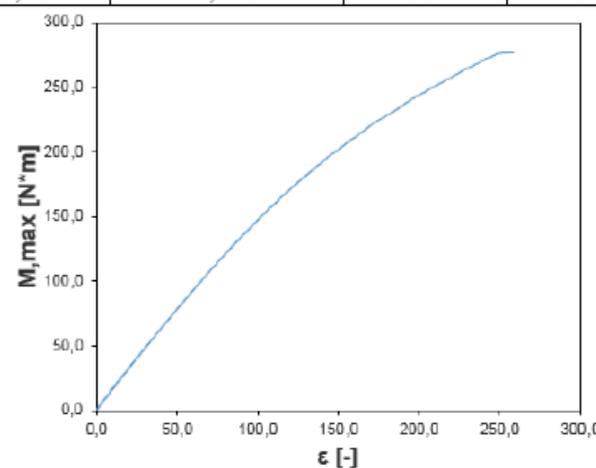
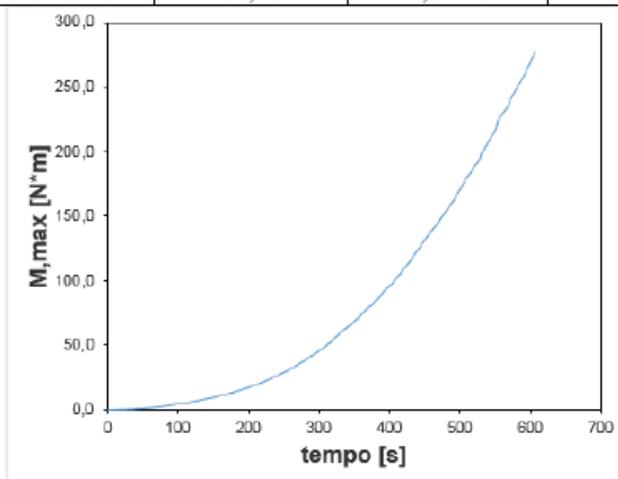


Figura 1 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Campione B33

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

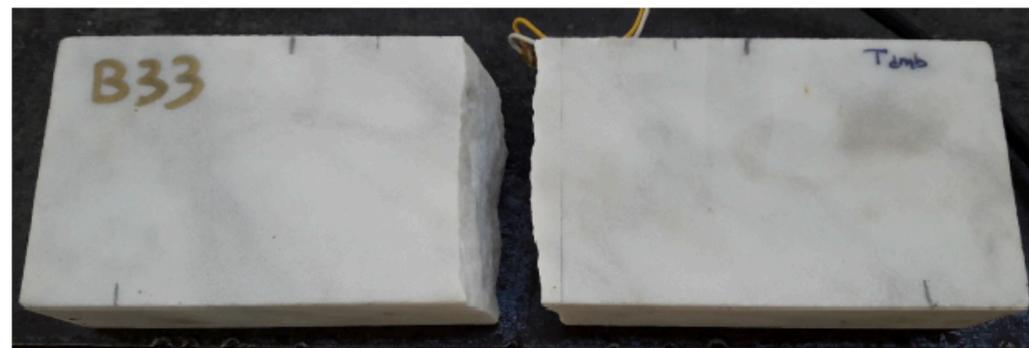
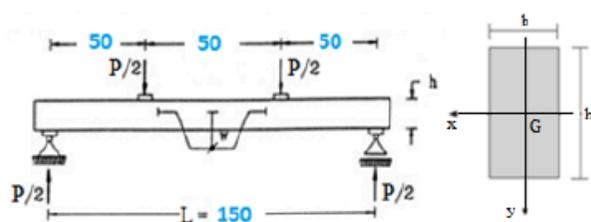


Figura 2 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

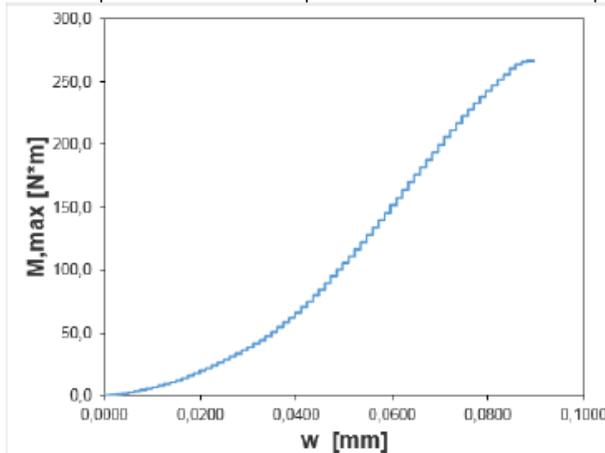
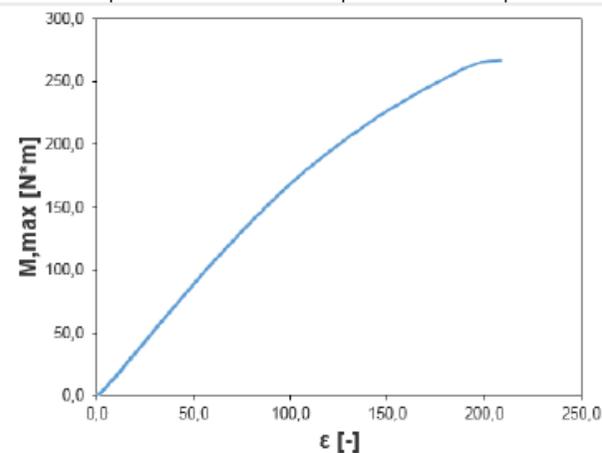
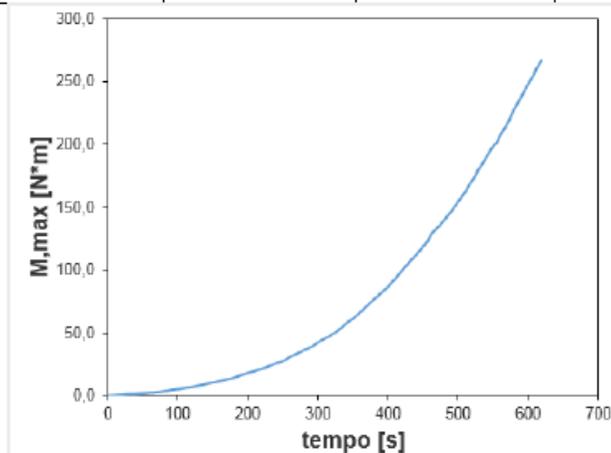
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
973,8	19,30	60,02	31,09	360093	2704,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5715	3254	1,76	0,26	72,17	28,63

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
25/10/2018	10,67	0,0895	208,45	0,001	619	266,70	92,94	80,09



Campione B43

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

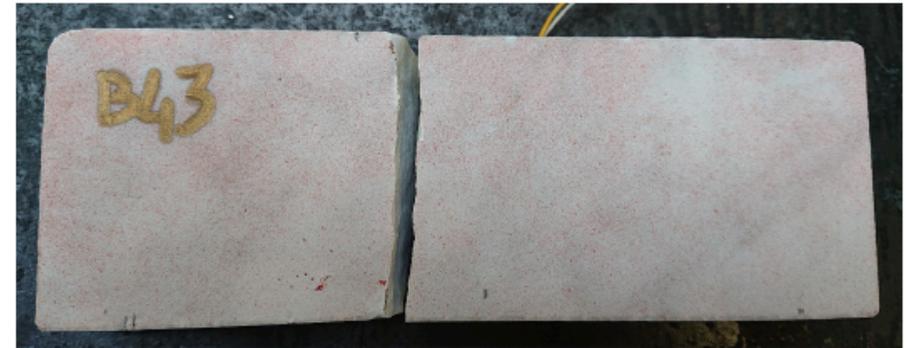
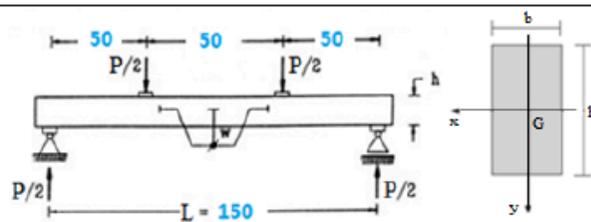


Figura 3 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

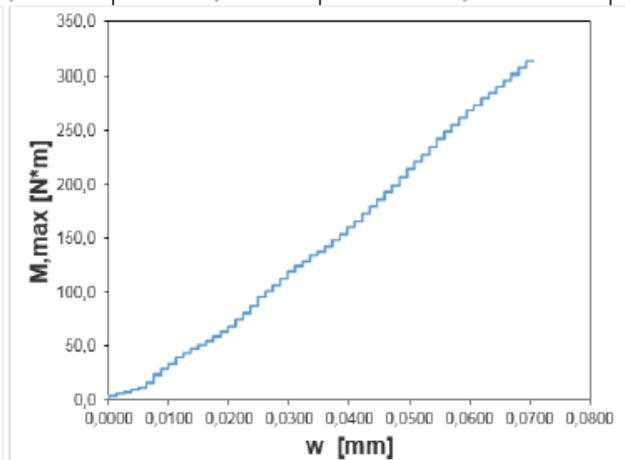
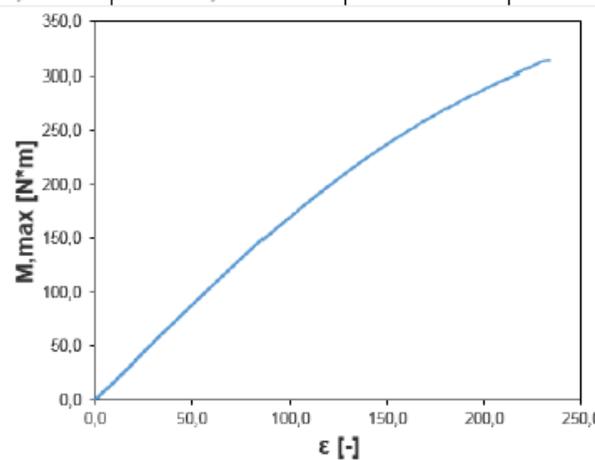
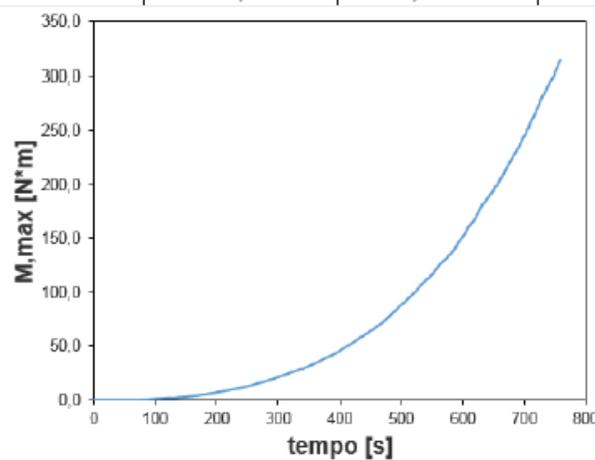
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
969,1	19,35	60,08	30,73	357280	2712

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5491	2891	1,90	0,31	59,33	22,67

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μe]) sec} [GPa]
23/01/2019	12,55	0,0707	233,75	0,001	759	313,70	93,23	93,72



Campione B4

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

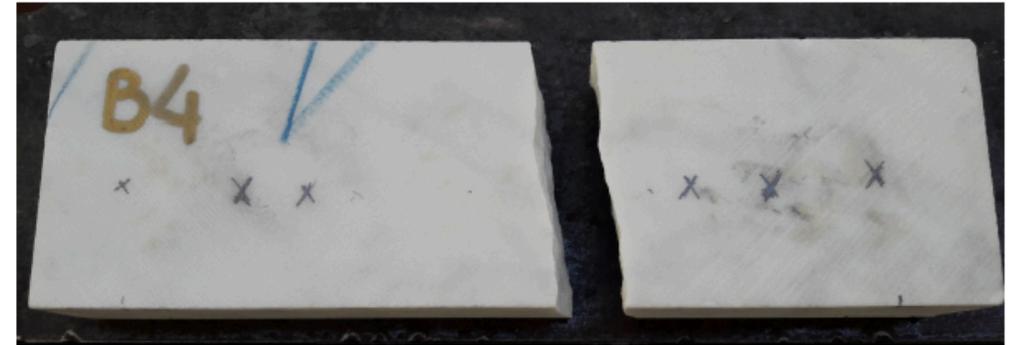
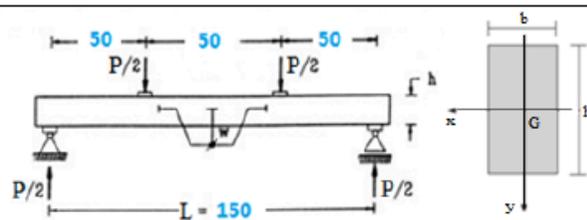


Figura 4 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

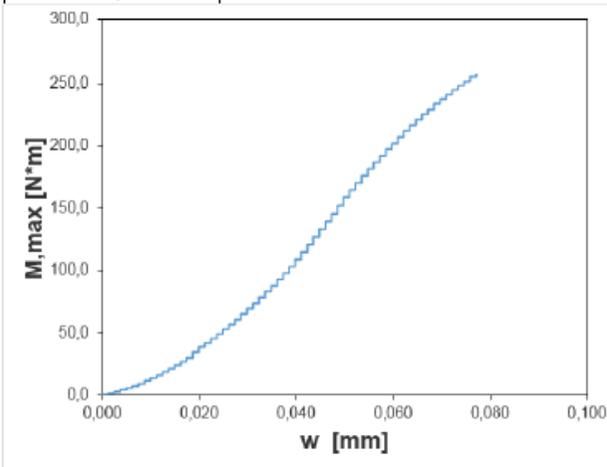
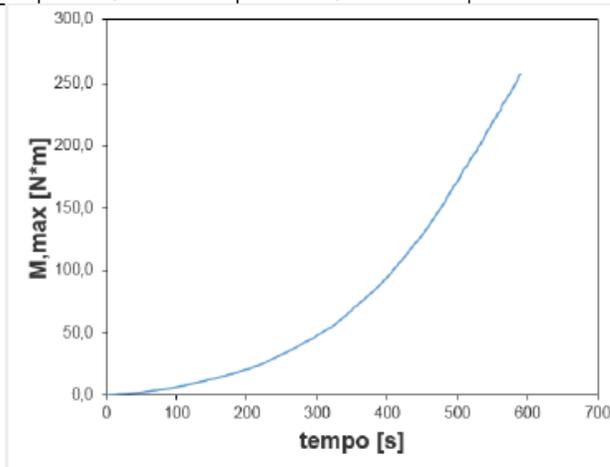
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
966,2	19,35	59,86	30,83	357130	2705

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5815	2551	2,28	0,38	48,62	17,61

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]
25/10/2018	10,28	0,0771	0,001	590	257,10



Campione B8

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

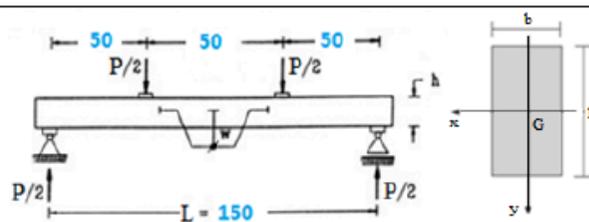


Figura 5 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

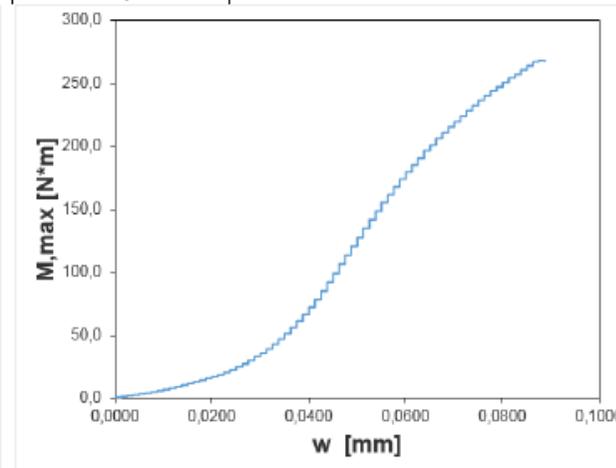
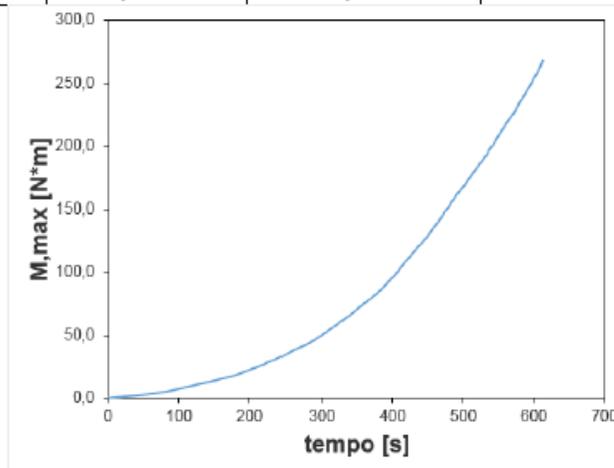
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
969,4	19,35	60,13	30,79	358188	2706

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5389	3221	1,67	0,22	68,62	28,07

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

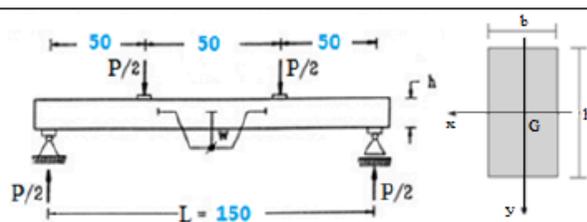
Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]
25/10/2018	10,74	0,0889	0,001	613	268,40



Campione B38

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)



Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
962,6	19,23	59,97	30,80	355120	2711

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5484	2892	1,90	0,31	59,29	22,67

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]
25/10/2018	11,03	0,0989	0,001	600	275,80

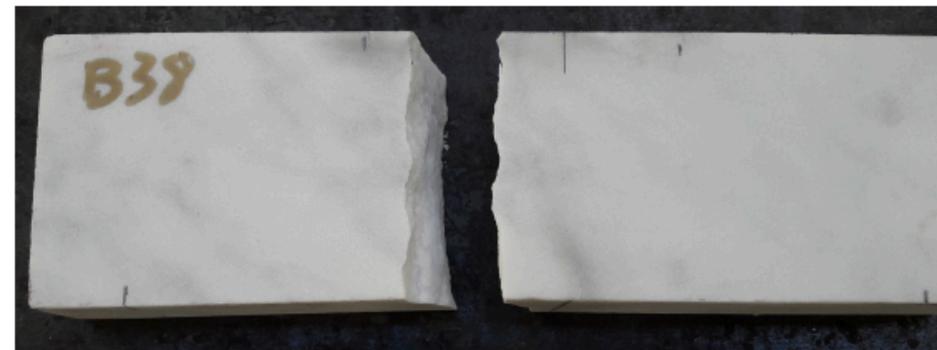
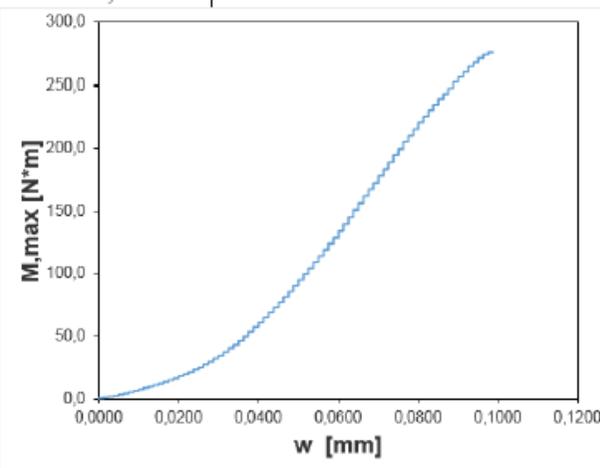
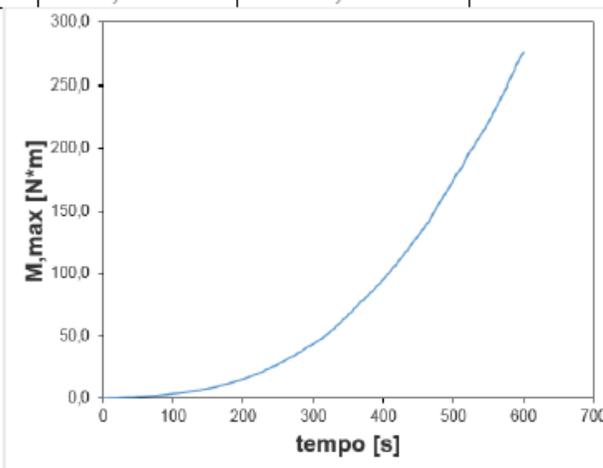


Figura 6 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Campione B39

Provino non condizionato: T 20°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

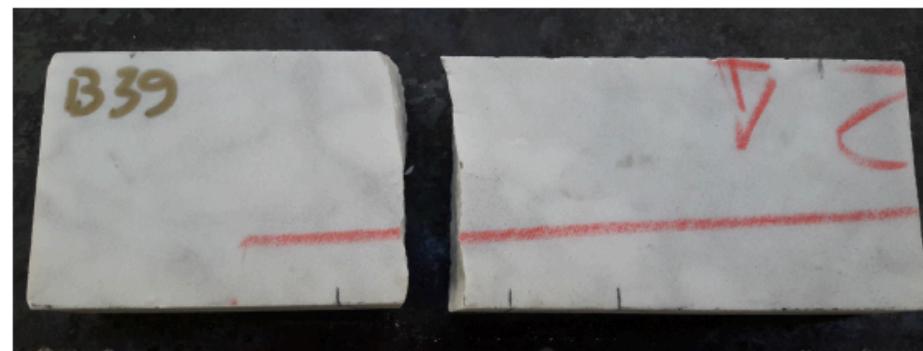
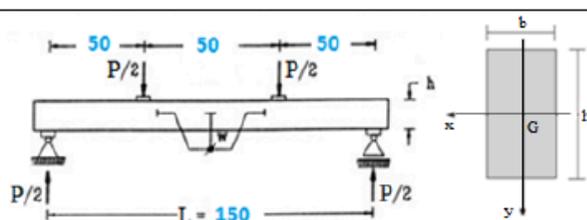


Figura 7 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

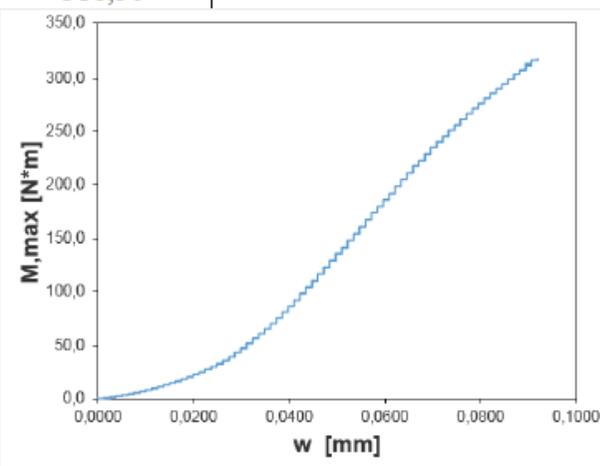
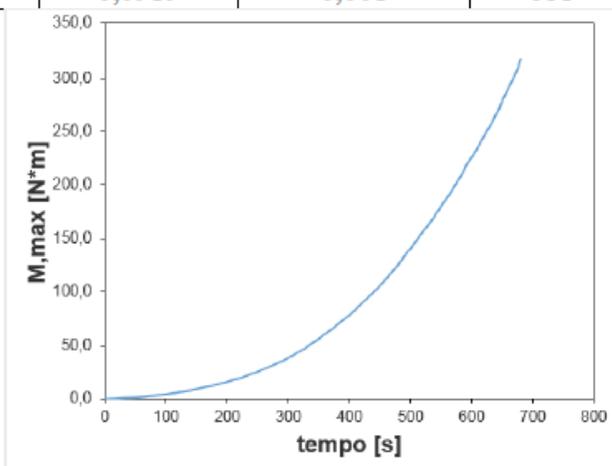
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
999,5	19,25	59,81	31,97	368055	2716

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5489	2906	1,89	0,31	59,86	22,93

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]
25/10/2018	12,66	0,0919	0,001	681	316,50



Campione B19

Provino trattato termicamente: T 50°C

Schema della prova a flessione.
(Quote in mm)

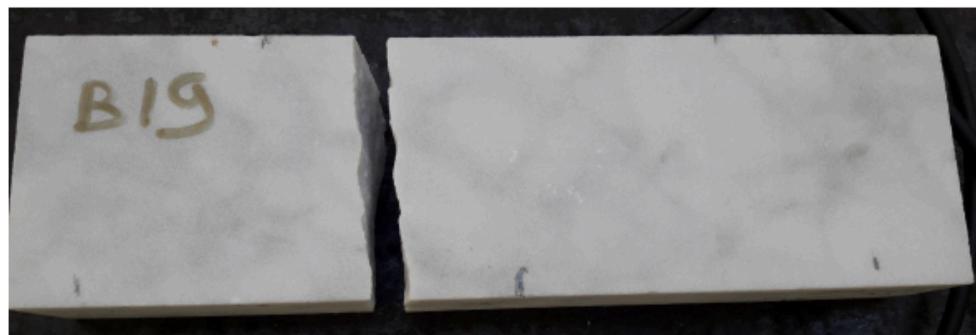
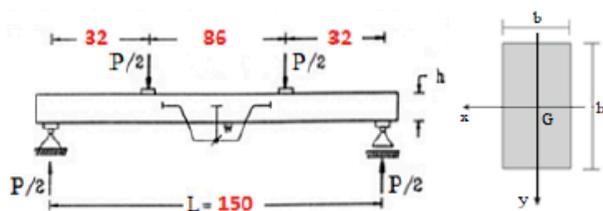


Figura 8 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
964,6	19,23	60,05	31,03	358200	2693

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5556	3061	1,82	0,28	64,70	25,23

Caratteristiche provino alterato termicamente

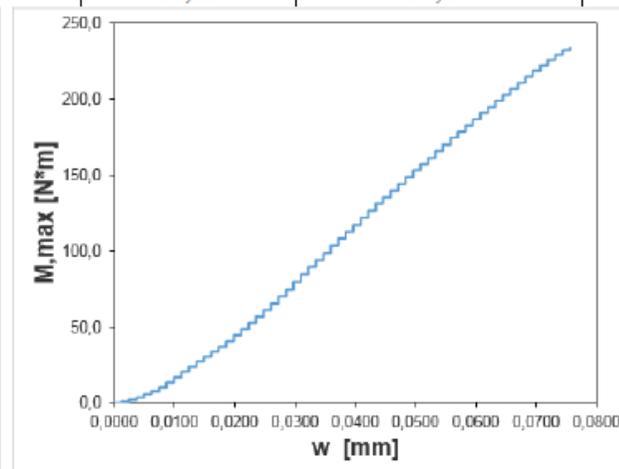
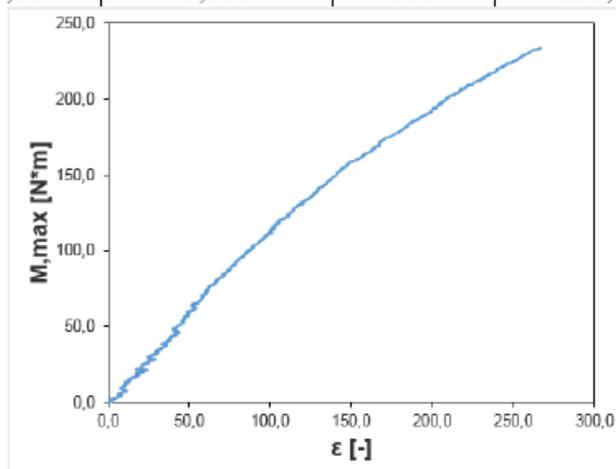
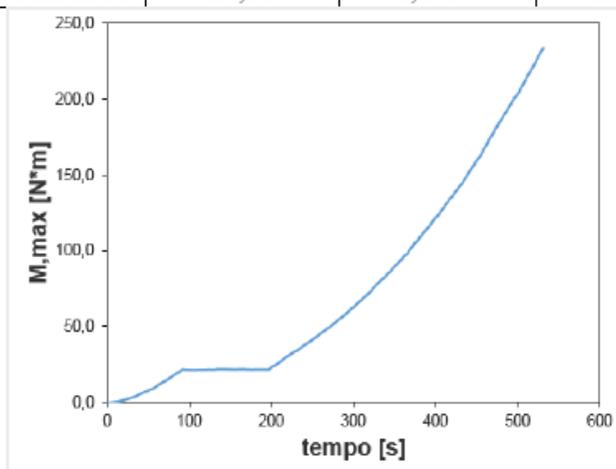
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
963,8	19,23	60,05	31,03	358200	2690,7

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5516	2836	1,94	0,32	57,15	21,64

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [kN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
24/10/2018	14,58	0,0757	267,18	0,001	531	233,22	60,20	57,07



Campione B32 (scartato)

Provino trattato termicamente: T 50°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

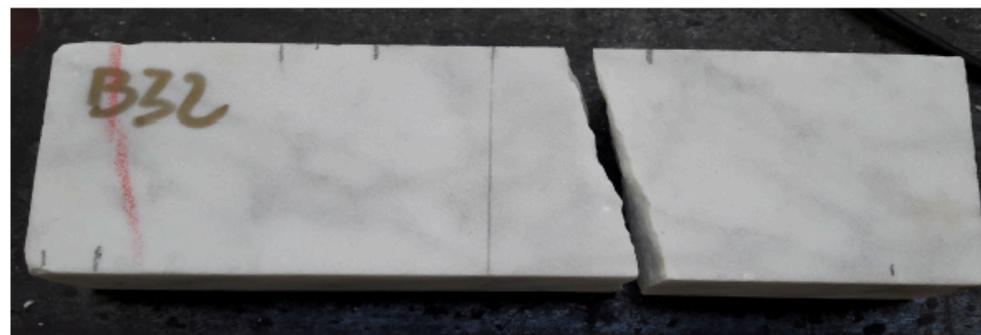
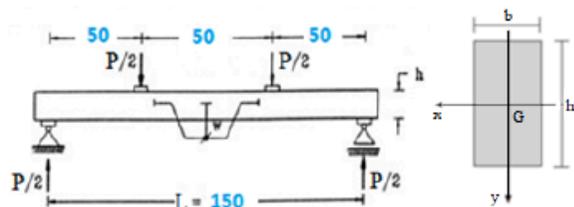


Figura 9 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
980,5	19,25	59,93	31,45	362766	2703

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5769	3068	1,88	0,30	66,29	25,44

Caratteristiche provino alterato termicamente

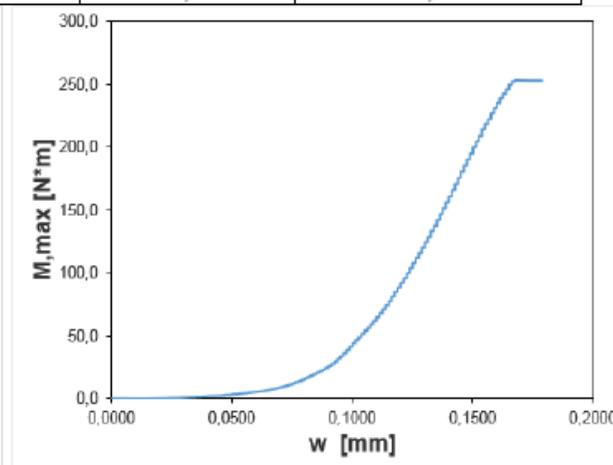
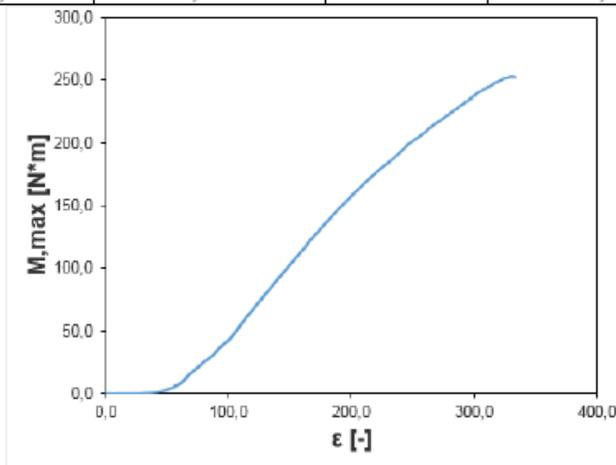
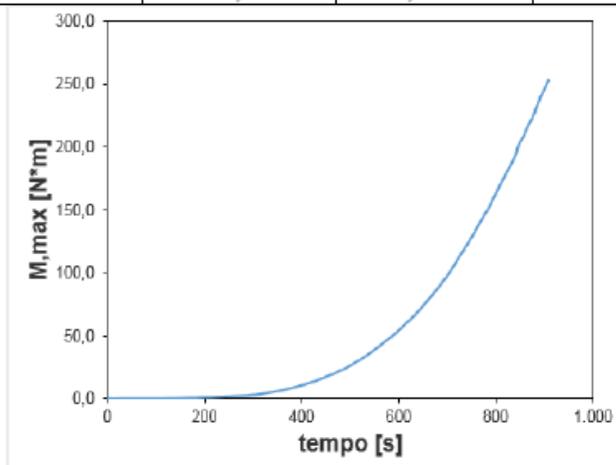
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
979,7	19,25	59,93	31,45	362766	2700,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5227	2757	1,90	0,31	53,67	20,53

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 sec}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
24/10/2018	10,12	0,1788	333,45	0,001	907	252,90	39,48	1,03



Campione B42

Provino trattato termicamente: T 50°C

Schema della prova a flessione.
(Quote in mm)

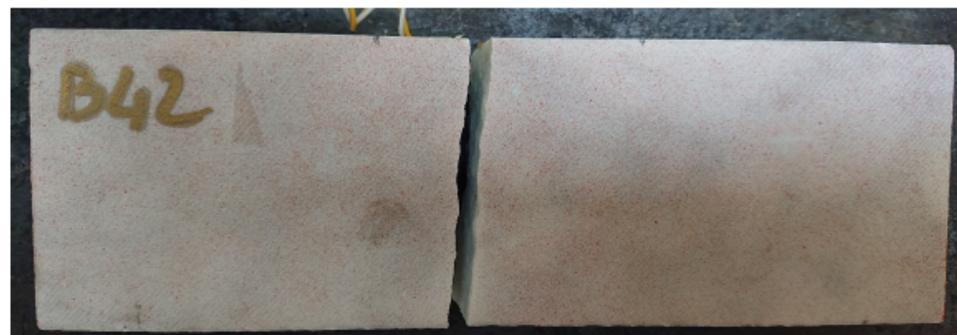
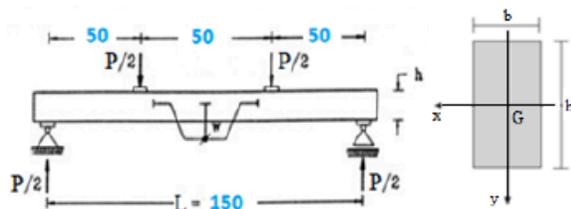


Figura 10 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
992	19,35	59,96	31,54	365944	2711

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5797	3044	1,90	0,31	65,80	25,12

Caratteristiche provino alterato termicamente

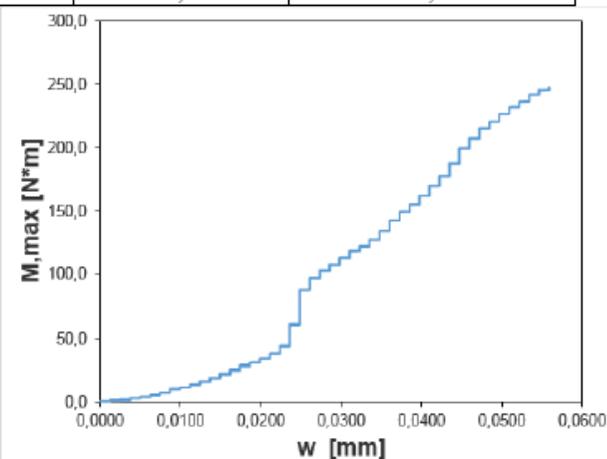
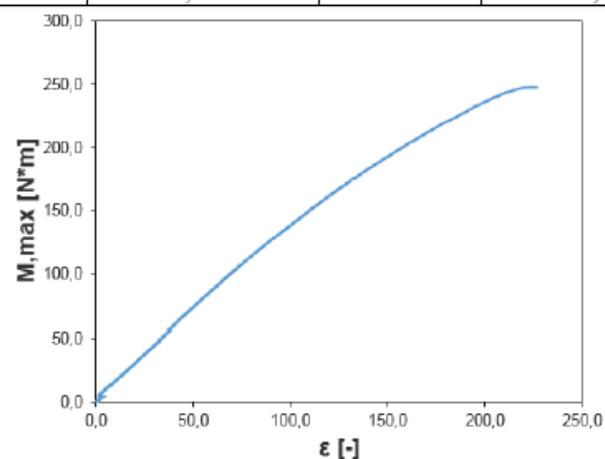
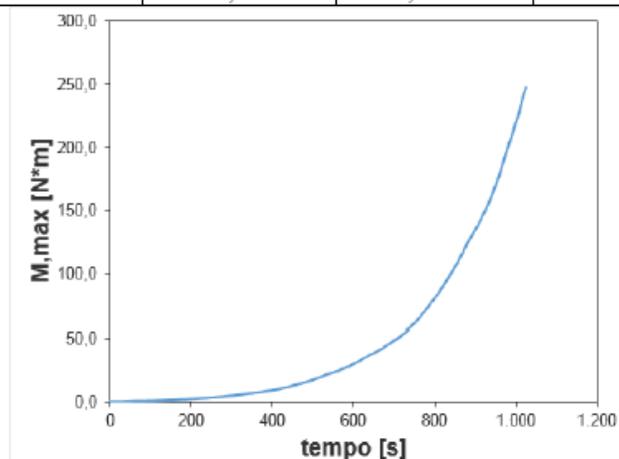
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
991,4	19,35	59,96	31,54	365944	2709,2

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5102	2778	1,84	0,29	53,91	20,91

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [kN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 sec}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \mu\epsilon)}$ sec [GPa]
23/01/2019	9,90	0,0559	226,56	0,001	1026	247,60	74,83	90,13



Campione B45

Provino trattato termicamente: T 50°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

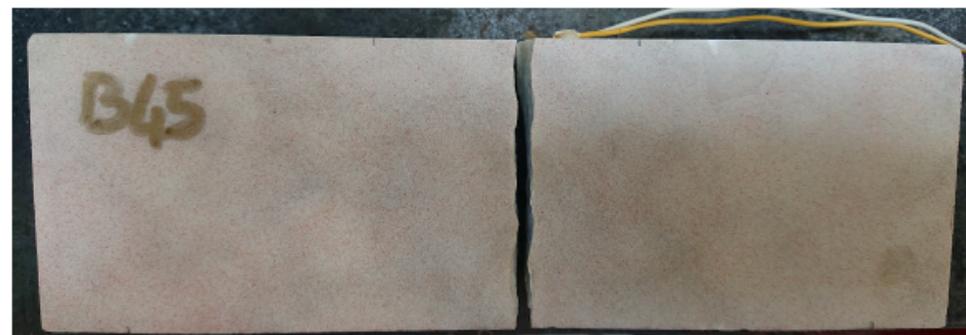
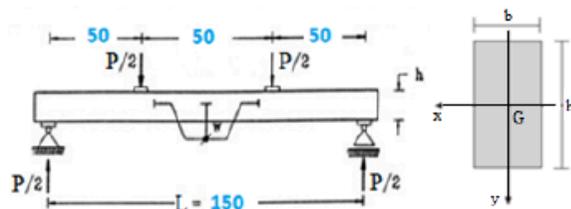


Figura 11 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
1001,6	19,48	59,98	31,65	369716	2709

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5791	3080	1,88	0,30	66,95	25,69

Caratteristiche provino alterato termicamente

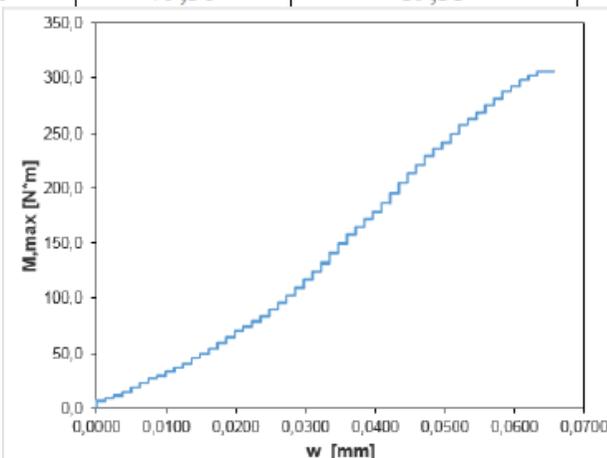
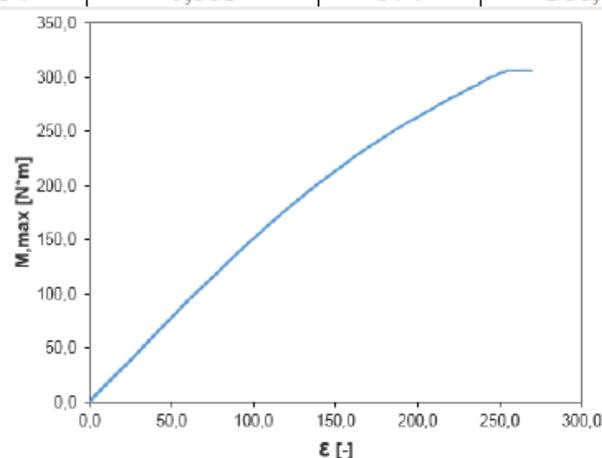
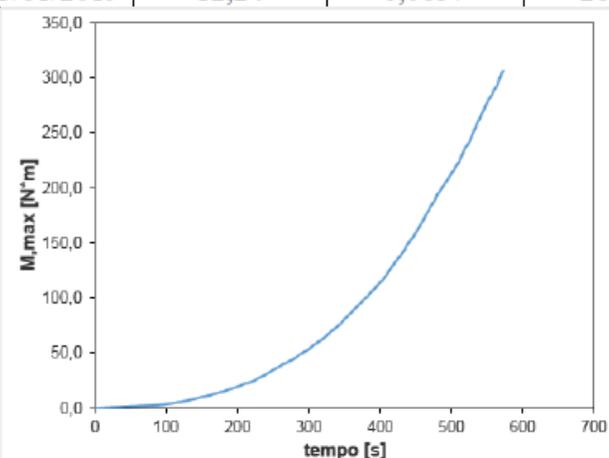
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
1000,8	19,48	59,98	31,65	369716	2706,95

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5556	2753	2,02	0,34	54,87	20,52

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \text{ } \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
23/01/2019	12,24	0,0657	269,34	0,001	574	306,00	79,36	89,33



Campione B18 (scartato)

Provino trattato termicamente: T 90°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

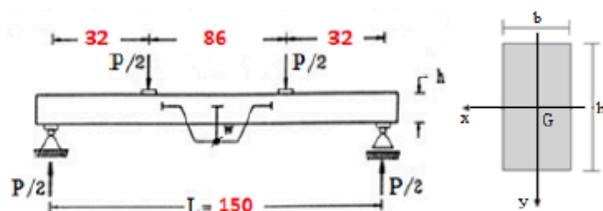


Figura 12 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
960,7	19,23	60,09	30,69	354549	2709,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5209	2891	1,8	0,28	57,86	22,65

Caratteristiche provino alterato termicamente

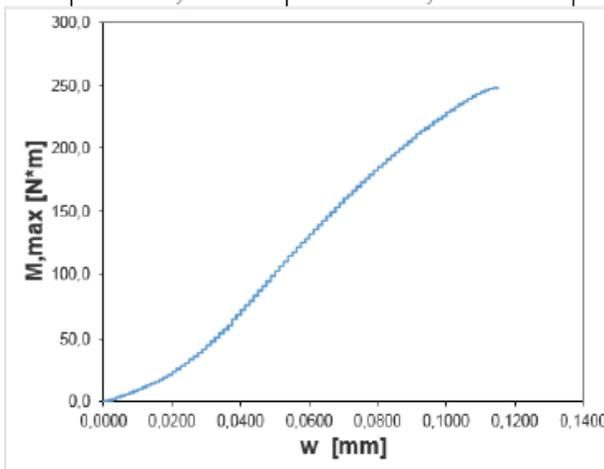
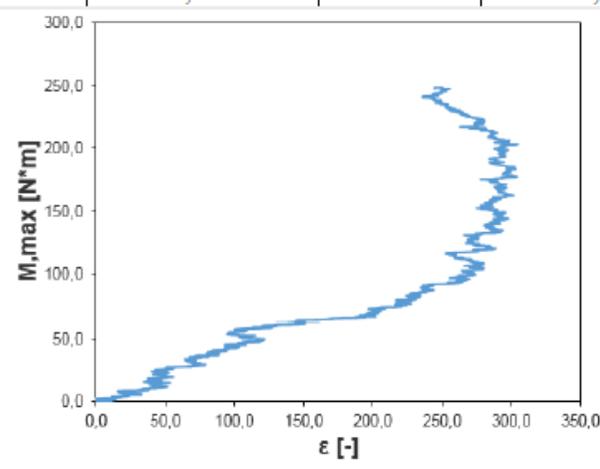
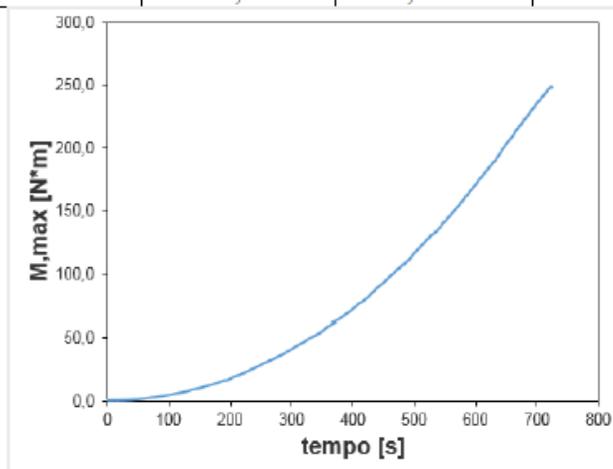
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
960,1	19,23	60,09	30,69	354549	2707,9

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4387	2479	1,77	0,27	42,12	16,64

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \text{ } \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
24/10/2018	15,54	0,1149	285,64	0,001	724	248,58	24,36	17,63



Campione B24

Provino trattato termicamente: T 90°C

Schema della prova a flessione.
(Quote in mm)

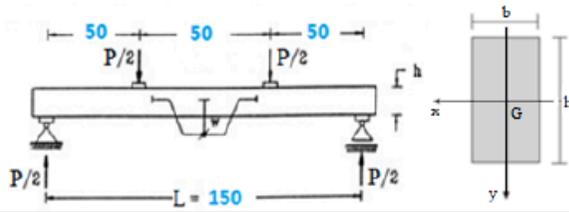


Figura 13 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
987,1	19,20	60,05	31,68	365307	2702

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5509	2740	2,01	0,34	54,18	20,28

Caratteristiche provino alterato termicamente

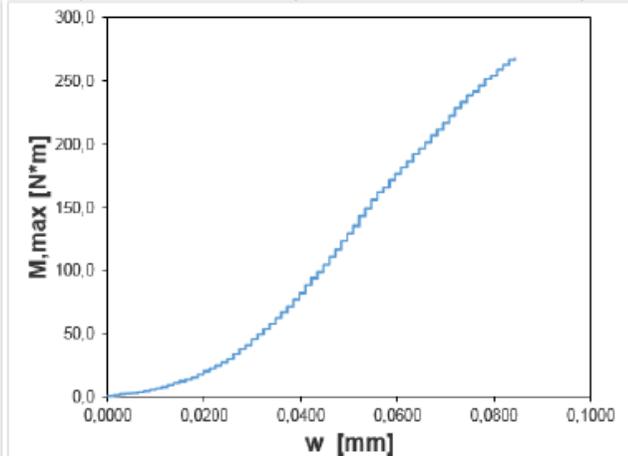
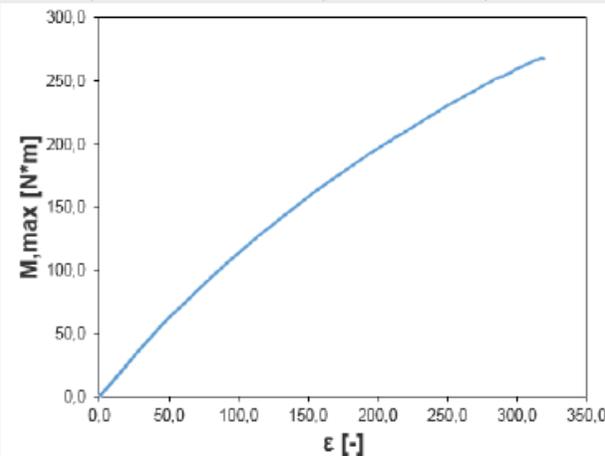
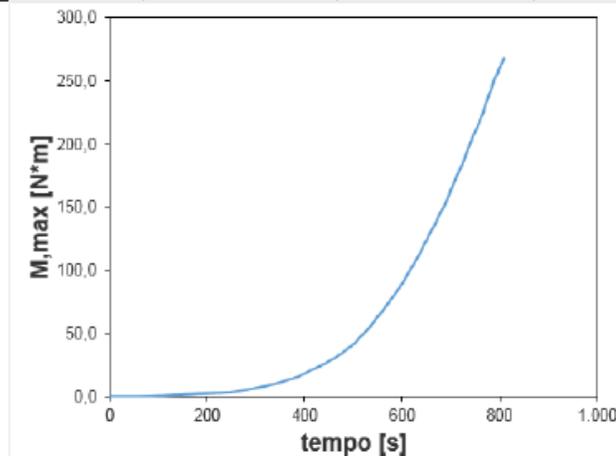
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
986,4	19,20	60,05	31,68	365307	2700,2

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4348	2565	1,70	0,23	43,81	17,77

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [KN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \text{ } \mu\epsilon)} \text{ sec}$ [GPa]
23/01/2019	10,71	0,0843	319,55	0,001	809	267,80	57,72	69,46



Campione B34

Provino trattato termicamente: T 90°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

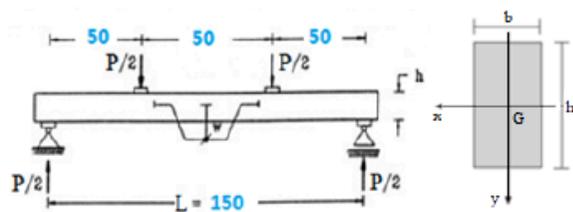


Figura 14 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
960,3	19,28	60,26	30,56	356873	2706

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5520	2963	1,86	0,30	61,65	23,76

Caratteristiche provino alterato termicamente

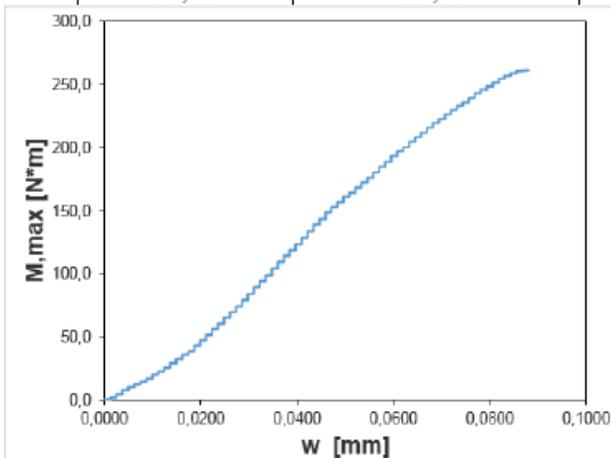
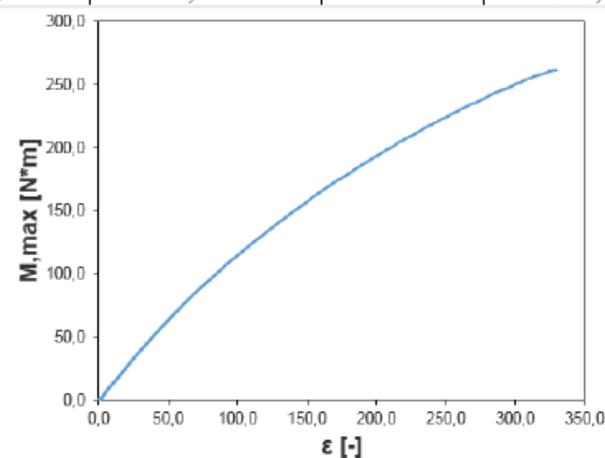
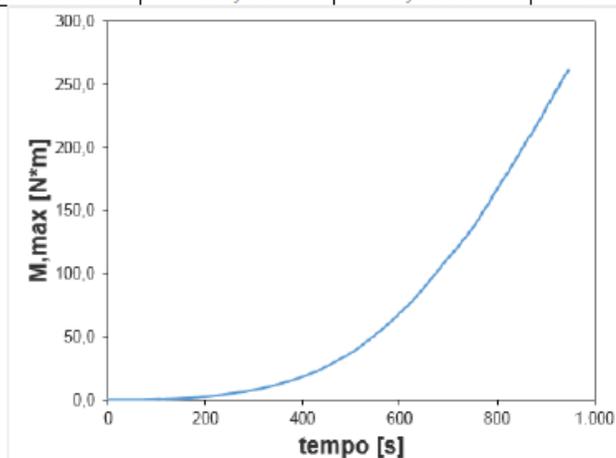
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
959,7	19,28	60,26	30,56	356873	2704,9

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4540	2419	1,88	0,30	41,20	15,82

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
23/01/2019	10,44	0,0880	329,95	0,001	947	261,10	59,75	69,95



Campione B36

Provino trattato termicamente: T 90°C

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

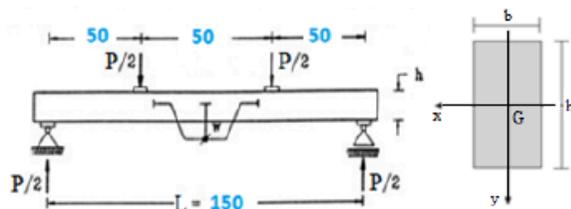


Figura 15 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
966,1	19,23	59,98	30,92	356552	2709,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5558	2963	1,88	0,30	61,91	23,78

Caratteristiche provino alterato termicamente

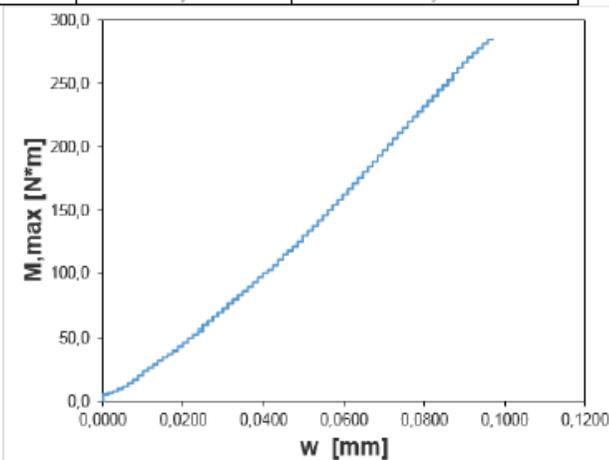
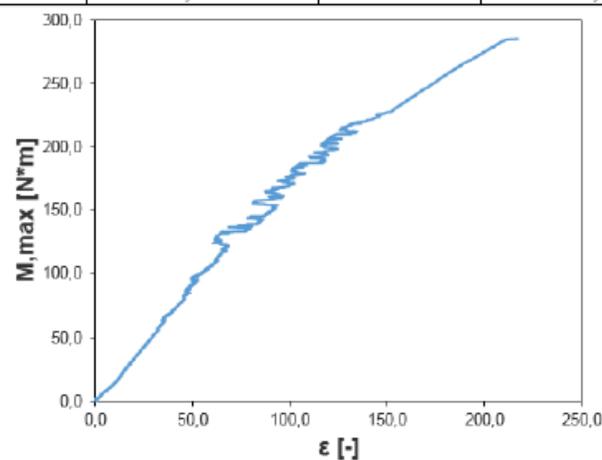
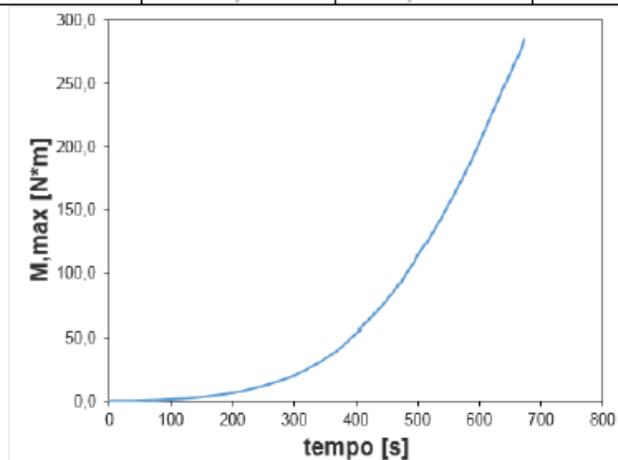
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
965,3	19,23	59,98	30,92	356552	2707,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5034	2632	1,91	0,31	49,21	18,75

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E($\epsilon=10$ [με]) sec[GPa]
23/01/2019	11,42	0,0970	216,89	0,001	673	285,40	93,25	72,89



Campione B40

Provino trattato termicamente: T 90°C

Schema della prova a flessione.
(Quote in mm)

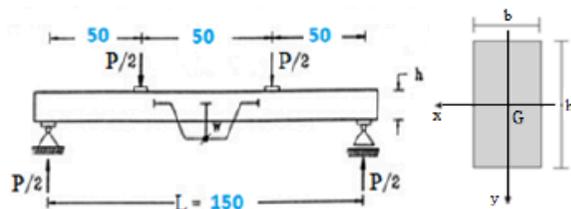


Figura 16 Rottura del campione post prova di flessione su 4 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
1006,1	19,38	59,85	32,11	372325	2702

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5660	3061	1,85	0,29	65,49	25,32

Caratteristiche provino alterato termicamente

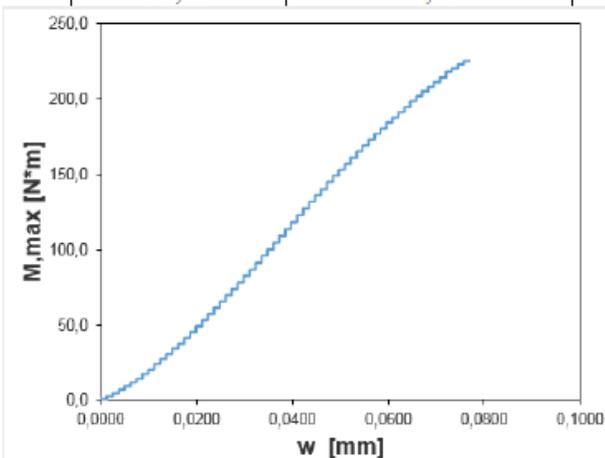
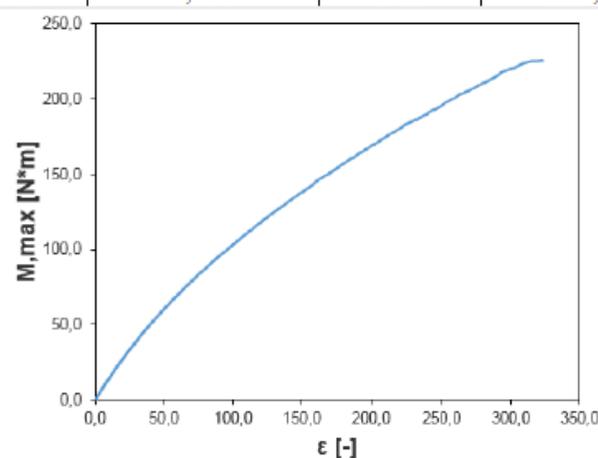
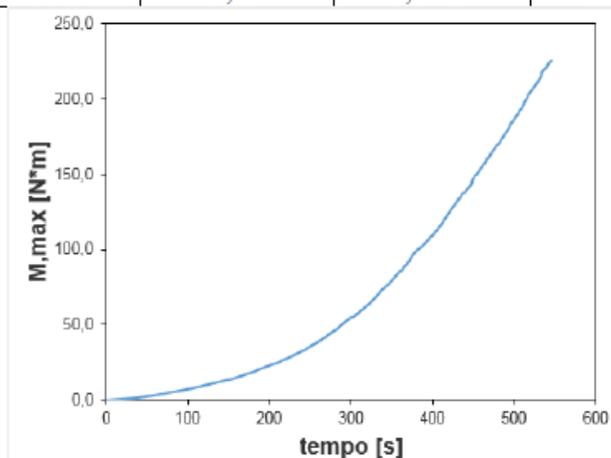
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
1005,3	19,38	59,85	32,11	372325	2700,06

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_P/V_S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4238	2521	1,68	0,23	42,08	17,16

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P_{max} [kN]	w_{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M_{max} [MPa]	$E_{50 \text{ sec}}$ [GPa]	$E_{(\epsilon=10 \mu\epsilon)}$ sec[GPa]
25/10/2018	9,03	0,0769	323,02	0,001	546	225,70	52,02	70,73



Campione B2

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

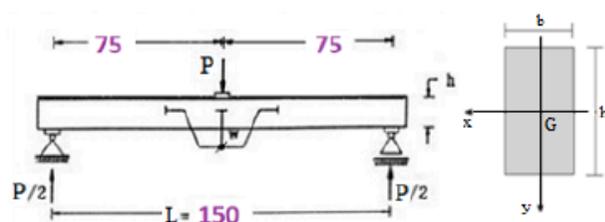


Figura 17 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
992	19,38	59,99	31,34	364267	2723,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
6143	3297	1,86	0,30	76,81	29,60

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

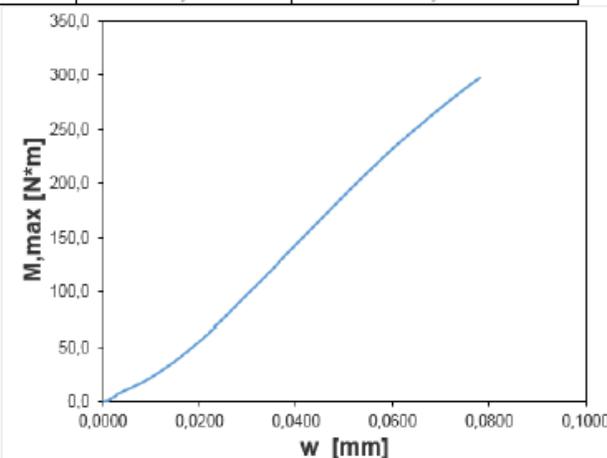
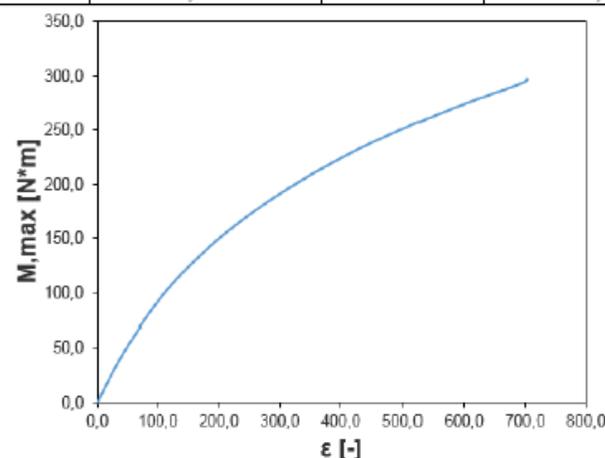
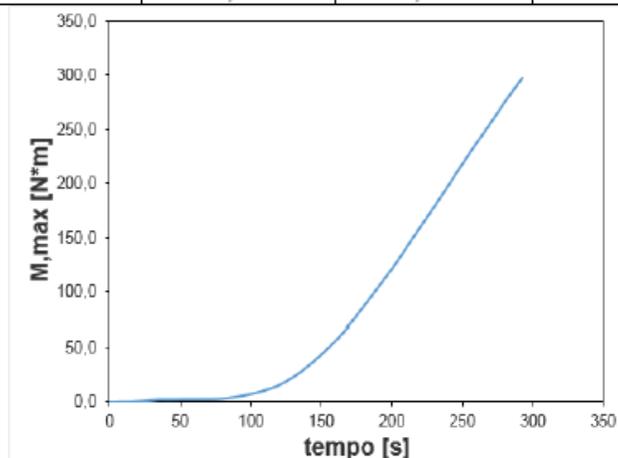
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
991,8	19,38	59,99	31,34	364267	2723

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5556	2970	1,87	0,30	62,44	24,02

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	7,93	0,078	703,27	0,001	293	297,33	40,33	60,45



Campione B3

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

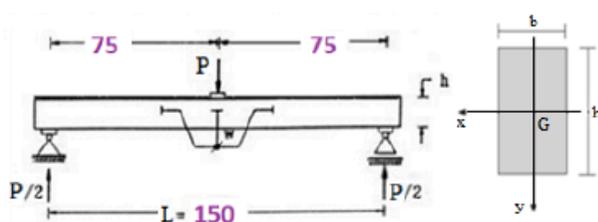


Figura 18 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
981,9	19,40	60,05	31,05	361645	2715,1

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5148	3293	1,56	0,15	67,93	29,44

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

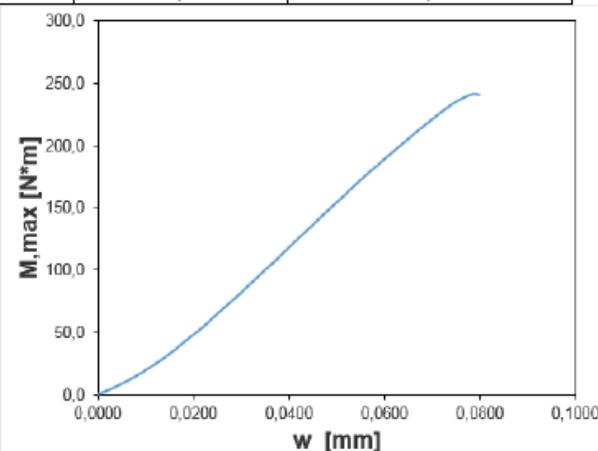
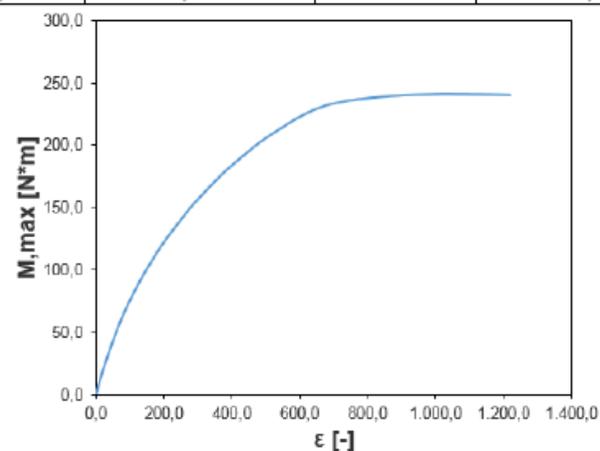
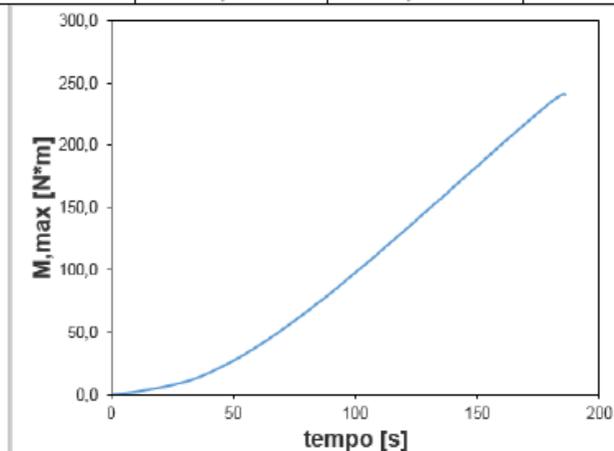
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
981,4	19,40	60,05	31,05	361645	2713,7

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5000	2885	1,73	0,25	56,49	22,59

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μe]) sec} [GPa]
30/05/2019	6,44	0,080	1219,05	0,001	186	241,50	33,01	52,45



Campione B11

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

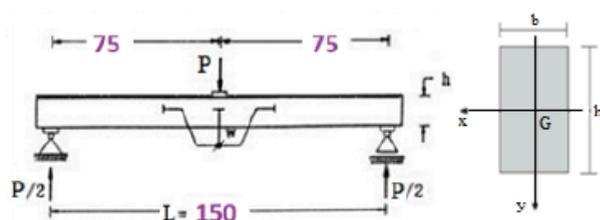


Figura 19 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
976,6	19,38	60,33	30,89	361091	2704,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5476	2804	1,95	0,32	56,24	21,26

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

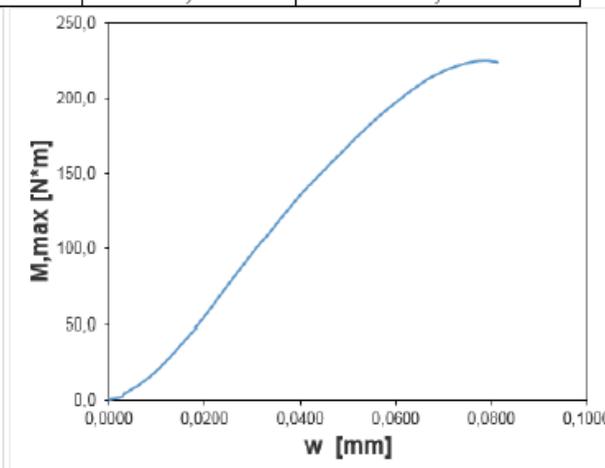
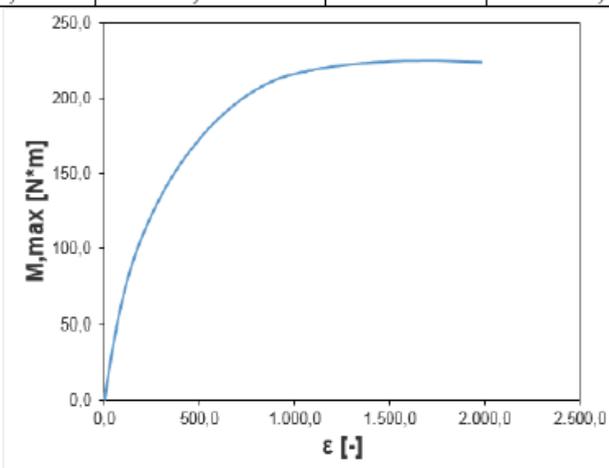
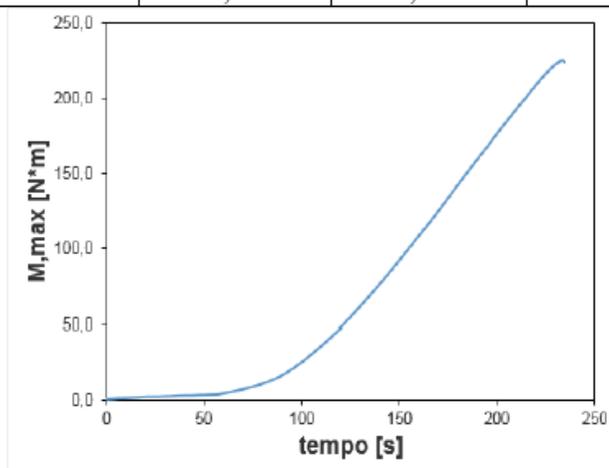
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
976,4	19,38	60,33	30,89	361091	2704,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5085	2836	1,79	0,27	55,43	21,75

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E($\epsilon=10$ [μe]) sec[GPa]
30/05/2019	6,00	0,081	1983,79	0,001	234	224,90	28,38	51,50



Campione B12 (scartato)

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
974,5	19,40	59,97	30,92	359738	2708,9

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5495	2936	1,87	0,30	60,72	23,35

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
974,5	19,40	59,97	30,92	359738	2708,9

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5109	2944	1,74	0,25	58,76	23,48

Il provino non è stato caratterizzato meccanicamente causa la sua rottura precedente la prova di flessione.

Campione B13

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

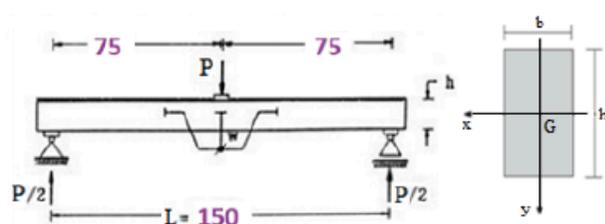


Figura 20 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
961,6	19,15	59,96	30,88	354623	2711,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5556	2982	1,86	0,30	62,58	24,11

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

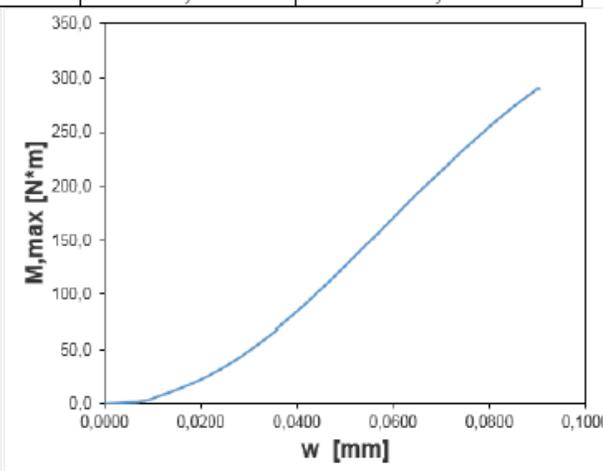
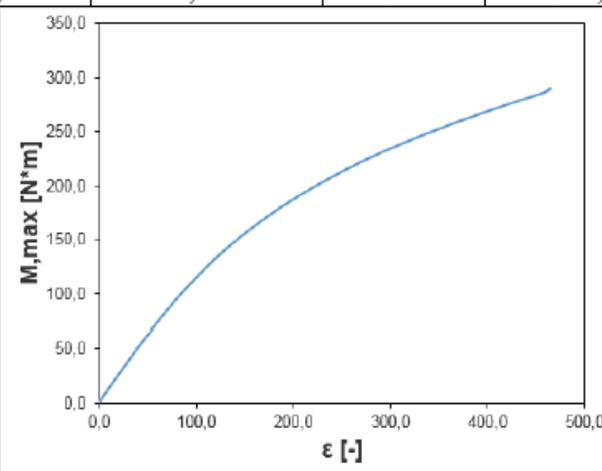
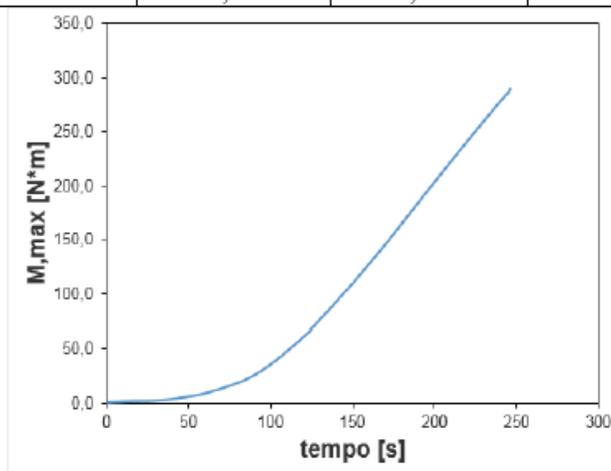
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
961,5	19,15	59,96	30,88	354623	2711,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5085	2902	1,75	0,26	57,47	22,83

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [kN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	7,73	0,091	426,51	0,001	247	289,70	57,80	70,10



Campione B14

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

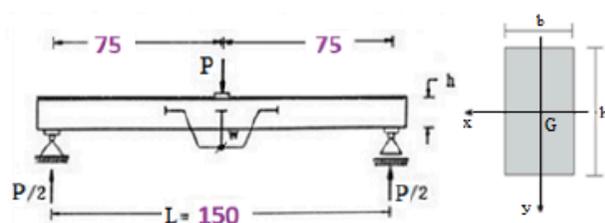


Figura 21 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
960,6	19,23	60,02	30,81	355560	2701,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
6073	2982	2,04	0,34	64,44	24,02

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

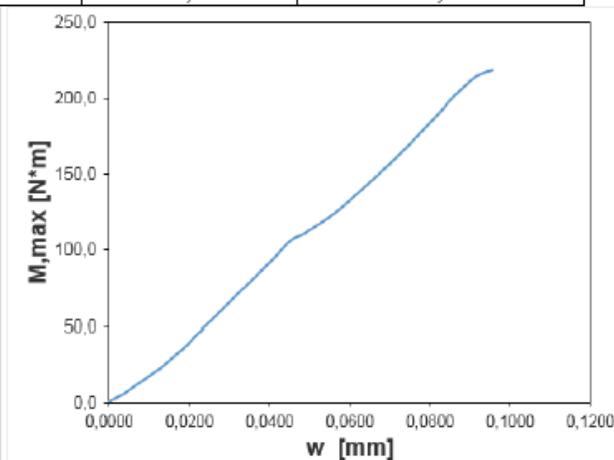
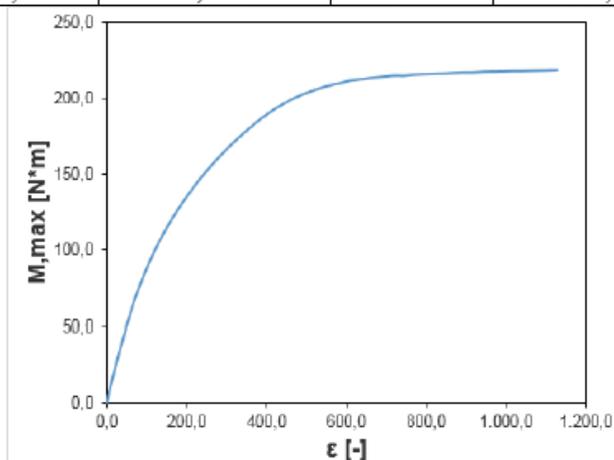
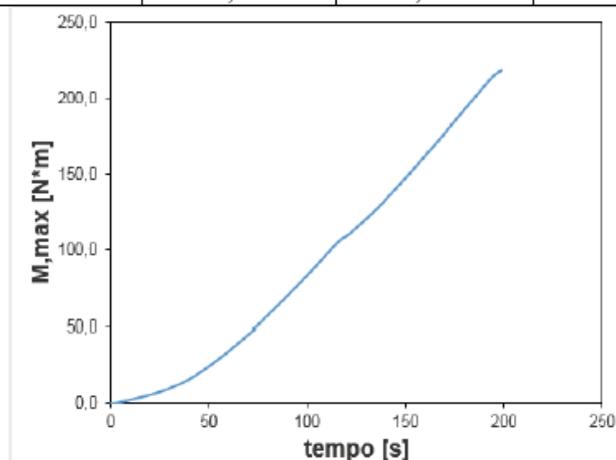
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
960,4	19,23	60,02	30,81	355560	2701,1

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5085	2953	1,72	0,25	58,68	23,55

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [kN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	5,83	0,096	1127,91	0,001	199	218,68	42,34	61,69



Campione B15

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

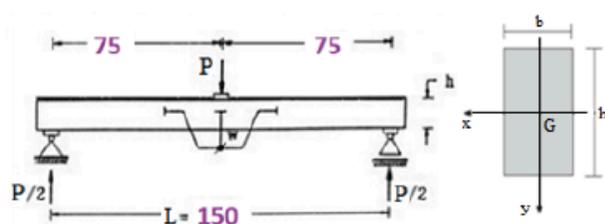


Figura 22 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
968,9	19,25	59,87	30,83	355335	2726,7

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5556	3025	1,84	0,29	64,34	24,95

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

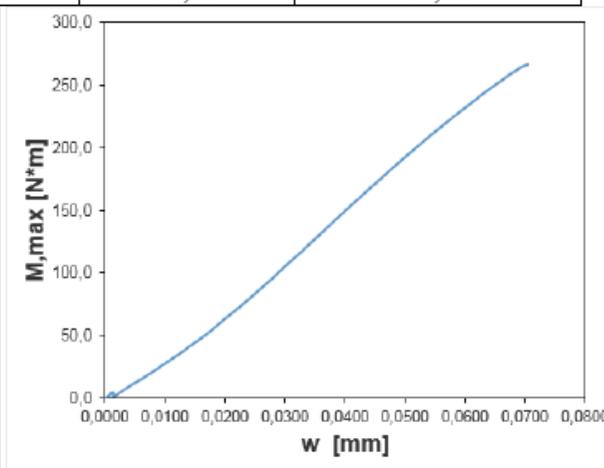
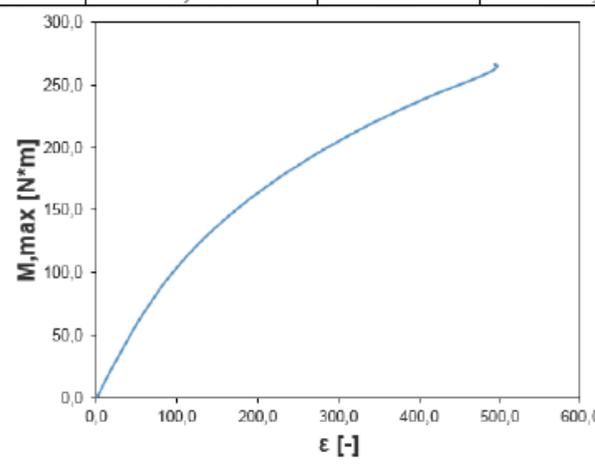
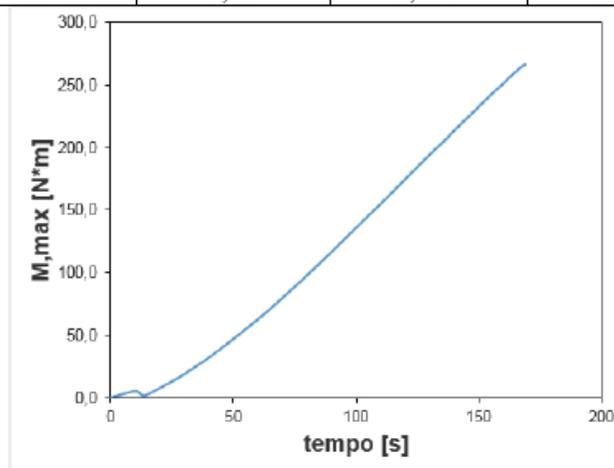
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
968,5	19,25	59,87	30,83	355335	2725,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5085	2830	1,80	0,28	55,69	21,83

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μϵ]) sec} [GPa]
30/05/2019	7,09	0,070	493,70	0,001	169	265,82	50,68	67,36



Campione B17

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 50°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a flessione.
(Quote in mm)

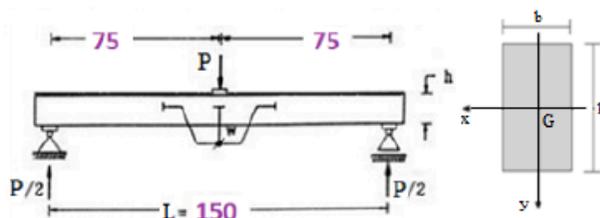


Figura 23 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
957,9	19,30	59,82	30,82	355776	2692,4

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5770	3049	1,89	0,31	65,39	25,03

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

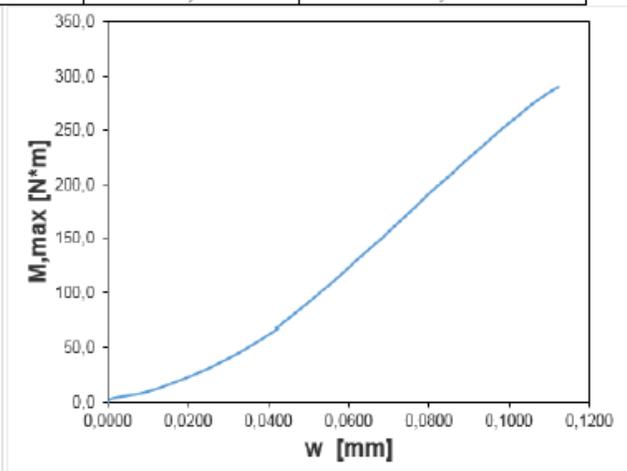
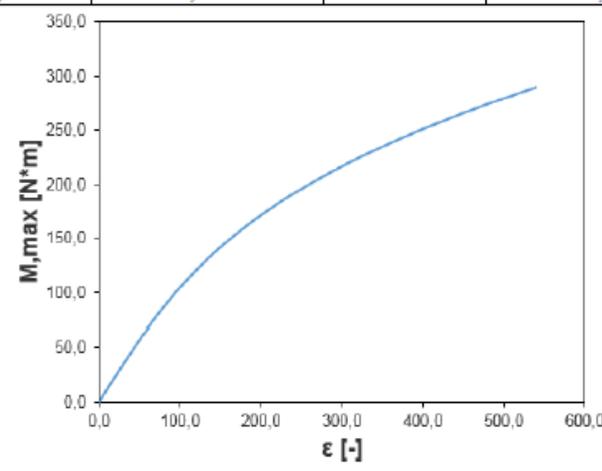
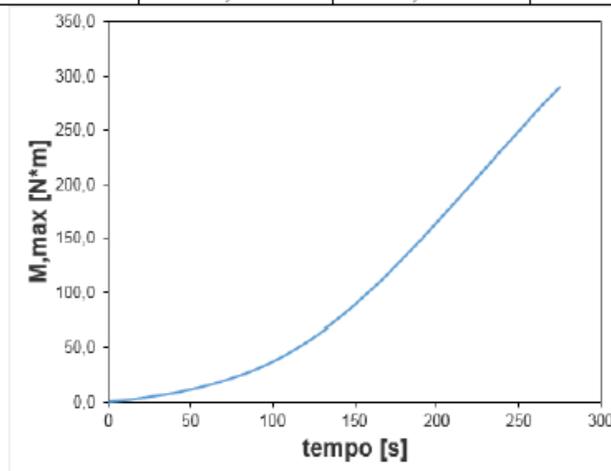
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
957,7	19,30	59,82	30,82	355776	2691,9

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5085	2885	1,76	0,26	56,58	22,40

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μe]) sec} [GPa]
30/05/2019	7,73	0,112	539,54	0,001	275	289,99	50,98	64,44



Campione B5

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 90°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

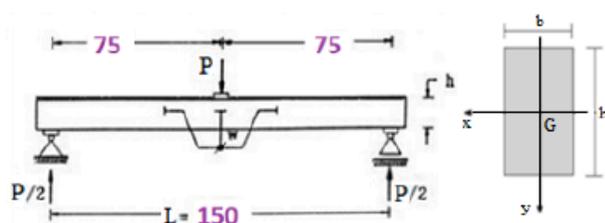


Figura 24 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
974	19,35	59,83	30,84	356960	2728,6

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5193	3227	1,61	0,19	67,37	28,41

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

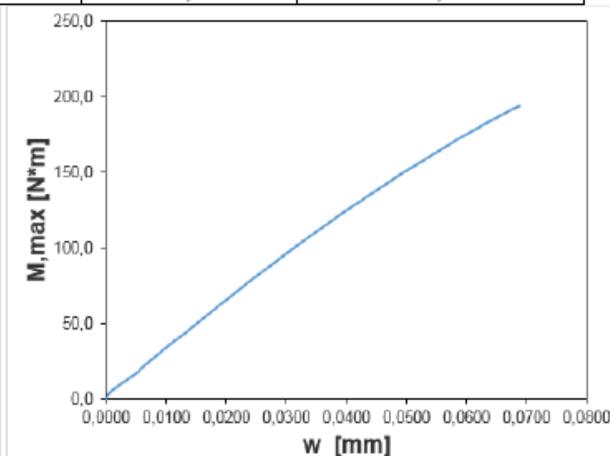
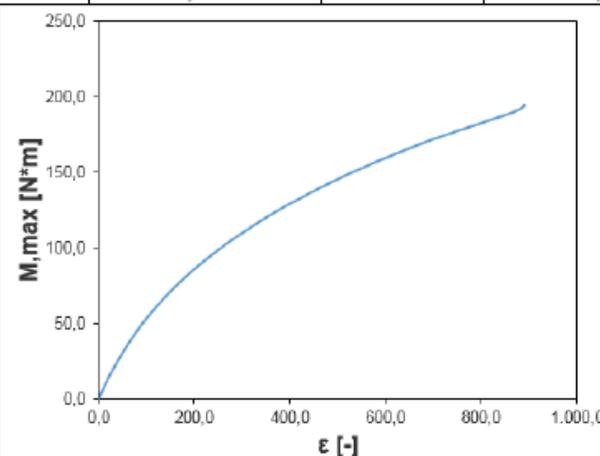
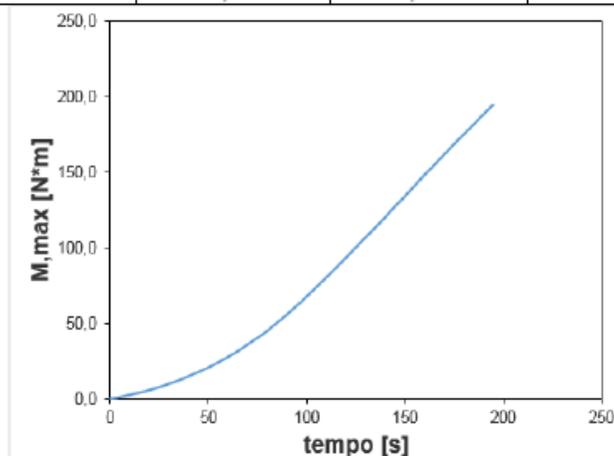
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
973,6	19,35	59,83	30,84	356960	2727,5

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4361	2970	1,47	0,07	51,37	24,06

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	5,18	0,069	891,37	0,001	195	194,39	21,61	38,31



Campione B6

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 90°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

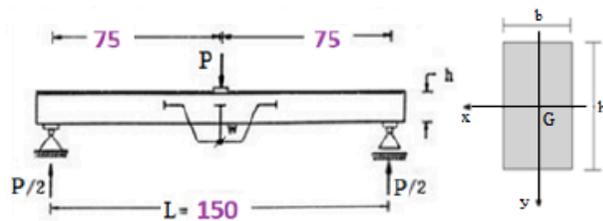


Figura 25 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
951,8	18,95	60,06	30,81	350660	2714,3

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5476	3019	1,81	0,28	63,41	24,74

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

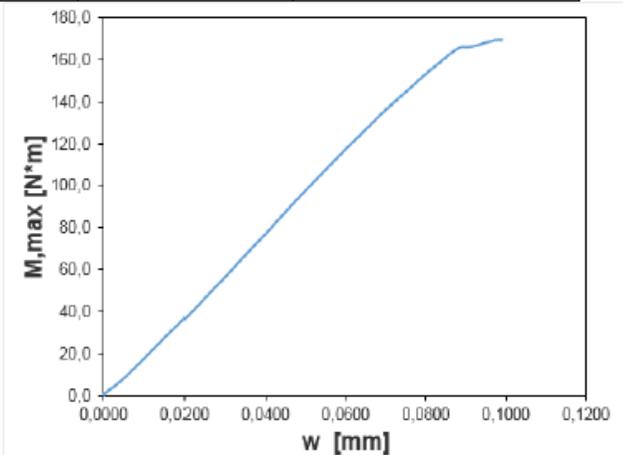
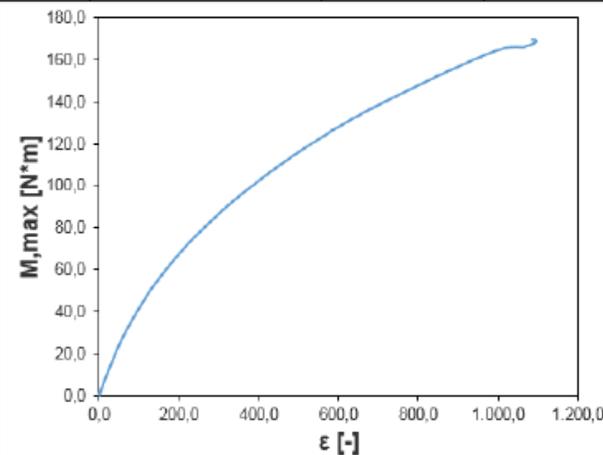
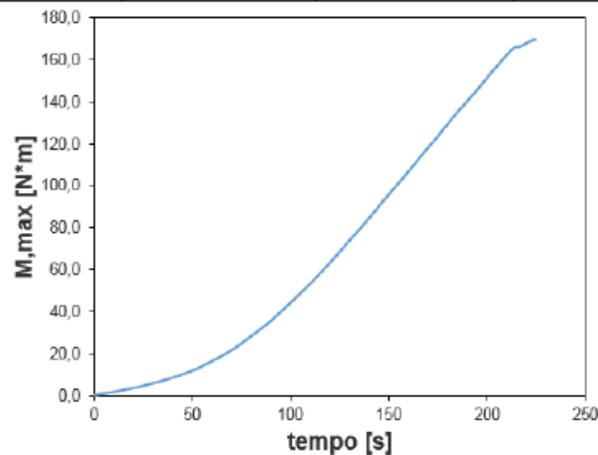
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
951,4	18,95	60,06	30,81	350660	2713,2

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4088	2609	1,57	0,16	42,71	18,47

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	4,53	0,099	1084,67	0,001	224	169,90	15,89	29,89



Campione B31

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 90°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

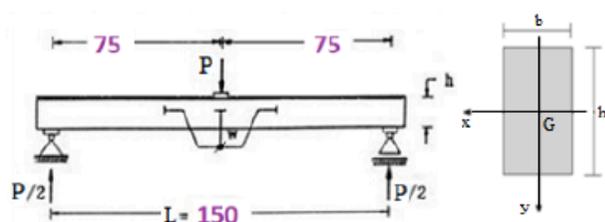


Figura 26 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
997,6	19,28	59,96	31,87	368253	2709

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5198	2820	1,84	0,29	55,64	21,54

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

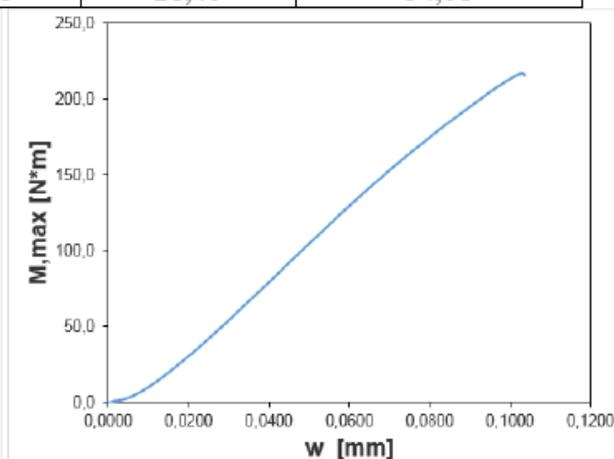
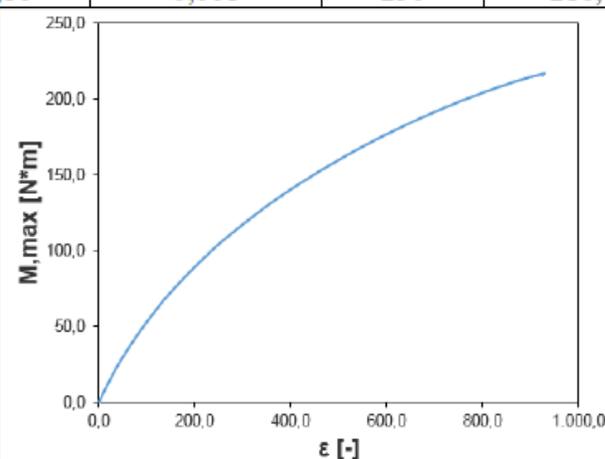
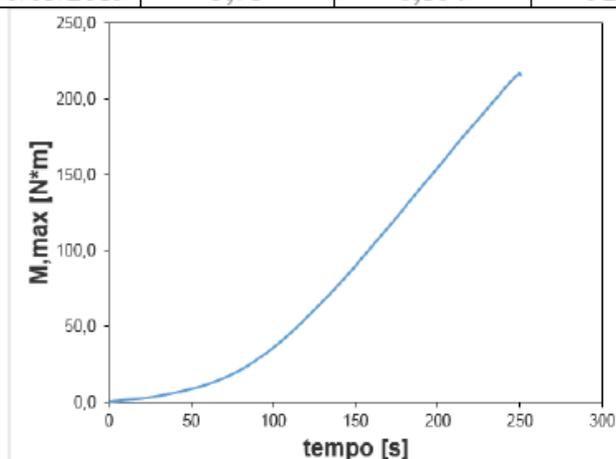
Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
997,6	19,28	59,96	31,87	368253	2709

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
4054	2542	1,59	0,18	41,17	17,50

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con **Strain-Gauge** (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [με]) sec} [GPa]
30/05/2019	5,78	0,104	923,80	0,001	250	216,83	21,40	34,61



Campione B48

Provino trattato termicamente e chimicamente: T 90°C in H₂SO₄ (5E⁻⁶ mol/L)

Schema della prova a Flessione.
(Quote in mm)

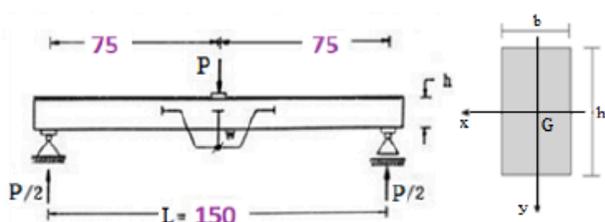


Figura 27 Rottura del campione post prova di flessione su 3 punti.

Caratteristiche provino allo stato naturale

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
975,1	19,50	59,94	30,87	360759	2703

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
5190	2468	2,10	0,35	44,59	16,47

Caratteristiche provino alterato termicamente e chimicamente

Peso [g]	L [cm]	h [mm]	b [mm]	Volume [mm ³]	ρ [kg/m ³]
974,6	19,50	59,94	30,87	360759	2701,5

Proprietà ricavate con tecnica ad ultrasuoni post alterazione (PunditLab®)

V _P [m/s]	V _S [m/s]	V _P /V _S [-]	ν [-]	E [GPa]	G [GPa]
3797	1990	1,91	0,31	28,04	10,70

Parametri di resistenza e deformabilità ottenuti con prova di flessione (vedi schema). Provino attrezzato superiormente con Strain-Gauge (HBM 10/120 LY41).

Data Test	P _{max} [KN]	w _{max} [mm]	ϵ_{max} (S-G)	Velocità [mm/s]	Durata [s]	M _{max} [MPa]	E _{50 sec} [GPa]	E _{($\epsilon=10$ [μϵ]) sec} [GPa]
30/05/2019	4,51	0,108	1482,28	0,001	251	169,30	13,67	27,26

