

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,
AMBIENTALE E DEI MATERIALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

in

Teoria delle Strutture

**Prove di caratterizzazione meccanica della canna
comune (*Arundo Donax*) in prospettiva di un uso
strutturale sostenibile**

CANDIDATO:

Francesco Saverio Coppolino

RELATRICE:

Prof.ssa Luisa Molari

CORRELATORI:

Prof. Mirko Maraldi

Dott.ssa Silvia Greco

Anno Accademico 2018/2019
Sessione III

Abstract

L'impiego di materiali naturali locali nell'edilizia porta ad una netta riduzione dei costi energetici derivanti da produzione, trasporto e smaltimento rispetto ai materiali attualmente considerati "tradizionali", quali calcestruzzo, acciaio e laterizi.

L'obiettivo di questa tesi è porre le basi dell'utilizzo dell'Arundo Donax in campo strutturale estendendo la conoscenza del suo comportamento meccanico attraverso una completa caratterizzazione meccanica.

La canna comune vanta delle caratteristiche meccaniche molto simili a quelle di diverse specie di Bambù, materiale ampiamente utilizzato nei paesi dell'Asia orientale e dell'America Latina, dove è inserito nelle normative che ne regolarizzano l'utilizzo ai fini strutturali. La principale norma di riferimento per il bambù è la (ISO_22157, 2019), che descrive le procedure di prova da seguire in laboratorio per una corretta caratterizzazione meccanica del materiale.

La sopracitata norma è stata di riferimento nella definizione delle diverse prove eseguite sull'Arundo Donax, ma le esigue dimensioni dei campioni, se paragonate a quelle del bambù, hanno portato al progetto di nuove metodologie di prova, studiate "su misura" per ottenere una corretta caratterizzazione del materiale. La modalità di prova a compressione assiale non presenta particolari differenze da quanto indicato nella (ISO_22157, 2019); lo studio si è quindi incentrato sulle possibili soluzioni da adottare nell'esecuzione dei test a trazione, a taglio e a compressione trasversale, prove che anche per il bambù presentano una significativa dispersione dei risultati e sono in continuo aggiornamento dal punto di vista normativo. Le ridotte dimensioni della sezione comportano diverse difficoltà nel monitoraggio della prova con tecniche di misurazione standard. Si utilizza la *Digital Image Correlation*, una tecnica di monitoraggio *contactless* in grado di costruire dei campi vettoriali di deformazione 2D e 3D della superficie del campione; tale tecnica di acquisizione permette di cogliere al meglio il comportamento di un materiale fortemente anisotropo come l'Arundo Donax, le cui proprietà meccaniche sono dipendenti dalla direzione di applicazione del carico e le cui caratteristiche di rigidità variano sullo spessore e lungo lo sviluppo del culmo.

Indice

Simboli	vii
Abbreviazioni	ix
1 INTRODUZIONE.....	1
1.1 L'impiego di materiali naturali nelle costruzioni.....	1
1.2 Impieghi storici della canna comune nelle costruzioni	2
1.3 Utilizzi innovativi dell'Arundo Donax	5
1.3.1 Pannelli isolanti in canne comuni.....	5
1.3.2 Elementi da costruzione in calce e canne comuni.....	6
1.3.3 CanyaViva.....	7
2 ARUNDO DONAX.....	9
2.1 Origine e diffusione.....	9
2.2 Caratteristiche fisiche e ciclo biologico	10
2.3 Caratteristiche meccaniche secondo la letteratura attuale.....	13
3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	15
3.1 Strumenti di acquisizione dei dati	15
3.1.1 Celle di carico.....	15
3.1.2 LVDT (Linear Variable Differential Transformer).....	15
3.1.3 Digital Image Correlation.....	16
3.2 Compressione assiale	18
3.2.1 Apparato di prova.....	18
3.2.2 Selezione e misurazione dei campioni	20
3.2.3 Preparazione dei campioni per la DIC	22
3.2.4 Modello di calcolo adottato.....	23
3.3 Trazione in direzione parallela alle fibre.....	24
3.3.1 Apparato di prova.....	24
3.3.2 Preparazione dei campioni e problematiche riscontrate.....	25
3.3.2.1 Assemblaggio dei campioni a trazione	27
3.3.2.2 Misurazioni	30
3.3.3 Modello di calcolo adottato.....	33

3.4	Compressione trasversale (C-type).....	33
3.4.1	Apparato di prova	33
3.4.2	Selezione e misurazione dei campioni.....	35
3.4.3	Modello di calcolo adottato	36
3.5	Taglio.....	43
3.5.1	Apparato di prova	43
3.5.2	Prova di taglio da normativa.....	43
3.5.3	Progetto di un'apparecchiatura a taglio alternativa	45
3.5.4	Selezione e misurazione dei campioni.....	47
3.5.5	Modello di calcolo adottato	48
3.6	Umidità e densità dei campioni	49
3.6.1	Calcolo del contenuto d'umidità.....	49
3.6.2	Calcolo della densità.....	51
4	ANALISI DEI RISULTATI.....	55
4.1	Compressione assiale.....	55
4.2	Trazione	65
4.3	Compressione trasversale (C-type).....	75
4.4	Taglio.....	82
4.5	Confronto statistico dei risultati con differenti specie di bambù.....	89
4.5.1	Compressione assiale.....	90
4.5.2	Trazione	93
4.5.3	C-type	95
	Conclusioni.....	101
	Bibliografia.....	103

Simboli

Simbolo	Descrizione	Unità
A	area della sezione trasversale del culmo	[mm ²]
A _s	area della superficie di scorrimento a taglio	[mm ²]
D _{min}	diametro minimo della sezione trasversale	[mm]
D _{max}	diametro massimo della sezione trasversale	[mm]
D _{medio}	diametro medio della sezione trasversale	[mm]
D _i	diametro interno della sezione trasversale	[mm]
D _o	diametro esterno della sezione trasversale	[mm]
D _{inf/sup}	diametro della sezione immediatamente inferiore/superiore al nodo	[mm]
D _{ij}	diametri della sezione $i=1,2,3$ misurati lungo direzioni ortogonali $j=1,2$	[mm]
E	modulo elastico (o di Young)	[GPa]
E _c	modulo elastico a compressione	[GPa]
E _t	modulo elastico a trazione	[GPa]
E _{t media}	media dei moduli elastici a trazione calcolati al di sopra e al di sotto del nodo	[GPa]
E _{hom}	modulo elastico a compressione trasversale, materiale omogeneo	[MPa]
E _i	modulo elastico al lembo interno, materiale eterogeneo	[MPa]
E _o	modulo elastico al lembo esterno, materiale eterogeneo	[MPa]
G	modulo di elasticità tangenziale (o di taglio)	[GPa]
L	altezza del campione, misurata in direzione longitudinale	[mm]
M	momento flettente	[N·m]
P	carico applicato	[N]
P _{max}	carico massimo	[N]
t	spessore della parete del culmo	[mm]
t _{min}	spessore minimo della parete del culmo	[mm]
t _{max}	spessore massimo della parete del culmo	[mm]
t _{medio}	spessore medio della parete del culmo	[mm]
t _R	diametro misurato nella prima sezione integra utile adiacente alla zona di rottura	[mm]
t _{ij}	spessori della sez. trasversale misurati lungo direzioni ortogonali; con $i=1,2, j=1,2$	[mm]
T	taglio applicato	[N]

T_{\max}	taglio massimo	[N]
γ	scorrimento angolare	[-]
δ	spostamento verticale della testa della pressa	[mm]
ϵ_v	deformazione in direzione verticale	[-]
ϵ_h	deformazione in direzione orizzontale	[-]
ϵ_{yy}	deformazione lungo la direzione y	[-]
ϵ_R	deformazione assiale, misurata a cavallo della sezione di rottura, prove a trazione	[-]
ν	coefficiente di dilatazione trasversale (o di Poisson)	[-]
ν_{medio}	coefficiente di Poisson medio	[-]
σ	tensione normale	[MPa]
σ_t	tensione normale a trazione	[MPa]
σ_c	tensione normale a compressione	[MPa]
σ_2	tensione calcolata in corrispondenza della sezione di mezzeria (sez. D_2), prove a trazione	[MPa]
$\sigma_{2 \text{ media}}$	media delle tensioni di trazione calcolate al di sopra e al di sotto del nodo	[MPa]
σ_R	tensione calcolata nella prima sezione integra utile adiacente alla zona di rottura, prove a trazione	[MPa]
τ	tensione tangenziale	[MPa]

Abbreviazioni

AD	Arundo Donax
BAM	Bambusoides
dev. st.	deviazione standard
DIC	Digital Image Correlation
EDU	Edulis
IRI	Iridescens
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
OCSE	Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico
VIO	Violascens
VIV	Vivax

1 INTRODUZIONE

1.1 L'IMPIEGO DI MATERIALI NATURALI NELLE COSTRUZIONI

Il progresso della società odierna necessita di un incessante uso di risorse provenienti dalla natura. Uno dei campi più interessati da questo fenomeno è l'edilizia; il continuo sfruttamento delle risorse naturali porterà ad una serie di problematiche via via di maggiore estensione, complice l'espansione economica di nuove aree geografiche. Lo stato odierno della conoscenza scientifica e tecnologica consente, per alcune classi di costruzioni, di introdurre delle reali novità dal punto di vista dell'ecosostenibilità tramite l'utilizzo di materiali strutturali naturali, sia per il materiale allo stato naturale sia nella sua forma ingegnerizzata (Mordà_N._et_al., 2012).

L'impiego nelle costruzioni di materiali quali la pietra, il legno massiccio, le canne, la paglia, i mattoni crudi o la terra compressa, conduce ad una serie di risparmi energetici che possono raggiungere valori più o meno elevati. Il risparmio energetico è strettamente legato al concetto di "distanza energetica": si definisce materiale naturale "locale" quello per cui la distanza energetica tra la materia prima e il semilavorato pronto all'impiego è ridotta ai minimi termini, sia per quanto riguarda i processi di trasformazione, sia per il trasporto in opera e il successivo smaltimento al termine della vita utile della costruzione. L'utilizzo di elementi naturali comporta una netta riduzione dei costi energetici per lo smaltimento dei rifiuti provenienti dall'edilizia, rispetto ai comini materiali da costruzione. La maggior parte delle strutture e delle infrastrutture rurali, dalla preistoria ad oggi, si è dissolta senza lasciare traccia di sé; questo perché costituite da materiali che, se correttamente utilizzati e mantenuti, erano capaci di dar luogo a costruzioni di lunga durata, mentre se abbandonati a se stessi, tendevano a deteriorarsi fino a confondersi con l'ambiente. Il recupero, per quanto consentito nell'ambito delle attuali esigenze e normative, dell'uso dei materiali naturali e delle tecniche costruttive ad essi legate, nelle costruzioni attuali, condurrebbe a realizzare opere aventi una vita utile predeterminata, come del resto richiesto dagli attuali Standard strutturali italiani ed

internazionali, con un costo del ciclo di vita certamente inferiore a quello caratteristico, ad esempio, delle opere realizzate in calcestruzzo armato o in muratura contemporanee. L'attuale ricerca sui materiali naturali ha quindi il compito di studiare dal punto di vista tecnico-scientifico il loro possibile impiego nell'edilizia moderna (Sorbetti_Guerri_et_al., 2009).

1.2 IMPIEGHI STORICI DELLA CANNA COMUNE NELLE COSTRUZIONI

La canna comune vanta una storia millenaria per l'uomo. Il suo utilizzo spaziava dalla creazione di barriere frangivento, alla fabbricazione di canne da pesca, dai bastoni da passeggio ai tutori per piante rampicanti e vegetali, dall'uso come combustibile a materia prima per strumenti musicali (Bissanti_G., 2018).

L'uso della canna comune e della canna palustre come materiali da costruzione deriva dalla vasta presenza di queste piante in territori umidi. Ciò ha spinto la popolazione locale ad impiegarle per realizzare le proprie abitazioni. Le prime architetture realizzate attraverso l'utilizzo della canna risalgono ad epoche molto lontane rispetto alla nostra a partire dal paleolitico superiore (circa fra i 40000 ed i 16000 anni fa). Studi sull'archeologia e la paleontologia, hanno portato alla scoperta, nelle zone temperate dell'Europa continentale e dell'Estremo Oriente, di tracce di capanne realizzate con rami intonacati risalenti a questo periodo. Tale tecnica presenta dei forti punti in comune con metodi costruttivi appartenenti ad insediamenti andini in cui le costruzioni erano formate da canne fissate tra loro tramite funi, determinando un approccio che viene replicato anche in periodi più vicini al nostro (Gini_F. & Piva_F., 2019).

I primi reperti archeologici rinvenuti, fanno risalire l'utilizzo delle canne in ambito edile al tempo dei Sumeri (Figura 1), in quella che è oggi l'Iraq meridionale, dove più di 5000 anni fa nacquero le prime abitazioni realizzate interamente in canne comuni. Queste erano costruite legando le canne in enormi fasci a formare degli archi parabolici con funzione portante; tra gli archi in direzione longitudinale erano posizionati dei fasci più piccoli, legati a formare l'involucro laterale e la copertura della costruzione, mentre sulle chiusure verticali erano installati dei pannelli realizzati disponendo le canne in modo tale da garantire l'illuminazione naturale e il ricircolo d'aria dell'ambiente interno (Broadbent_G., 2008).

Le *mudhif* (Figura 2) sono state costruite ed utilizzate dagli Arabi delle regioni paludose fino al 1993 quando Saddam Hussein cominciò a bonificare le paludi nel tentativo di distruggere la cultura e le tradizioni locali. A partire dalla sua sconfitta nel 2003, i canali vennero nuovamente inondati e buona parte delle paludi è oggi ritornata allo stato d'origine.



Figura 1: da sinistra verso destra, stuoia di copertura in canne risalente al 2200 a.C. e dettaglio del foro in cui alloggiava uno dei pali a sostegno. Foto tratte da (Uniroma, 2013)



Figura 2: vista esterna ed interna di una delle *mudhif houses* realizzate in seguito alla sconfitta di Saddam Hussein nel 2003, sita in Sud Iraq (Abbis_I., 2009)

Un esempio di edifici rurali realizzati in canne da fiume, sono le *Baraccas* di Oristano, nella Sardegna occidentale. Le *Baraccas* venivano utilizzate dai pescatori sia per il deposito di attrezzature sia come luoghi di ristoro dopolavoro. Questi fabbricati sono costituiti da una struttura portante lignea, le chiusure sono realizzate con un'intelaiatura in canne di grande diametro, sovrapposte tra loro a formare un reticolo. Il rivestimento è in falasco, un'erba palustre nota ai locali con il nome di "cruccuri" (Brunetti_B., 2015). La copertura è realizzata in legno, con listelli in canna comuni e rivestita con canne palustri sovrapposte a formare un "pacchetto", sul quale vengono poggiate delle tegole in terracotta (Figura 3).



Figura 3: Baraccas sarde. Interventi di manutenzione, a sinistra; dettaglio del pacchetto di copertura, a destra (Brunetti_B., 2015)

Nel Sud Italia i culmi di *Arundo Donax* sono stati largamente utilizzati in ambito edile per la costruzione di tramezzature interne e chiusure verticali, in particolare in Calabria, a seguito degli eventi sismici registrati nel 1783 il governo Borbonico diede il via alla costruzione di edifici sismo-resistenti costituiti da un telaio in legno e pareti in canne, realizzando in questo modo delle strutture particolarmente leggere e flessibili (Figura 4).



Figura 4: costruzioni rurali in Calabria con pareti esterne in *Arundo Donax* (Barreca_F., 2012)

1.3 UTILIZZI INNOVATIVI DELL'ARUNDO DONAX

1.3.1 Pannelli isolanti in canne comuni

Il settore delle costruzioni è responsabile del 40% della spesa energetica mondiale e del 30% dei gas serra emessi dai paesi dell'OCSE, (Barreca_F., 2012). La spesa energetica non è solo legata al benessere ambientale degli edifici (illuminazione, controllo climatico, ventilazione forzata), ma è anche dovuta alla produzione e al trasporto dei materiali da costruzione. Alla luce di questo, si sente la necessità di proporre un nuovo modo di costruire che sia efficiente dal punto di vista dell'isolamento termico, utilizzi materiali naturali locali, sfrutti fonti rinnovabili e garantisca un elevato comfort con un impatto ambientale minimo.

Si analizza lo studio sviluppato da (Barreca_F., 2012) su una parete ventilata costituita da un'intelaiatura in legno con montanti a interasse di 50 cm e due pannelli, uno interno e uno esterno, entrambi realizzati sovrapponendo due strati ortogonali di AD per uno spessore di circa 2-3 cm. Tra i pannelli interno ed esterno è presente un intercapedine d'aria di spessore di circa 20 cm, sulla superficie interna dei pannelli di AD viene applicato un sottile foglio d'alluminio, essendo il materiale sensibile all'umidità. Ipotizzando l'edificio sito a Reggio Calabria, si considera la condizione estiva di temperatura esterna di 35 °C ed interna di 20°C. Secondo l'analisi numerica condotta da (Barreca_F., 2012), nota la conduttanza dell'Arundo Donax da prove di laboratorio, si ottiene un flusso di calore entrante di 4,5639 W/m² (Figura 5). Ripetendo la stessa simulazione su una parete in muratura di spessore di 30 cm, il flusso di calore risulta di circa 23 W/m², considerevolmente più alto della soluzione con l'Arundo Donax.

I pannelli in canna palustre rappresentano un'ottima soluzione per la realizzazione di cappotti interni o come portaintonaco. Il processo di realizzazione dei pannelli prevede di ripulire le canne dal fogliame, comprimerle e legarle con del fil di ferro zincato per confezionarle in blocchi. I pannelli hanno uno spessore di 2-6 cm e possono essere utilizzati come controsoffitti, tamponamenti e cappotti interni o esterni (se intonacati). La posa in opera si esegue a secco, mediante tassellatura o inchiodatura dei pannelli alla struttura di supporto (Figura 6).

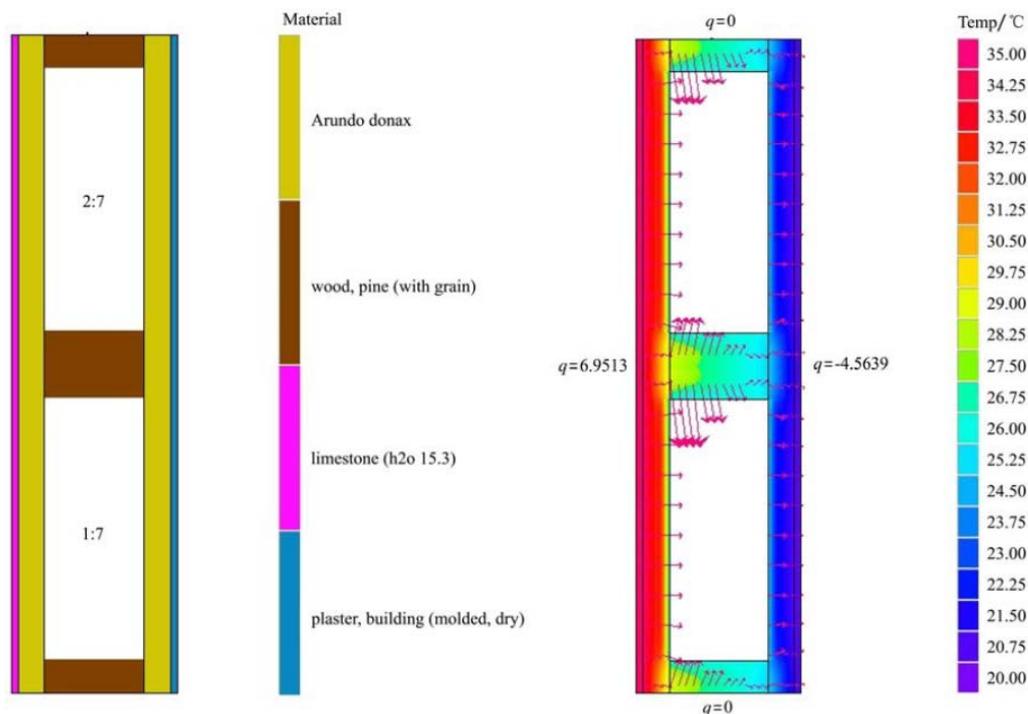


Figura 5: sezione della parete e mappa della temperatura (Barreca_F., 2012)



Figura 6: pannelli isolanti in Arundo Donax. Foto tratta da (Ambiente_&_Sviluppo, s.d.)

1.3.2 Elementi da costruzione in calce e canne comuni

La calce e la canna comune sono state utilizzate nelle costruzioni per migliaia di anni; oggi sono sostituite da materiali compositi come il calcestruzzo armato. Il motivo principale che ha portato all'abbandono dell'utilizzo della canna comune come elemento collaborante è la scarsa adesione del legante alla superficie esterna

de culmo, problematica che è stata anche riscontrata nella preparazione dei provini a trazione durante le prove di laboratorio. Una possibile soluzione consiste nel realizzare sulle canne degli intagli di spessore pari a 2mm a interasse di circa 1 cm, in modo tale da permettere alla calce di penetrare all'interno dei culmi (Figura 7). I risultati dei test a flessione a tre punti condotti da (Martínez_Gabarrón_A._et_al., 2014) mostrano un incremento della resistenza a flessione pari al 116,2 % (5,34 MPa) rispetto all'elemento in sola calce (2,47 MPa).



Figura 7: Arundo Donax con intagli per incrementare l'aderenza con la calce (Martínez_Gabarrón_A._et_al., 2014)

1.3.3 CanyaViva

Il tema dell'utilizzo innovativo della canna comune come materiale strutturale è di particolare rilevanza per le opere architettoniche di CanyaViva, un collettivo multidisciplinare spagnolo che, attraverso corsi di formazione, laboratori e progetti sociali, si impegna a diffondere conoscenze e capacità tecniche utili alla realizzazione di costruzioni con materiali naturali locali, in particolare utilizzando l'Arundo Donax. L'esperienza costruttiva sviluppata negli anni ha portato CanyaViva a realizzare un manuale contenente una serie regole ed indicazioni utili a realizzare delle architetture in AD seguendo il metodo da loro stessi sviluppato. Secondo le indicazioni di CanyaViva il periodo ottimale per il taglio dei culmi è quello invernale, durante il quale le canne perdono le foglie e le inflorescenze e sono meno vulnerabili ad eventuali parassiti. Tra il primo ed il secondo anno le piante sviluppano delle ramificazioni in sommità (Figura 8); sono da preferire i culmi aventi due anni d'età.

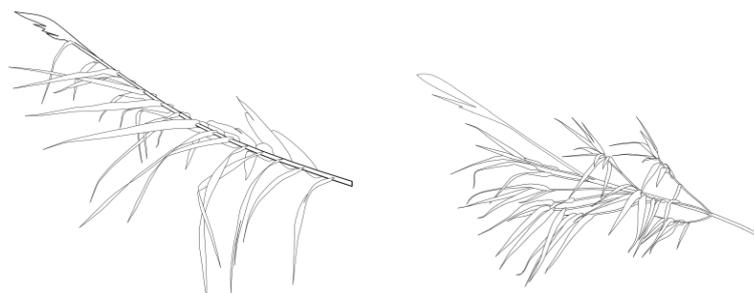


Figura 8: canna di un anno di età, a sinistra e di 2 anni, a destra (CanyaViva,)

Altre indicazioni sono relative a dei rapidi test empirici sulla flessibilità degli elementi da utilizzare per la costruzione degli archi. Questi sono realizzati intersecando due fasci di canne aventi andamento a spirale con senso di rotazione opposto; i fasci sono formati legando tra loro, con una tecnica brevettata da CanyaViva, un determinato numero di culmi con caratteristiche geometriche quali variazione del diametro lungo l'altezza e curvatura che rientrino in prefissati range dimensionali. In Figura 9 è mostrato un esempio di copertura realizzata in Arundo Donax.



Figura 9: *Casa de Laila*, costruzione realizzata in Arundo Donax (CanyaViva,)

2 ARUNDO DONAX

2.1 ORIGINE E DIFFUSIONE

L'Arundo Donax manifesta la sua presenza nel bacino mediterraneo già in epoche remote; questo trova riscontro in numerose testimonianze scritte e reperti storici ed archeologici. Data l'ampia e antica diffusione della pianta, è difficile stabilirne l'origine. Un'ipotesi è che sia originaria dell'Asia orientale e si sia successivamente diffusa nel resto dell'Asia, nord Africa, Medio Oriente e sud Europa dove, naturalizzata nei paesi che si affacciano sul Mediterraneo, è stata coltivata per migliaia di anni (Bucci_A._et_al., 2012). A partire da quest'area, l'Arundo è stata ampiamente diffusa dall'uomo nelle regioni subtropicali e temperate calde di tutto il mondo (Figura 10).

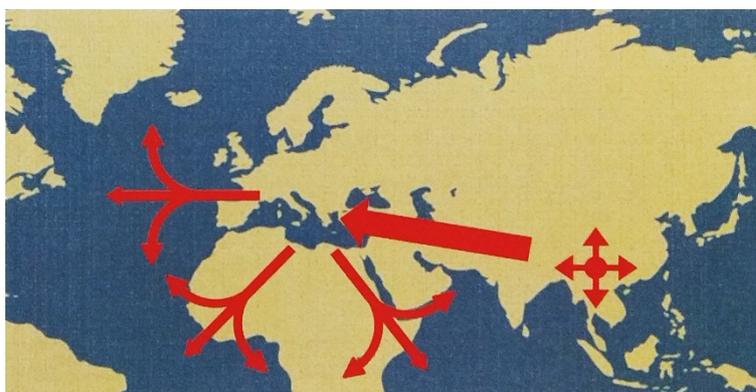


Figura 10: origine geografica e diffusione dell'Arundo (Bucci_A._et_al., 2012)

Si ritiene che la specie sia stata introdotta nel Nord America agli inizi dell'ottocento a partire dalla California del sud per contrastare i fenomeni di erosione, dove è diventata una delle piante più infestanti delle zone fluviali, soppiantando le specie native e alterando l'ecosistema locale.

In Italia, la sua diffusione ha origine dalle regioni centrali, nelle quali sviluppa presto una forte invasività, mentre al nord la presenza dell'Arundo Donax è più ridotta. La pianta predilige ambienti fluviali, canali artificiali, campagne e terreni difficilmente accessibili dall'uomo o lasciati in stato di abbandono. La presenza

dell'Arundo Donax è via via più rada all'aumentare dell'altitudine; la pianta è del tutto assente per altitudini superiori ai 700 m.

2.2 CARATTERISTICHE FISICHE E CICLO BIOLOGICO

I Culmi di Arundo Donax sono delle canne cave che possono raggiungere i 7 m d'altezza (Cosentino_S. & Copani_V., 2012), hanno usualmente un diametro variabile tra 9 e 30 mm, i nodi sono disposti ad una distanza di circa 20 cm nella zona centrale, mentre all'estremità superiore e nelle vicinanze del rizoma sono più ravvicinati. Lo spessore delle pareti è compreso tra 1 e 4,5 mm ed è variabile lungo lo sviluppo del culmo, risulta massimo alla base e minimo in sommità (Figura 11). La sezione trasversale rivela, dall'esterno verso l'interno, l'epidermide, costituita uno strato molto sottile e ricco di fibre, e il tessuto parenchimatico, in cui è possibile distinguere celle lignificate e fasci vascolari (Figura 12).



Figura 11: a sinistra, sezione longitudinale del culmo (Spatz_H._et_al., 1997); a destra, sezione longitudinale del rizoma (Speck_O. & Spatz_H., 2003)

La densità delle fibre varia sia sullo spessore sia lungo l'altezza del culmo; sullo spessore, è massima in corrispondenza della superficie esterna della sezione e minima al lembo interno; lungo l'altezza è minima alla base e massima in sommità. Il rizoma (Figura 11) è un fusto strisciante che si sviluppa appena al di sotto della superficie del terreno, è ramificato, distinto in nodi e internodi e dotato di gemme da cui emergono i nuovi culmi (Cosentino_S. & Copani_V., 2012).

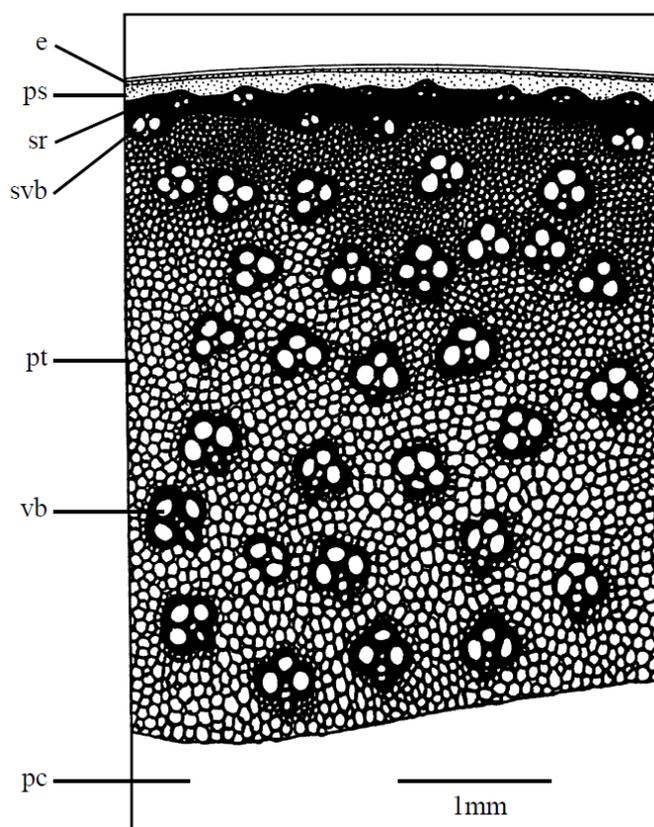


Figura 12: sezione trasversale dell'Arundo Donax in cui è mostrata una parte della parete d'internodo. Si distinguono 2 tipi di tessuti: 1) lo steroma ipodermico costituito da uno strato di tessuto fotosintetizzante sovrastato da fibre sclerenchimatiche (sr) in cui sono presenti delle piccole bande vascolari (svr) compresa l'epidermide (e) e un sottile strato fotosintetico (ps); 2) il più spesso strato di parenchima (pt) dove sono osservabili cellule lignificate e numerosi fasci vascolari (vb); cavità interna alla sezione (pc), (Spatz_H._et_al., 1997).

L'Arundo Donax è una pianta perenne, di solito i primi germogli emergono dal rizoma nel mese di marzo. Nello stesso periodo, per le canne della stagione precedente nascono i germogli a partire dai nodi. La maggior parte dei culmi emerge tra la primavera e l'estate, mentre i nuovi germogli nascono nel corso dell'intera stagione. La fioritura avviene tra fine estate e inizio autunno e corrisponde con il

termine del ciclo biologico della pianta (Figura 13). Durante l'inverno le canne perdono le foglie e le inflorescenze e l'epidermide seccando assume una colorazione giallo paglierino (Bucci_A._et_al., 2012). Nonostante l'infiorescenza sia composta da migliaia di spighe è priva di semi fertili, per cui la propagazione vegetativa rimane l'unica strategia di diffusione, questa avviene principalmente durante il verificarsi di fenomeni meteorici importanti, quando la forza dell'acqua o del vento è tale da asportare porzioni di culmo o di rizoma e trasportarle lontano dal punto di origine.

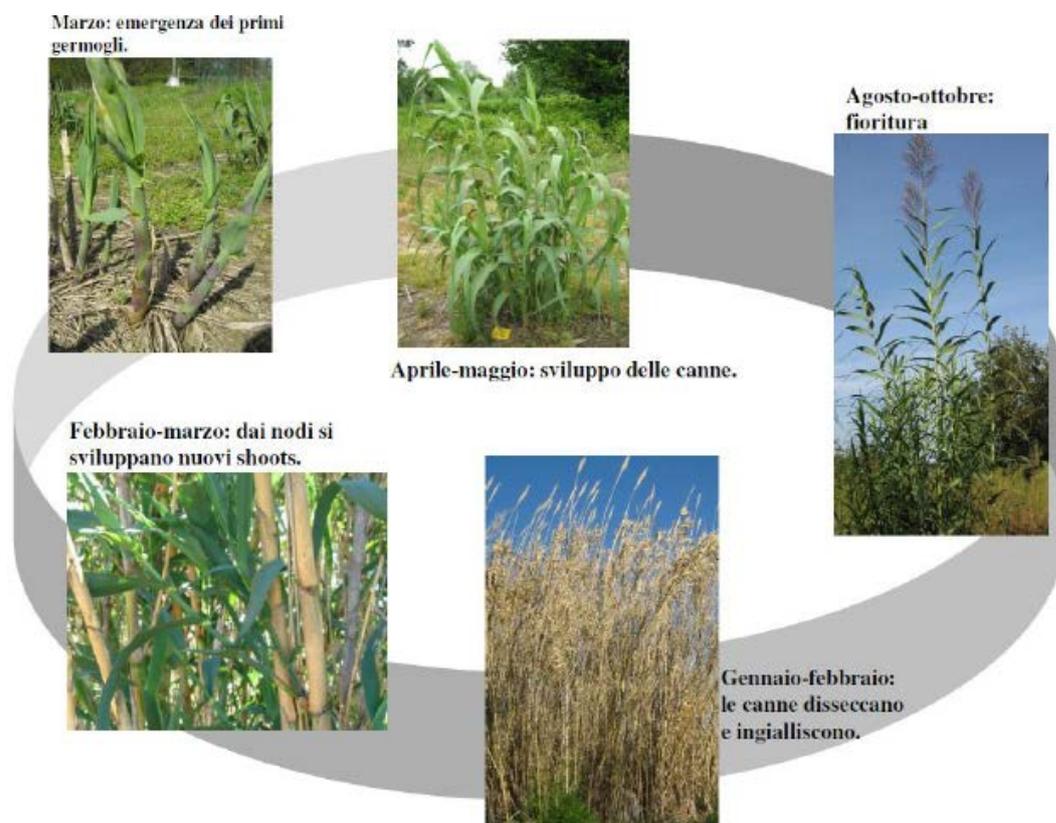


Figura 13: ciclo biologico dell'Arundo Donax, (Bucci_A._et_al., 2012)

2.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE SECONDO LA LETTERATURA ATTUALE

Gli studi più significativi sulla proprietà meccaniche dell'Arundo Donax sono stati condotti da (Spatz_H._et_al., 1997); i cui test hanno portato alla determinazione delle seguenti caratteristiche:

- modulo elastico longitudinale del parenchima, ricavato con prove a flessione a tre punti;
- modulo elastico tangenziale medio del parenchima, ricavato con prove di compressione trasversale su anelli privi dell'epidermide;
- modulo di taglio del parenchima nel piano radiale-tangenziale, calcolato tramite delle particolari prove a torsione eseguite su campioni d'internodo.

In particolare lo studio è incentrato sulla variabilità delle caratteristiche meccaniche sia lungo l'altezza della pianta, sia in funzione della percentuale di parenchima rimossa e della presenza o meno dell'epidermide.

Dai risultati ottenuti da (Spatz_H._et_al., 1997), la parte centrale del culmo, indicativamente compresa tra 50 e 200 cm dalla base, è quella che presenta le caratteristiche meccaniche più omogenee; i moduli elastici medi risultano:

$E_b \approx 9$	[GPa]	modulo elastico del parenchima a flessione longitudinale;
$E_t \approx 10$	[GPa]	modulo elastico dell'epidermide a trazione;
$E_r = 0.2 \div 0.5$	[GPa]	modulo elastico medio del parenchima in direzione tangenziale;
$G_r = 0.7 \div 1.1$	[MPa] *	modulo di taglio del parenchima in direzione tangenziale.

Altri test, condotti da (Conte_P_et_al., 2018) tramite prove a flessione a 3 punti, riguardano l'influenza del contenuto d'umidità sul modulo elastico a flessione dell'Arundo Donax. Dalla Figura 14 si nota che il valore del modulo elastico per i campioni essiccati naturalmente (UN) e per i campioni estratti da culmi appena tagliati (Green) è all'incirca lo stesso; il modulo di Young rimane pressoché invariato nelle prime 264 ore lasciando i campioni in un ambiente condizionato a

* Il risultato ottenuto da (Spatz_H._et_al., 1997) è di 3 ordini di grandezza più basso rispetto ai valori del modulo di taglio in direzione assiale ottenuti nei test sperimentali effettuati nell'ambito della presente tesi; si ritiene che in quanto riportato da (Spatz_H._et_al., 1997) ci sia un refuso nell'indicazione dell'unità di misura.

una temperatura di 30 ± 2 °C e un umidità relativa del 50 ± 5 % (c-264), per poi aumentare linearmente fino al completo essiccamento (DRY).

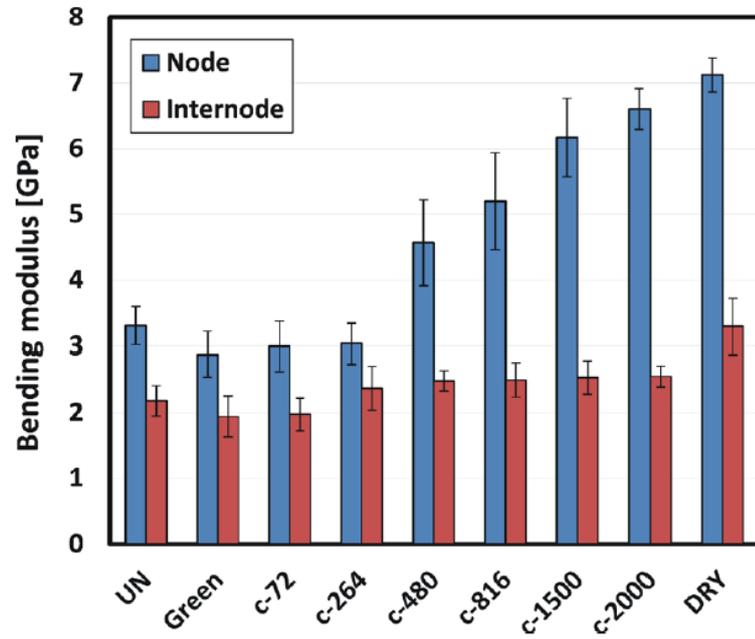


Figura 14: Variazione del modulo elastico a flessione in funzione del grado di essiccamento (Conte_P_et_al., 2018)

3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

I culmi di AD selezionati per i test a compressione assiale e trasversale e a taglio sono stati raccolti nel mese di Febbraio 2019, a Campotto, in provincia di Ferrara, in un'area di ricerca del dipartimento di scienze e tecnologia agroalimentari dell'università di Bologna, dove l'Arundo è utilizzata per la produzione di biomassa (Molari_L., 2019); mentre le canne per i test a trazione sono state raccolte nel mese di Aprile. I culmi hanno poco più di un anno d'età. I campioni selezionati per i test di caratterizzazione meccanica sono stati tutti estratti ad un'altezza dalla base della pianta compresa tra 0,5 e 1,5 m.

3.1 STRUMENTI DI ACQUISIZIONE DEI DATI

3.1.1 Celle di carico

Le celle di carico sono degli strumenti di misurazione della forza costituiti da una struttura meccanica deformabile, in campo elastico, che con l'applicazione di un carico si deforma con modalità note e ripetibili. La misura della deformazione sfrutta dei principi di trasduzione che permettono di risalire alla forza incognita applicata. Variando configurazione dell'installazione e posizione dei sensori, si misura un diverso tipo di carico applicato (Gobbi_A., 2012).

3.1.2 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

L'LVDT è un sensore a contatto meccanico che rileva, in continuo, lo spostamento assoluto della punta mobile. È costituito da un tubo con tre avvolgimenti disposti lungo lo stesso asse e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile. Un oscillatore elettronico eccita l'avvolgimento primario con una corrente alternata a frequenza costante. Uno spostamento del nucleo provoca un aumento di tensione in uno dei due avvolgimenti secondari e una diminuzione nell'altro. La differenza

è proporzionale allo spostamento (Pascale_G., 2017). In Figura 15 è rappresentato un LVDT durante una prova di carico.



Figura 15: LVDT

3.1.3 Digital Image Correlation

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica ottica che misura il campo di deformazione e spostamento di un oggetto. La DIC impiega due fotocamere per l'acquisizione delle immagini da processare; mediante confronto delle coppie di immagini digitali per diverse fasi di deformazione, il sistema è in grado di misurare lo spostamento della superficie del campione e di costruire dei campi vettoriali di deformazione 2D e 3D. La DIC lavora individuando dei blocchi di pixel, i quali devono essere distribuiti in modo casuale e avere una certa gamma di livelli di contrasto e intensità (McCormick_N. & Lord_J., 2010).

Il corretto funzionamento della DIC è garantito solo se la superficie del campione in esame presenta un pattern:

- non ripetitivo;
- isotropo;
- con un alto livello di contrasto (Figura 16 d).

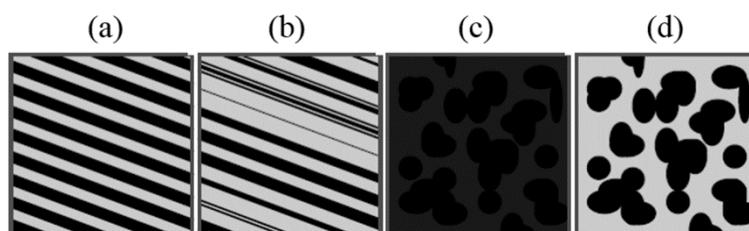


Figura 16: da sinistra verso destra: pattern ripetitivo, anisotropo (a); pattern non ripetitivo anisotropo (b); pattern non ripetitivo, isotropo, con basso contrasto (c); pattern non ripetitivo, isotropo, con alto contrasto (d) (Correlated_Solutions, 2011)

L'immagine è acquisita in gradazioni di grigio, lo spettro di variazione del grigio per il singolo pixel va da 0 (nero) a 100 (bianco). Il software calcola lo spostamento del blocco di pixel tramite somma dei minimi quadrati dei valori dei pixel; per il caso di deformazione 2D si ha:

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i,j=n/2}^{n/2} (I(x+i, y+i) - I^*(x+u+i, y+v+j))^2 \quad (2.1)$$

dove

C funzione di correlazione

x, y coordinate del pixel nell'immagine di riferimento

u, v spostamenti in direzione x e y rispettivamente

n dimensioni della matrice $n \times n$ (ad esempio 9×9)

I immagine prima dello spostamento

I^* immagine dopo lo spostamento

$(x+i, y+i)$ valori del pixel alle coordinate $(x+i, y+i)$

$(x+u+i, y+v+j)$ valori del pixel alle coordinate $(x+u+i, y+v+j)$

Image before motion									Image after motion								
103	101	99	2	0	1	105	100	96	99	100	101	102	3	0	2	100	102
101	104	98	1	4	3	101	98	100	101	97	98	101	1	2	0	96	102
103	96	99	0	2	2	102	103	98	0	1	3	3	2	0	1	2	0
2	3	0	1	1	2	3	0	1	1	0	3	0	2	1	1	0	3
1	3	3	0	2	1	0	3	0	1	3	2	0	1	1	2	2	0
0	0	2	0	3	0	2	0	0	101	100	100	103	0	2	1	102	101
98	101	102	0	1	0	96	97	102	97	99	100	101	3	2	0	97	101
97	98	103	0	2	0	103	98	100	101	103	98	101	0	1	1	99	96
102	99	101	2	0	0	104	102	101	102	99	96	103	2	3	3	102	100

Figura 17: immagine acquisita dal software, prima del movimento (a sinistra) e dopo il movimento (a destra); ogni elemento delle matrici rappresenta un pixel (Correlated_Solutions, 2011)

3.2 COMPRESSIONE ASSIALE

3.2.1 Apparato di prova

Secondo quanto indicato dalla norma (ISO_22157, 2019), i test di compressione vanno eseguiti tramite una pressa che abbia una precisione minima dell'1% del carico di rottura del provino. Nel caso in esame si è adottata una macchina universale elettromeccanica Amsler Wolpert, dotata di due celle dinamometriche da 1 kN e 100 kN (campo di misura da 2 N a 100 kN), con velocità di prova regolabile da 0 a 500 mm/min. I valori di carico ultimo attesi per la prova in esame sono dell'ordine di 10 kN (Molari_L., 2019), si utilizza quindi la cella di carico da 100 kN. La prova è monitorata da una coppia di fotocamere per l'utilizzo della DIC.



Figura 18: Macchina universale Amsler Wolpert

I test di compressione si sono eseguiti in controllo di spostamento, con una velocità di carico di circa 0.3 mm/min, la frequenza di acquisizione dei fotogrammi è di circa 1/800 ms. Velocità di carico ed intervallo di acquisizione vanno stimati a priori in funzione del carico massimo atteso e della tipologia di materiale (ad esempio duttile o fragile). Si sono effettuati dei test preliminari affinché la durata delle prove fosse compresa tra 3 e 7 minuti, come indicato dalla (ISO_22157, 2019) e le acquisizioni fossero indicativamente comprese tra le 200 e le 300 coppie d'immagini. Per l'acquisizione ed il post processing dei dati si utilizza il software VIC-3D.

Lo schema di prova secondo (ISO_22157, 2019) è riportato in Figura 19.

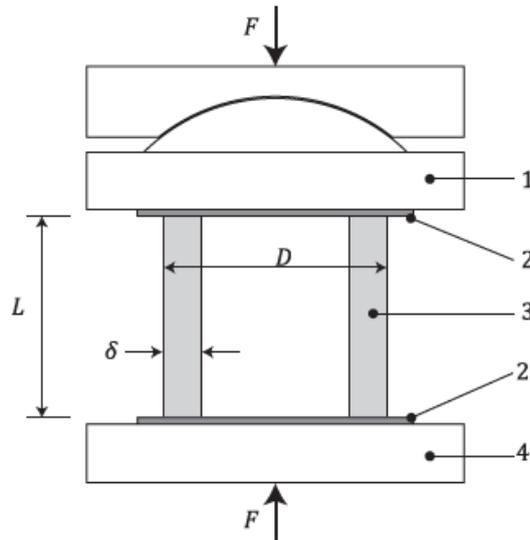


Figura 19: Schema di carico a compressione assiale (ISO_22157, 2019)

In Figura 19

- D diametro esterno
- δ spessore
- F carico
- L altezza
- 1 piastra superiore con cuscinetto a sfera
- 2 layer intermedi di politetrafluoroetilene (PTEE)
- 3 campione di Arundo Donax
- 4 piastra inferiore

Tuttavia la norma non specifica lo spessore dello strato di PTEE (teflon), il quale ha una significativa influenza sullo scorrimento del provino durante la prova; in particolare se il layer di teflon ha uno spessore superiore ad 1 mm circa, può verificarsi il punzonamento dello strato e il conseguente incremento del confinamento alla base (Greco_S., 2017). Un'altra complicazione dell'utilizzo del layer di scorrimento è dovuta alla metodologia di acquisizione dei dati. L'impiego della DIC presuppone che la superficie del campione sia sempre visibile durante la prova; ciò non sarebbe garantito per via delle deformazioni del layer. Si decide pertanto di eseguire le prove senza gli strati intermedi.

3.2.2 Selezione e misurazione dei campioni

Per la preparazione dei campioni si selezionano dei culmi che abbiano un diametro esterno di circa 20 mm, si procede alla rimozione dell'epidermide e alla pulizia con alcool etilico delle canne.



Figura 20: rimozione delle foglie

La prova viene effettuata su 18 provini, di cui il 9 con nodo e 9 senza (Figura 21). La (ISO_22157, 2019) suggerisce di adottare il seguente criterio di selezione:

- Se $D \geq 2$ mm, allora $L = \min \{D; 10\delta\}$
- Se $D \leq 2$ mm, allora $L = 2D$

Attraverso un calibro digitale con precisione di 0.01 mm, si prendono due misurazioni, tra loro ortogonali, del diametro e si calcola la media. Noto il diametro e lo spessore della sega circolare, si marciano le sezioni in cui effettuare i tagli. Per ridurre al minimo l'eccentricità del carico ed avere una trasmissione dello sforzo di compressione il più possibile omogenea, le superfici superiore ed inferiore dei provini devono essere perfettamente piane e parallele tra loro.

Una volta tagliati i provini, si carteggiano le basi e si effettuano le misurazioni di spessore e altezza. La norma ammette una tolleranza pari all'1% del diametro. Quasi la totalità dei campioni in esame ha un diametro esterno medio superiore a 20 mm. Per ottenere una minore dispersione dei risultati, si decide di tagliare tutti i campioni con un'altezza L pari a D . I campioni senza nodo sono stati estratti da tre differenti internodi (tre campioni per ogni internodo), la nomenclatura adottata è del tipo "AD2B" che, ad esempio, sta per "Arundo Donax, campione 2, internodo B". Per in nodi la nomenclatura è del tipo "ADN6" (Arundo Donax, nodo 6)

In Tabella 1 e Tabella 2 sono riportate le misure dei campioni.



Figura 21: campioni con e senza nodo per la prova a compressione

internodi compressione	Spessori [mm]			Diametri [mm]			L [mm]
	t_{\min}	t_{\max}	t_{medio}	D_{\min}	D_{\max}	D_{medio}	
AD1A	2.75	3.29	3.02	23.09	24.37	23.73	24.88
AD2A	2.83	2.99	2.91	22.88	24.25	23.57	24.63
AD3A	2.77	3.12	2.95	23.06	24.35	23.71	23.81
AD1B	3.02	3.51	3.27	23.48	24.61	24.05	23.38
AD2B	2.98	3.36	3.17	23.41	24.71	24.06	23.63
AD3B	3.04	3.45	3.25	23.59	24.74	24.17	24.72
AD1C	3.30	3.95	3.63	23.30	25.10	24.20	25.23
AD2C	3.31	4.00	3.66	23.09	25.09	24.09	24.50
AD3C	3.29	4.09	3.69	23.31	25.10	24.21	23.50
media	3.03	3.53	3.28	23.25	24.70	23.97	24.25

Tabella 1: misure dei campioni internodo per prova a compressione

nodi compressione	Spessori [mm]			Diametri [mm]					L [mm]
	t_{\min}	t_{\max}	t_{medio}	$D_{\min \text{ sup}}$	$D_{\max \text{ sup}}$	$D_{\min \text{ inf}}$	$D_{\max \text{ inf}}$	D_{medio}	
ADN1	2.98	3.88	3.43	22.30	23.40	20.91	21.80	22.10	21.86
ADN2	3.15	4.16	3.66	22.60	23.82	21.30	22.55	22.57	23.22
ADN3	3.44	4.62	4.03	22.55	24.30	21.58	22.83	22.82	23.20
ADN4	3.83	5.05	4.44	22.43	24.83	21.71	23.65	23.16	23.92
ADN5	3.20	3.60	3.40	19.02	19.27	17.11	17.87	18.32	18.65
ADN6	4.06	4.72	4.39	19.96	20.36	18.77	19.30	19.60	20.15
ADN7	3.34	4.53	3.94	19.85	20.16	18.25	19.04	19.33	20.15
ADN8	3.05	4.32	3.69	19.55	19.87	18.10	18.74	19.07	19.70
ADN9	3.23	3.74	3.49	19.30	19.45	17.71	18.06	18.63	19.03
media	3.36	4.29	3.83	20.84	21.72	19.49	20.43	20.62	21.10

Tabella 2: misure dei campioni con nodo per prova a compressione

3.2.3 Preparazione dei campioni per la DIC

La superficie esterna dei campioni viene verniciata con delle comuni bombolette spray a base acrilica. Si applica del nastro adesivo di carta per proteggere le basi dei provini dalla vernice (Figura 15 e Figura 22). Si danno due mani di bianco opaco e successivamente, con uno spray nero si genera un pattern di puntini (Figura 23 e Figura 24), le cui dimensioni rientrano in un prestabilito range.

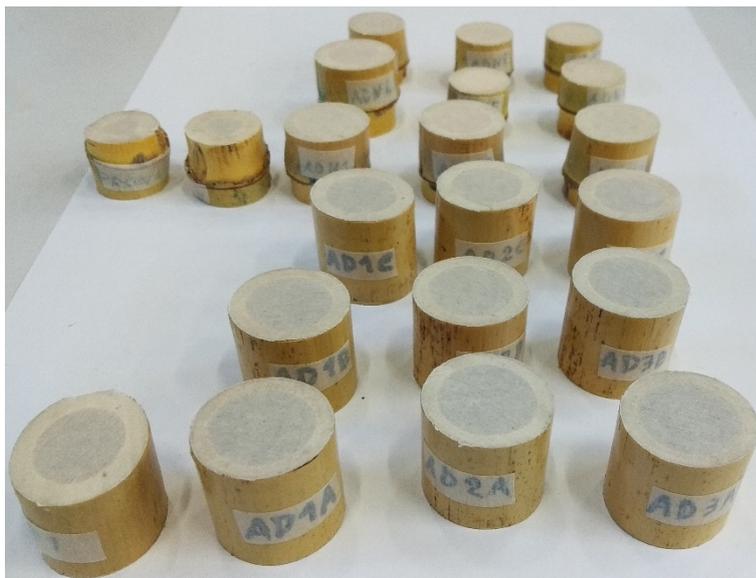


Figura 22: preparazione dei campioni alla verniciatura



Figura 23: campioni verniciati per la DIC

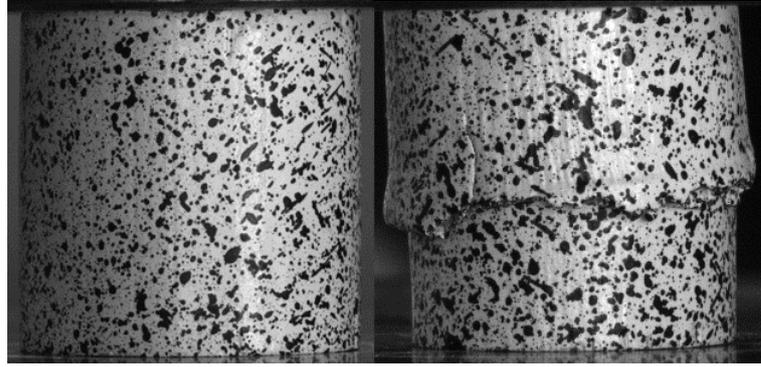


Figura 24: verniciatura di un internodo (a sinistra) e di un nodo (a destra)

3.2.4 Modello di calcolo adottato

Lo sforzo normale di compressione è calcolato come:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad [MPa] \quad (3.1)$$

dove

P carico assiale

A area della sezione trasversale

L'area della sezione trasversale è calcolata come:

$$A = \pi (D_o t - t^2) \quad [mm^2] \quad (3.2)$$

dove

D_o diametro esterno medio

t spessore medio

Il modulo di elasticità in compressione parallela alle fibre E_c (modulo di Young), si calcola come la secante tra le coppie σ - ϵ corrispondenti al 20% ed al 60% del carico ultimo P_{max}

$$E_c = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{20}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{20}} \quad [MPa] \quad (3.3)$$

dove

σ_{60}, σ_{20} tensioni corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del carico massimo di compressione

$\epsilon_{60}, \epsilon_{20}$ deformazioni assiali medie lette dall'estensimetro verticale corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del carico massimo di compressione

Per i campioni internodo si determina il coefficiente di dilatazione trasversale ν (coefficiente di Poisson) a rottura come:

$$\nu = \frac{\epsilon_o}{\epsilon_v} \quad [-] \quad (3.4)$$

dove

ϵ_o deformazione trasversale media corrispondente al carico massimo

ϵ_v deformazione assiale media corrispondente al carico massimo

Trattandosi di un materiale non omogeneo, il coefficiente di Poisson potrà risultare maggiore di 0,5.

3.3 TRAZIONE IN DIREZIONE PARALLELA ALLE FIBRE

3.3.1 Apparato di prova

I test a trazione vengono eseguiti tramite la macchina universale Galdabini, la quale monta una cella di carico di carico da 100 kN, ed è dotata di un LVDT interno che fornisce la lettura dello spostamento ma solo per prove a trazione. La testa inferiore della macchina è fissa, quella superiore è libera di ruotare (Figura 25). Il campione è vincolato agli afferraggi, che esercitano una pressione regolabile tramite manometro. Si è appurato con dei test preliminari che la pressione ideale per evitare l'ovalizzazione delle zanche di ancoraggio corrisponde alla pressione minima applicabile dalla pressa (circa 2 ton). I test si eseguono in controllo di spostamento, con una velocità di carico di 0.4 mm/min e una frequenza di acquisizione dei fotogrammi di circa 1/700-1/800 ms. La prova è monitorata con la DIC.



Figura 25: Macchina universale GALDABINI

3.3.2 Preparazione dei campioni e problematiche riscontrate

La (ISO_22157, 2019) fornisce le seguenti indicazioni sulla preparazione dei campioni di bambù per la prova a trazione (vedi Figura 26):

- la sezione dei campioni si approssima a rettangolare, con altezza pari allo spessore δ e larghezza $b = \delta/2$;
- la luce tra gli ancoraggi deve risultare compresa tra 50 mm e 100 mm;
- l'ancoraggio deve impedire scorrimento e schiacciamento dei campioni;
- l'orientamento delle fibre deve essere parallelo allo sviluppo longitudinale dell'elemento.

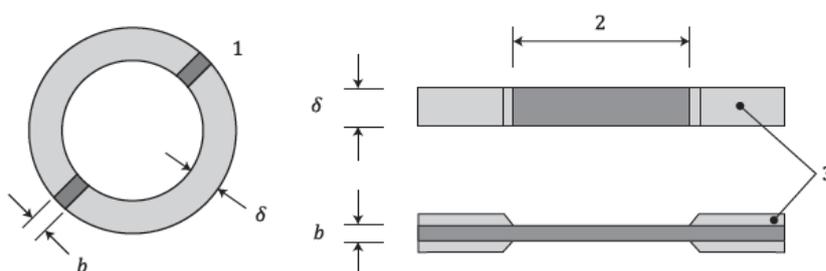


Figura 26: preparazione dei campioni a trazione secondo (ISO_22157, 2019)

In Figura 26

- 1 sezione del culmo
- 2 luce libera del campione
- 3 piastre di ancoraggio

Le limitazioni della norma relative alle dimensioni della sezione la rendono di difficile applicazione per campioni con spessore inferiore agli 8-10 mm, per i culmi di Arundo Donax lo spessore varia tra 1 mm (in sommità) e 4,5 mm (alla base), lo spessore medio a metà altezza è di circa 2,5-3,0 mm.

Ad esempio estraendo un campione con spessore medio di 3 mm, le dimensioni della sezione dovrebbero risultare di 1,5x3,0 mm e mantenersi costanti lungo circa 25 cm di lunghezza (8 cm per ogni ancoraggio e 9 cm di luce libera). Tenendo conto che la lunghezza media di un internodo è di circa 15-20 cm, splittando il culmo si intercettano sempre anche i nodi, il che rende ancora più ardua l'operazione di estrazione del campione. Data l'impossibilità di ricavare dei campioni così snelli, si è pensato di testare dei provini con una sezione avente altezza pari a 4-5 mm e larghezza pari allo spessore (Figura 27).



Figura 27: campioni a sezione rettangolare per la prova a trazione

I provini sono fissati alle estremità con dei cilindretti cavi di alluminio nei quali viene iniettata della resina (Figura 28). La procedura di assemblaggio è spiegata in dettaglio nel par. 3.3.2.1.

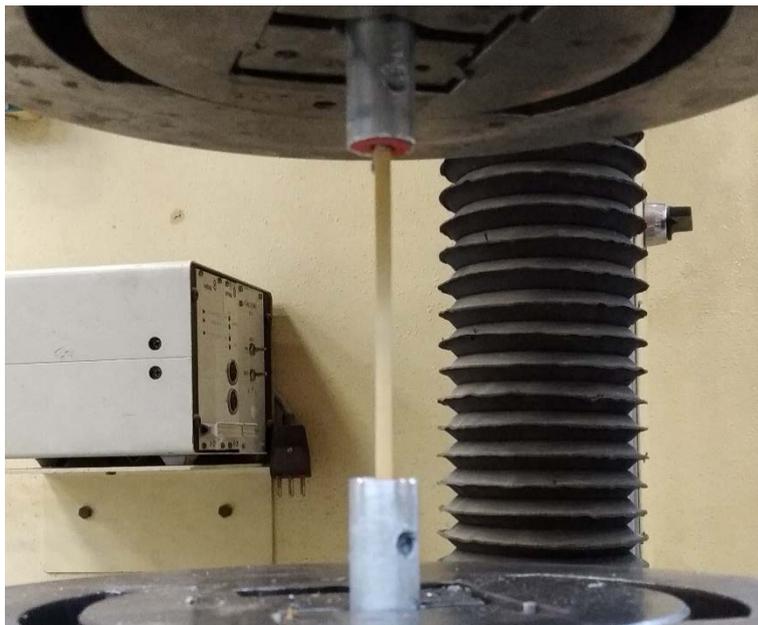


Figura 28: prova di trazione, campione internodo a sezione rettangolare

Durante i test a trazione, le rotture si verificano sempre in corrispondenza degli ancoraggi. Ciò significa che i campioni non sono soggetti ad uno sforzo normale perfettamente centrato ma che è presente una certa componente di momento flettente. Si è notato che, anche se i provini risultano il più possibile centrati e aventi sezione costante lungo lo sviluppo longitudinale, la rottura agli ancoraggi è inevitabile. Si ipotizza che il problema sia dovuto alla scarsa sensibilità della macchina di prova per carichi molto bassi, inoltre durante l'operazione di serraggio dei cilindretti la pressa induce inevitabilmente uno sforzo di compressione nell'elemento, che lo porta ad instabilizzarsi prima dell'inizio della prova.



Figura 29: rotture agli ancoraggi, prove a trazione

A seguito delle problematiche riscontrate nell'eseguire le prove di trazione con delle "strisce" di Arundo, si decide di effettuare i test su delle porzioni intere di culmo, la sezione resistente sarà quindi approssimata ad un anello. La preparazione dei campioni a trazione è stata studiata e perfezionata eseguendo una serie di test preliminari.

3.3.2.1 Assemblaggio dei campioni a trazione

La procedura di assemblaggio dei campioni può suddividersi nelle seguenti fasi:

- *Fase 1: selezione dei culmi*
Si selezionano culmi che siano il più possibile rettilinei e regolari, in particolare nella zona centrale, dove l'interasse medio tra i nodi è di circa 20 cm
- *Fase 2: taglio*
Si individuano le porzioni di culmo che rientrino nei seguenti parametri:
 - lunghezza d'internodo minima di 20 cm;
 - diametro medio compreso tra 9 mm e 11 mm
 - campioni il più possibile rettilineiLa lunghezza di ogni campione è di circa 25 cm.
- *Fase 3: carteggio e pulizia*
Si carteggiano con carta vetrata a grana fine le estremità per una lunghezza di 5-6 cm circa e si puliscono i campioni con alcool etilico (Figura 30).
- *Fase 4: realizzazione delle zanche di ancoraggio*
I cilindretti di alluminio vengono ricavati da un profilo tubolare avente diametro esterno di 20 mm e spessore di 1 mm, i fori attraverso i quali verrà iniettata la resina hanno un diametro di 7 mm e vengono effettuati a una distanza di circa 15 mm dalle basi. Una volta realizzati i pezzi si procede alla loro pulizia con alcool etilico.

- *Fase 5: centraggio dei provini*
Il centraggio degli elementi si esegue tramite comuni gommini, ricavati da un tubo idraulico, il diametro esterno è di 18 mm, quello interno di 9 mm. In alcuni casi, se il campione non risulta perfettamente rettilineo, può essere necessario apportare delle modifiche ai gommini di estremità (Figura 32).
- *Fase 6: foratura dei nodi e inserimento della spugna*
Per evitare l'ovalizzazione della sezione agli afferraggi, è necessario iniettare la resina anche all'interno delle canne, la parte centrale del campione deve però rimanere completamente inalterata e priva di resina. A tale scopo si inseriscono dei cubetti di spugna fino ad una profondità di circa 7 cm, questi elementi espandendosi fanno da "tappo" alla resina (Figura 31). Nei campioni di internodo è necessario forare il diaframma in corrispondenza dei nodi di estremità.
- *Fase 7: iniezione della resina*
Si utilizza una resina epossidica bicomponente *Sikadur-330*, che viene iniettata all'interno delle canne a partire dal fondo (Figura 33) e nei cilindri attraverso i fori praticati sulla superficie.
- *Fase 8: verniciatura*
Per preparare i campioni per la DIC è necessario dare due o tre mani leggere di bianco opaco e successivamente, con uno spray nero, generare un pattern di puntini di dimensioni prestabilite. In questo caso le dimensioni ideali dei punti sono di circa 0,5-1,0 mm² (Figura 34).

In Figura 35 e Figura 36 sono riportati in scala 1:2, gli schemi di assemblaggio dei provini per i test a trazione nel caso sia di internodi sia di nodi.



Figura 30: carteggio e pulizia dei campioni a trazione



Figura 31: assemblaggio campioni a trazione



Figura 32: dettaglio gommini di estremità, prova a trazione



Figura 33: iniezione della resina epossidica



Figura 34: campioni verniciati per la DIC e pattern di riferimento, prove a trazione

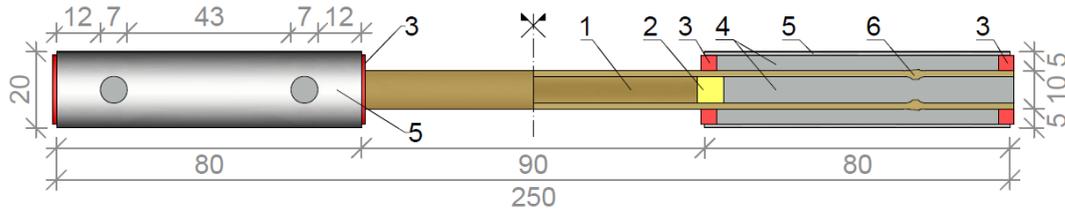


Figura 35: schema di assemblaggio internodi (scala 1:2), prova a trazione

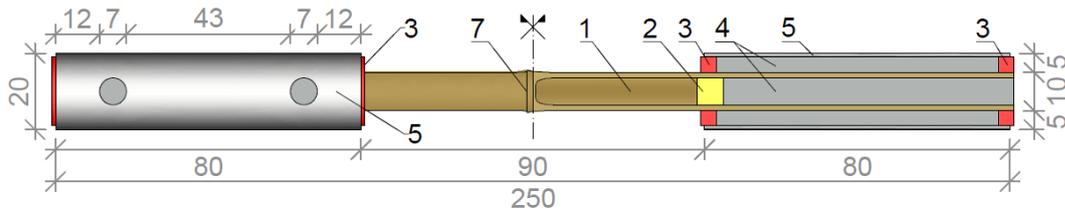


Figura 36: schema di assemblaggio campioni con nodo (scala 1:2), prova a trazione

Legenda dello schema di assemblaggio (Figura 35 e Figura 36):

- 1 porzione di culmo di AD, con diametro compreso tra 9 e 11 mm
- 2 tappo in spugna
- 3 anello in gomma per il centraggio del campione
- 4 resina epossidica bicomponente
- 5 cilindro in alluminio con fori per iniezione della resina
- 6 nodo con diaframma forato per permettere l'inserimento della spugna e l'iniezione resina
- 7 nodo inalterato

3.3.2.2 Misurazioni

Va premesso che per i campioni di internodo la rottura è sempre localizzata dove l'area della sezione trasversale è minima; invece nei campioni con nodo, il nodo stesso è l'elemento da cui nascono le fessure che portano alla rottura dell'elemento. Mentre per gli internodi risulta semplice individuare una sezione indisturbata nelle vicinanze della zona di rottura, per i campioni con nodo la zona interessata dalla rottura può essere molto più estesa e per la maggior parte dei campioni risulta arduo individuare una sezione indisturbata in cui effettuare le misurazioni dello spessore. Nell'ottica di creare una procedura standardizzata per il calcolo delle tensioni, nei campioni con nodo si misurano sempre gli spessori in corrispondenza delle sezioni vicine alle zanche di ancoraggio (D_1 , D_3) e in tali sezioni si determina la tensione assiale massima.

Di seguito viene descritta la procedura di misurazione dei campioni.

Per gli internodi:

- si prendono 3 coppie di misurazioni del diametro tra loro ortogonali, D_1 , D_2 , D_3 (Figura 37);
- si testano i provini a trazione;
- una volta avvenuta la rottura, si taglia il provino nella prima sezione integra utile adiacente alla zona di rottura e nella sezione di mezzeria (D_2);
- nelle sezioni tagliate si prendono due coppie di misurazioni dello spessore, nelle medesime direzioni ortogonali in cui sono stati rilevati i diametri.

Per i nodi:

- si prendono 4 coppie di misurazioni del diametro tra loro ortogonali, D_1 , $D_{2\text{ sup}}$, $D_{2\text{ inf}}$, D_3 (Figura 38);
- si testano i provini a trazione;
- si taglia il provino in corrispondenza delle sezioni di cui si vogliono effettuare le misurazioni dello spessore;
- si misurano gli spessori delle sezioni di estremità (dove si sono rilevati i diametri D_1 e D_3) e, se possibile, nelle sezioni integre in prossimità del nodo.

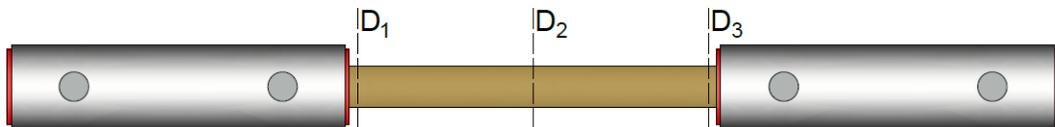


Figura 37: sezioni in cui effettuare le misurazioni, internodi

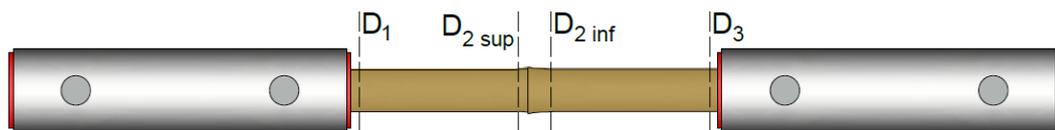


Figura 38: sezioni in cui effettuare le misurazioni, nodi

In Tabella 5, Tabella 17 e Tabella 18 sono riportate le dimensioni dei campioni.

internodi trazione	Diametri [mm]				Spessori [mm]		L [mm]
	D _{1 medio}	D _{2 medio}	D _{3 medio}	D _{r medio}	t _{2 medio}	t _{r medio}	
AD1T	10.76	10.65	10.20	10.39	1.68	1.61	87.89
AD2T	10.69	10.91	10.83	10.65	1.40	1.39	91.99
AD3T	10.97	11.00	10.69	10.72	1.55	1.56	91.75
AD4T	10.00	10.34	10.28	10.05	1.67	1.57	90.41
AD6T	11.05	11.01	10.61	10.71	1.65	1.58	91.04
AD7T	9.43	9.44	9.16	9.22	1.38	1.32	88.20
AD8T	9.99	10.32	10.50	10.15	1.49	1.46	92.00
media	10.41	10.52	10.32	10.27	1.55	1.50	90.47

Tabella 3: diametri e spessori dei campioni internodo, prova a trazione

Nodi trazione	Diametri [mm]					
	D _{1 medio}	D _{3 medio}	D _{2 sup}	D _{2 inf}	D _{R 2 sup}	D _{R 2 inf}
ADN1T	10.14	9.92	9.88	9.19	10.15	9.79
ADN2T	9.48	9.95	9.69	8.94		9.38
ADN3T	11.62	11.69	11.28	10.52		
ADN4T	10.91	10.83	11.30	10.22	11.13	
ADN5T	11.37	11.31	11.13	10.65	10.83	10.46
ADN6T	10.37	10.67	10.01	9.51	10.19	10.29
ADN7T	11.02	11.51	11.77	11.47	11.45	
ADN8T	9.47	9.44	8.98	8.49		
media	10.55	10.66	10.50	9.87	10.75	9.98

Tabella 4: diametri dei campioni con nodo, prova a trazione

nodi trazione	Spessori [mm]				L [mm]
	t ₁	t ₃	t _{R 2 sup}	t _{R 2 inf}	
ADN1T	1.39	1.39	1.41	1.41	89.18
ADN2T	1.46	1.40		1.28	86.26
ADN3T	1.59	1.53			90.31
ADN4T	1.42	1.41	1.46		84.24
ADN5T	1.56	1.69	1.65		87.00
ADN6T	1.37	1.49	1.41	1.68	90.00
ADN7T	1.68	1.70	1.77		86.29
ADN8T	1.33	1.27			89.25
media	1.47	1.49	1.54	1.45	87.82

Tabella 5: spessori dei campioni con nodo, prova a trazione

3.3.3 Modello di calcolo adottato

Lo sforzo normale di trazione è calcolato come:

$$\sigma_t = \frac{P}{A} [MPa] \quad (3.5)$$

dove

P carico assiale di trazione

A area della sezione trasversale calcolata con la (3.2)

Il modulo di elasticità in trazione parallela alle fibre E (modulo di Young), si calcola come la secante tra le coppie σ - ϵ corrispondenti al 20% ed al 60% del carico ultimo P_{\max}

$$E_t = \frac{\sigma_{60} - \sigma_{20}}{\epsilon_{60} - \epsilon_{20}} [MPa] \quad (3.6)$$

dove

σ_{60}, σ_{20} tensioni corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del carico massimo di trazione

$\epsilon_{60}, \epsilon_{20}$ deformazioni assiali medie lette dall'estensimetro verticale corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del carico massimo di trazione

Analogamente ai test di compressione, per i campioni internodo si determina il coefficiente di dilatazione trasversale ν a rottura con la (3.4).

3.4 COMPRESSIONE TRASVERSALE (C-TYPE)

3.4.1 Apparato di prova

Per i test di compressione trasversale si è utilizzata la macchina universale elettromeccanica Amsler Wolpert con cella dinamometrica da 1 kN. I test sono eseguiti in controllo di spostamento, con una velocità di carico 0,75 mm/min. La prova è monitorata con la DIC (Figura 39), con frequenza di acquisizione dei fotogrammi di circa 1/1000 ms. Affinché la distribuzione del carico sia uniforme, si dispongono due spessori in gomma alla base e alla sommità del provino (Figura 40).

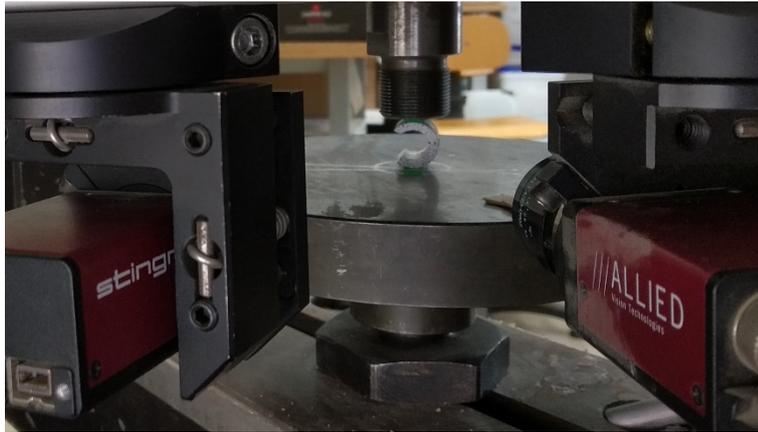


Figura 39: set up di prova, C-type

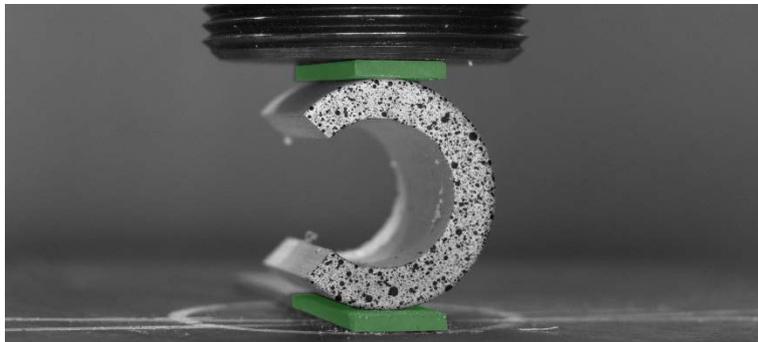


Figura 40: provino AD20C durante la prova di compressione trasversale

La (ISO_22157, 2019) suggerisce di eseguire la prova su anelli interi estratti dagli internodi (Figura 41); le limitazioni di tale procedura sono evidenti:

- non si conoscono a priori le sezioni in cui avverrà la rottura;
- il problema non è risolvibile in forma chiusa se si introduce l'ipotesi di modulo elastico variabile lungo lo spessore.

Nel par. 3.4.3 verrà esposto in dettaglio come tali problematiche possano rivolgersi con l'adozione di campioni *C-type*.



Figura 43: campioni C-type verniciati per la DIC

C-type	Spessori [mm]				Diametri [mm]					L [mm]
	t _{min}	t _{max}	t _{medio}	t _{mezzeria}	D _{min}	D _{max}	D _{medio}	D _{max} -D _{min}	0.05 D _{max}	
AD1LC	3.45	4.08	3.77	4.08	21.99	22.80	22.40	0.81	1.14	21.61
AD2LC	3.44	4.13	3.79	4.05	22.22	23.14	22.68	0.92	1.16	20.16
AD3LC	3.50	4.22	3.86	4.02	22.17	23.30	22.74	1.13	1.17	21.85
AD1MC	4.11	4.68	4.40	4.51	20.43	21.08	20.76	0.65	1.05	21.49
AD2MC	4.22	4.90	4.56	4.22	20.63	21.64	21.14	1.01	1.08	19.62
AD3MC	4.43	4.99	4.71	4.92	20.75	21.74	21.25	0.99	1.09	20.95
AD1NC	3.17	3.50	3.34	3.34	22.20	23.09	22.65	0.89	1.15	22.10
AD2NC	3.14	3.23	3.19	3.14	22.86	24.02	23.44	1.16	1.20	21.92
AD3NC	2.91	3.09	3.00	3.09	22.96	24.14	23.55	1.18	1.21	20.64
AD1OC	3.45	3.81	3.63	3.81	19.95	20.28	20.12	0.33	1.01	21.61
AD2OC	3.44	3.86	3.65	3.86	19.91	20.50	20.21	0.59	1.03	21.60
AD3OC	3.33	3.97	3.65	3.97	19.98	20.69	20.34	0.71	1.03	21.34
media	3.55	4.04	3.79	3.92	21.34	22.20	21.77	0.86	1.11	21.24

Tabella 6: dimensioni dei campioni C-type

3.4.3 Modello di calcolo adottato

Come per molte specie di bambù, nell'Arundo Donax la densità delle fibre è crescente dall'interno verso l'esterno della sezione. Si ipotizza quindi che anche il

modulo elastico in direzione circonferenziale vari lungo lo spessore (Molari_L._Garcia_J., 2020).

Si approssima il provino ad un arco di circonferenza a sezione rettangolare. In una trave curva soggetta a flessione semplice, l'asse neutro è eccentrico rispetto al baricentro della sezione (Figura 44).

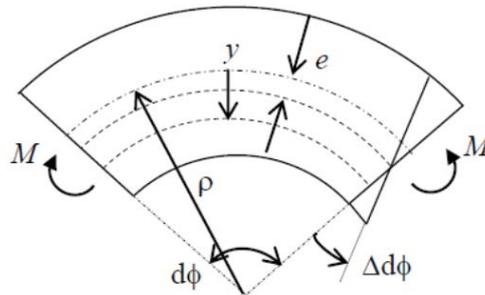


Figura 44: elemento infinitesimo di trave curva soggetto a flessione semplice (Molari_L._Garcia_J., 2020)

In Figura 44

M momento flettente

ρ raggio medio

y distanza (coordinata radiale) della fibra dall'asse neutro

$d\phi$ ampiezza dell'arco di corona circolare infinitesimo

$\Delta d\phi$ angolo di rotazione della sezione (ipotizzando la conservazione delle sezioni piane)

Di seguito si riportano le soluzioni in forma chiusa per casi di materiale omogeneo ed eterogeneo.

Caso omogeneo ($E = cost$)

Nel caso in esame l'elemento è soggetto ad uno sforzo normale eccentrico.

La tensione normale $\sigma(y)$ si calcola come:

$$\sigma = \frac{E\Delta d\phi}{d\phi} \frac{(y - e)}{(\rho - y)} \quad (3.7)$$

L'eccentricità e e la costante $E\Delta d\phi/d\phi$ si ottengono imponendo l'equilibrio degli sforzi interni:

$$\int_A \sigma dA = N \quad (3.8)$$

$$\int_A \sigma y dA = M \quad (3.9)$$

Sostituendo la (3.7) nella (3.8) si ottiene,

$$N = \int_A \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \frac{(y-e)}{(\rho-y)} dA = \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \int_A \frac{(y-e)}{(\rho-y)} dA$$

da cui

$$\int_A \frac{(y-e)}{(\rho-y)} dA = \frac{N}{E \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}} \quad (3.10)$$

segue che

$$\int_A \frac{y}{(\rho-y)} dA - \int_A \frac{e}{(\rho-y)} dA = \frac{N}{E \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}} \quad (3.11)$$

Si definisce il primo integrale della (3.11) in funzione del parametro m , tale che,

$$m = \frac{1}{A} \int_A \frac{y}{(\rho-y)} dA \quad (3.12)$$

Il secondo integrale della (3.11) può essere riscritto come:

$$\begin{aligned} \int_A \frac{e}{(\rho-y)} dA &= \frac{e}{\rho} \int_A \frac{\rho}{(\rho-y)} dA = \\ &= \int_A \left[1 + \frac{y}{(\rho-y)} \right] dA = \frac{e}{\rho} [A + mA] = \frac{eA(1+m)}{\rho} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Sostituendo la (3.12) e la (3.13) nella (3.11) si ottiene la seguente espressione:

$$mA - eA \frac{(1+m)}{\rho} = \frac{N}{E \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi}} \quad (3.14)$$

Il termine $E\Delta d\varphi/d\varphi$ può essere esplicitato tramite l'equazione (3.9). Sostituendo la (3.7) nella (3.9) si ottiene,

$$\begin{aligned} M &= \int_A \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \frac{(y-e)y}{(\rho-y)} dA = \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \int_A \frac{(y^2 - ey)}{(\rho-y)} dA = \\ &= \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \left[\int_A \frac{y^2}{(\rho-y)} dA - e \int_A \frac{y}{(\rho-y)} dA \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Sostituendo la (3.12) nella (3.15) si esprime M in funzione del parametro m ,

$$M = \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} \left[\int_A \frac{y^2}{(\rho-y)} dA - emA \right] \quad (3.16)$$

L'integrale nella (3.16) si può semplificare come:

$$\int_A \frac{y^2}{(\rho-y)} dA = \int_A \left[-y + \frac{\rho y}{\rho-y} \right] dA = \rho mA \quad (3.17)$$

da cui la (3.16) può essere riscritta come:

$$M = \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} [\rho mA - emA] = \frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} mA(\rho - e) \quad (3.18)$$

segue che

$$\frac{E\Delta d\varphi}{d\varphi} = \frac{M}{mA(\rho - e)} \quad (3.19)$$

Sostituendo l'equazione (3.19) nella (3.7) e nella (3.14), si esprimono la distribuzione della tensione normale e l'eccentricità e in termini di momento flettente,

$$\sigma = \frac{M(y - e)}{mA(\rho - e)(\rho - y)} \quad (3.20)$$

$$e = \frac{m \left(1 - \frac{\rho N}{M}\right)}{\frac{1 + m}{\rho} - \frac{mN}{M}} \quad (3.21)$$

Il parametro m è dipendente solo dalle caratteristiche geometriche dell'elemento, per una sezione rettangolare la (3.12) può essere riscritta come:

$$m = \frac{\rho}{t} \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right) - 1 \quad (3.22)$$

Come noto, durante una prova meccanica il modulo elastico varia al variare del carico applicato. Per il caso omogeneo il modulo elastico viene calcolato come

$$E^{(i)} = \frac{\sigma(y)}{\epsilon(y)} \quad (3.23)$$

con

$E^{(i)}$ modulo elastico allo step di carico i -esimo

$\sigma(y)$ tensione alla coordinata radiale y dall'asse neutro

$\epsilon(y)$ deformazione alla coordinata radiale y dall'asse neutro

Caso eterogeneo (E variabile)

Si ipotizza che il modulo elastico vari linearmente lungo lo spessore,

$$E(v) = c_0 + c_1 v \quad (3.24)$$

dove c_0 e c_1 sono delle costanti e v è la distanza dal centro di curvatura in funzione di y ,

$$v = \rho - y \quad (3.25)$$

Esprimendo v in termini di raggio interno R_i e raggio esterno R_o , rispettivamente, è possibile definire il modulo elastico al lembo interno E_i e al lembo esterno E_o come:

$$E(v) = \frac{E_i R_o - E_o R_i}{R_o - R_i} + \left(\frac{E_o - E_i}{R_o - R_i} \right) v \quad (3.26)$$

Sostituendo la (3.24) nella (3.7) si ha che

$$\sigma = \frac{\Delta d\phi (c_0 + c_1 v)}{d\phi} \left(\frac{y - e}{v} \right) \quad (3.27)$$

Si sostituisce la (3.27) nell'equazione (3.8) per esplicitarla in funzione della distanza dall'asse neutro y ,

$$\int_A (c_0 + c_1 v) \left(\frac{y - e}{v} \right) \frac{\Delta d\phi}{d\phi} dA = N$$

da cui

$$c_0 \int_A \left(\frac{y - e}{\rho - y} \right) dA + c_1 \int_A v \left(\frac{\rho - e - v}{v} \right) dA = \frac{N}{\left(\frac{\Delta d\phi}{d\phi} \right)} \quad (3.28)$$

Risolvendo il secondo integrale della (3.28) si ottiene,

$$\begin{aligned} \int_A v \left(\frac{\rho - e - v}{v} \right) dA &= \int_A (\rho - e) dA - \int_A v dA = \\ &= (\rho - e)A - \rho A = -eA \end{aligned} \quad (3.29)$$

Tenendo conto anche delle (3.10) e (3.14), la (3.28) può essere riscritta come

$$c_0 \left[mA - \frac{eA}{\rho} (1 + m) \right] + c_1 (-eA) = \frac{N}{\left(\frac{\Delta d\phi}{d\phi} \right)} \quad (3.30)$$

Per determinare e si deve esplicitare il termine $\Delta d\phi/d\phi$ tramite l'equazione (3.9).

Sostituendo la (3.27) in (3.9) si ottiene,

$$\frac{\Delta d\phi}{d\phi} \int_A (c_0 + c_1 v) \frac{y(y - e)}{\rho - y} dA = M \quad (3.31)$$

segue che

$$\frac{\Delta d\phi}{d\phi} \left[c_0 \int_A \frac{y(y-e)}{\rho-y} dA + c_1 \int_A v \frac{y(y-e)}{\rho-y} dA \right] = M \quad (3.32)$$

Analogamente al caso omogeneo, il primo integrale può essere riscritto come,

$$\int_A \frac{y(y-e)}{\rho-y} dA = (\rho-e)mA \quad (3.33)$$

Risolviendo il secondo integrale si trova che,

$$\int_A (v) \frac{y(y-e)}{\rho-y} dA = \int_A (y^2 - ey) dA = I - e \int_A y dA = I \quad (3.34)$$

dove I è il momento d'inerzia della sezione. Il secondo integrale è nullo perché rappresenta il momento statico della sezione rispetto al suo baricentro.

Sostituendo (3.33) e (3.34) in (3.32) si ottiene:

$$\frac{\Delta d\phi}{d\phi} = \frac{M}{c_0(\rho-e)mA + c_1 I} \quad (3.35)$$

L'andamento dello sforzo normale e l'eccentricità si ottengono sostituendo la (3.35) rispettivamente nella (3.27) e nella (3.30).

$$\sigma = \frac{M(c_0 + c_1 v)(y-e)}{[c_0(\rho-e)mA + c_1 I]v} = \frac{M(1 + (\frac{c_1}{c_0})v)(y-e)}{[(\rho-e)mA + (\frac{c_1}{c_0})I]v} \quad (3.36)$$

$$c_0[mA - \frac{eA}{\rho}(1+m)] + c_1(-eA) = \frac{N}{\frac{M}{c_0(\rho-e)mA + c_1 I}}$$

$$e = \frac{\frac{N}{M}(c_0 \rho mA + c_1 I) - c_0 mA}{\frac{N}{M(c_0 mA)} - c_0 \frac{A}{\rho}(1+m) - c_1 A} \quad (3.37)$$

il parametro m è definito nella (3.22).

3.5 TAGLIO

Tra i test di caratterizzazione meccanica del bambù, la prova a taglio risulta una delle più complesse da eseguire. Secondo uno studio condotto da (Felipe_López_L._et_al, 2019) su 20 internodi della specie *Bambusa blumeana*, seguendo le indicazioni suggerite dalla (ISO_22157, 2019), solo nel 65% dei campioni si verifica una rottura a taglio in direzione parallela alle fibre, la restante parte va in crisi per compressione assiale o per flessione. Per l'Arundo Donax la prova a taglio risulta ancor più complessa, date le ridotte dimensioni dei campioni.

3.5.1 Apparato di prova

Anche i test a taglio vengono eseguiti tramite la macchina universale Galdabini ma, in questo caso, bisogna montare un LVDT esterno (Figura 45). La prova è monitorata con la DIC, la velocità di carico è di 0,2-0,3 mm/min e la frequenza di acquisizione delle immagini è di 1/700-1/1000 ms.



Figura 45: apparato di prova, test a taglio

3.5.2 Prova di taglio da normativa

Per la (ISO_22157, 2019), la prova a taglio va eseguita secondo lo schema riportato in Figura 46

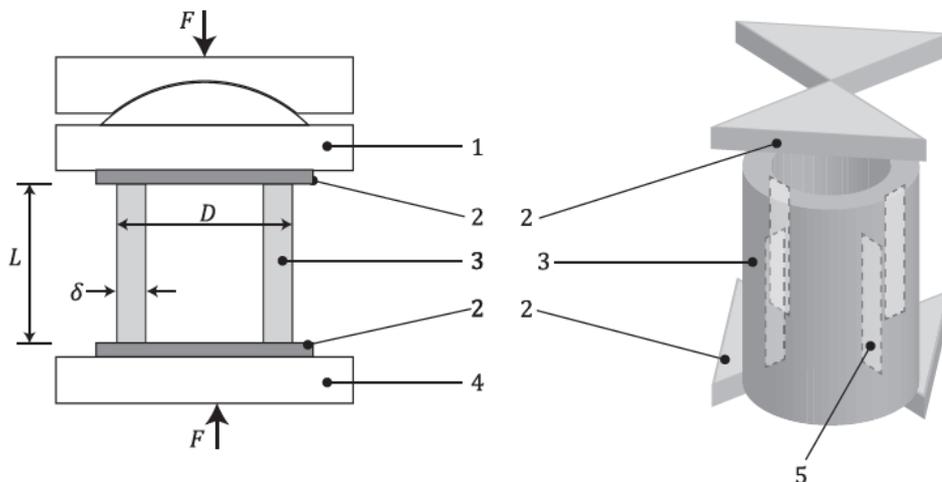


Figura 46: schema di prova a taglio da normativa (ISO_22157, 2019)

dove

- δ spessore del campione
- D diametro esterno
- F carico applicato
- L altezza del provino ($L = \min \{D; 10\delta\}$; se $D < 20$ mm, $L=2D$)
- 1 piastra di carico superiore con cuscinetto a sfera
- 2 piastre di taglio
- 3 campione di bambù
- 4 piastra inferiore
- 5 superfici di scorrimento a taglio.

Dal punto di vista teorico l'approccio suggerito dalla norma consiste in un caricamento simmetrico del campione. Inferiormente l'elemento è supportato su due quadranti opposti, mentre superiormente è caricato in corrispondenza degli altri due quadranti. Le limitazioni applicative di tale prova sono molteplici:

- le basi superiore e inferiore devono essere perfettamente piane (con un errore massimo pari all'1% del diametro esterno), parallele tra loro e perpendicolari all'asse longitudinale del provino;
- lo spessore del campione deve risultare il più possibile omogeneo;
- le piastre di taglio devono mantenersi perfettamente allineate rispetto al campione ed essere realizzate con un materiale molto rigido (es. in acciaio).

Inoltre, se la presenza del cuscinetto superiore può da un lato garantire un migliore contatto con le superfici del campione, dall'altro impedisce la perfetta planarità delle quattro superfici di scorrimento.

Si sono effettuati dei test preliminari su una decina di internodi di AD aventi altezza pari ad una o due volte il diametro esterno. Le prove non hanno mai fornito delle rotture soddisfacenti; nei casi più prossimi alla rottura a taglio si assisteva alla formazione di una o al più due superfici di scorrimento, nella maggior parte dei casi la rottura avveniva per flessione, come mostrato in Figura 47.

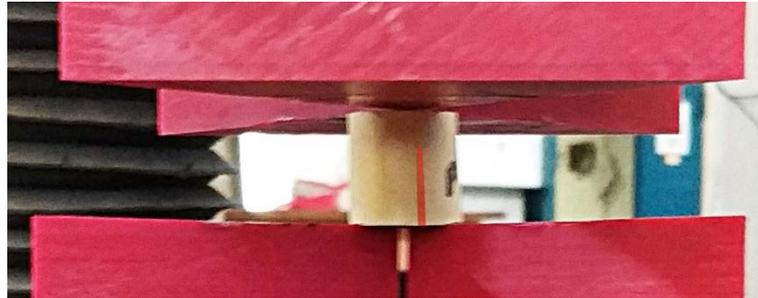


Figura 47: rottura per flessione durante prova a taglio eseguita secondo la (ISO_22157, 2019). È evidenziata in rosso la formazione di una fessura verticale.

3.5.3 Progetto di un'apparecchiatura a taglio alternativa

In questo paragrafo si illustra il progetto di un'apparecchiatura per il test a taglio sviluppata in laboratorio al fine di semplificare la metodologia di prova proposta dalla (ISO_22157, 2019).

Un metodo di prova alternativo è stato studiato da (Felipe_López_L._et_al, 2019), in cui i provini testati sono degli internodi splittati a metà (la sezione è un semianello). Tale procedura presenta la problematica che durante l'applicazione del carico la rotazione del campione non è del tutto impedita, il provino infatti non è né vincolato né caricato simmetricamente (Figura 48).



Figura 48: prova di taglio alternativa secondo (Felipe_López_L._et_al, 2019)

Se durante la prova di carico il campione ruota su se stesso, si genera una torsione indesiderata in corrispondenza dell'unica possibile superficie di scorrimento e la rottura non avviene per taglio puro. La percentuale di prove in cui si verifica una rottura a taglio con il metodo proposto da (Felipe_López_L._et_al, 2019) è pari al 55%, inferiore a quella ottenuta con il metodo proposto dalla normativa.

Preso atto di tali problematiche, si progetta un'apparecchiatura per la prova a taglio che porti alla formazione di due superfici di scorrimento. In Figura 49 è rappresentato il modello 3D della strumentazione a taglio; l'apparecchiatura di prova realizzata in laboratorio è riportata in Figura 50.

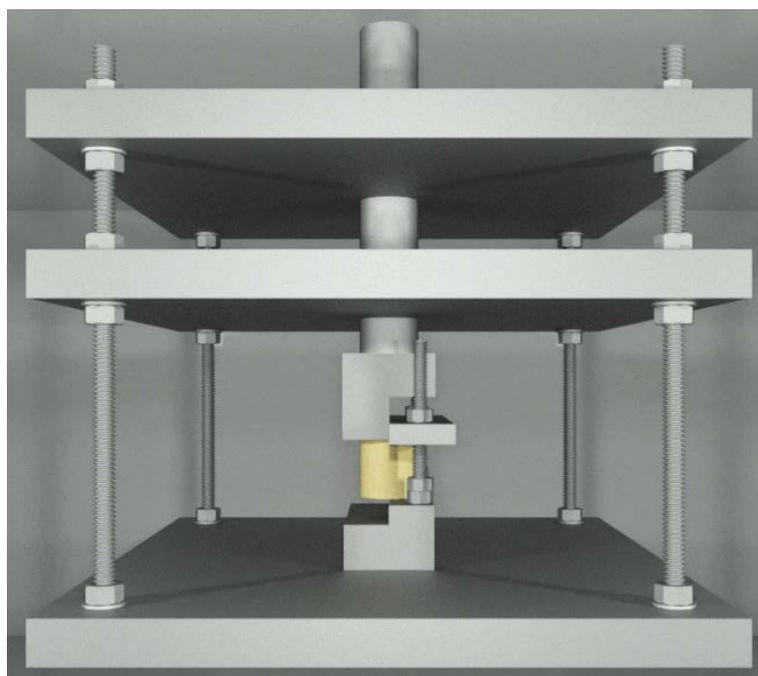


Figura 49: modello 3D dell'apparecchiatura a taglio alternativa sviluppata in laboratorio

Procedendo dal basso verso l'alto, l'apparecchiatura è formata da:

- piastra metallica inferiore di dimensioni 12x180x180 mm, agli spigoli presenta quattro fori filettati per il collegamento con le piastre superiori e un foro filettato centrale per l'ancoraggio dello "scalino" su cui poggia il provino;
- sistema di vincolamento del campione, composto da un elemento a scalino e da una piastra di fissaggio superiore;

- cilindro scorrevole, scorre all'interno delle due piastre superiori ed è dotato di una testa piatta per mezzo della quale esercita la forza di taglio sul campione;
- piastre superiori, garantiscono il centraggio dell'elemento cilindrico e gli impediscono di traslare in direzione orizzontale.

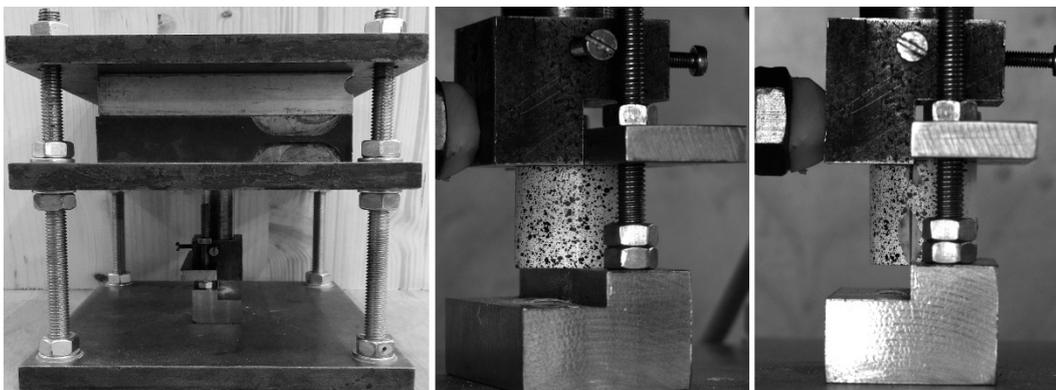


Figura 50: da sinistra verso destra; apparecchiatura a taglio, campione AD4ES prima dell'applicazione del carico, campione AD4ES a rottura

3.5.4 Selezione e misurazione dei campioni

La procedura di selezione e preparazione dei provini, inclusa la verniciatura per la DIC (Figura 50) è del tutto analoga a quanto descritto per la prova di compressione assiale (parr. 3.2.2; 3.2.3). I test a taglio vengono eseguiti su una popolazione di 24 campioni, di cui 12 internodi e 12 nodi. In Tabella 7 e Tabella 8 sono riportate le dimensioni dei provini.

internodi taglio	Spessori [mm]			Diametri [mm]			L [mm]
	t_{\min}	t_{\max}	t_{medio}	D_{\min}	D_{\max}	D_{medio}	
AD1DS	2.50	2.69	2.60	18.16	18.36	18.26	18.26
AD2DS	2.29	2.71	2.50	17.82	17.88	17.85	17.85
AD3DS	2.22	2.69	2.46	18.14	18.64	18.39	18.39
AD4DS	2.26	2.63	2.45	18.21	18.62	18.42	18.42
AD1ES	2.51	3.05	2.78	18.54	18.76	18.65	18.65
AD2ES	2.49	2.88	2.69	18.62	19.10	18.86	18.86
AD3ES	2.44	2.84	2.64	18.08	19.08	18.58	18.58
AD4ES	2.39	2.92	2.66	17.99	19.02	18.51	18.51

AD1FS	2.55	2.99	2.77	19.25	19.84	19.55	19.55
AD2FS	2.27	3.02	2.65	18.86	19.73	19.30	19.30
AD3FS	2.55	3.02	2.79	19.32	19.82	19.57	19.57
AD4FS	2.76	3.36	3.06	19.03	19.32	19.18	19.18
media	2.44	2.90	2.67	18.50	19.01	18.76	18.76

Tabella 7: dimensioni dei campioni di internodo, taglio

nodi taglio	Spessori [mm]					Diametri [mm]					[mm]
	t _{1 sup}	t _{2 sup}	t _{1 inf}	t _{2 inf}	t _{medio}	D _{min sup}	D _{max sup}	D _{min inf}	D _{max inf}	D _{medio}	L
ADN10	3.31	2.83	3.50	3.59	3.07	19.00	19.41	17.04	17.92	18.34	18.34
ADN11	2.89	3.11	3.32	2.98	3.00	18.50	19.06	16.63	17.27	17.87	17.87
ADN12	2.82	3.05	3.38	3.37	2.94	18.22	18.97	16.20	16.98	17.59	17.59
ADN13	3.56	3.22	3.52	3.07	3.39	18.30	18.65	15.86	16.46	17.32	17.32
ADN14	2.70	2.71	2.87	2.65	2.71	17.35	18.37	15.47	16.46	16.91	16.91
ADN15	3.23	3.71	3.51	4.05	3.47	16.88	17.42	15.23	16.27	16.45	16.45
ADN16	3.40	3.21	3.29	3.25	3.31	16.87	17.05	15.42	16.07	16.35	16.35
ADN17	3.04	2.98	3.14	3.35	3.01	17.94	18.53	15.92	16.74	17.28	17.28
ADN18	2.75	2.58	2.86	2.98	2.67	17.50	18.33	15.73	16.60	17.04	17.04
ADN19	3.04	3.26	3.35	3.52	3.15	16.88	17.25	15.24	15.70	16.27	16.27
ADN20	2.80	3.03	3.31	3.60	2.92	19.13	19.38	17.30	17.70	18.38	18.38
ADN21	3.41	3.26	3.75	3.81	3.34	16.81	17.68	15.68	16.28	16.61	16.61
media	3.08	3.08	3.32	3.35	3.08	17.78	18.34	15.98	16.70	17.20	17.20

Tabella 8: dimensioni dei campioni con nodo, taglio

3.5.5 Modello di calcolo adottato

La tensione tangenziale media sulle superfici di scorrimento viene valutata come

$$\tau = \frac{T}{L \cdot t_{medio}} \quad (3.38)$$

con

T taglio [N]

L altezza della sezione

t_{medio} spessore medio delle superfici di taglio

Come suggerito dalla (ISO_22157, 2019), è poco probabile che il collasso si verifichi con la formazione contemporanea di tutti i piani di scorrimento. Nel caso

in esame si è ridotto il possibile numero di superfici di scorrimento da quattro a due, per cui tale ipotesi è più plausibile. In ogni caso la resistenza a taglio valutata con la (3.38) è da intendersi come il limite inferiore del suo campo di variabilità.

Il modulo di elasticità tangenziale G (o modulo di taglio), si calcola come la secante tra le coppie τ - γ corrispondenti al 20% ed al 60% del taglio massimo T_{\max}

$$G = \frac{\tau_{60} - \tau_{20}}{\gamma_{60} - \gamma_{20}} [MPa] \quad (3.39)$$

dove

τ_{60}, τ_{20}	tensioni tangenziali corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del taglio massimo
γ_{60}, γ_{20}	scorrimenti angolari medi misurati lungo le superfici di scorrimento, corrispondenti rispettivamente al 20% ed al 60% del taglio massimo

3.6 UMIDITÀ E DENSITÀ DEI CAMPIONI

3.6.1 Calcolo del contenuto d'umidità

Secondo la norma (ISO_22157, 2019), i campioni per il calcolo del contenuto d'umidità devono essere preparati immediatamente dopo aver eseguito i test meccanici. La precisione minima della bilancia deve essere superiore allo 0,05% del peso del provino secco. Per il caso in esame si utilizza una bilancia marca *BEL*, modello *M 333*, con precisione di 0,01 g.

La procedura di calcolo dell'umidità consiste nelle seguenti fasi:

- si determina la massa iniziale m_0 prima di mettere i campioni in forno;
- si lasciano i campioni in forno ad una temperatura di $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$ per 24 h;
- dopo le 24 ore si pesano i provini e si determina la massa m_{24h} ;
- si mettono nuovamente i campioni in forno alla stessa temperatura e si registrano i pesi ad intervalli non inferiori alle 2 ore;
- si considera il provino completamente secco quando la differenza di massa tra le ultime due pesate è inferiore allo 0,05 % della sua massa.

In Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11 e Tabella 12 sono riportati i contenuti d'umidità dei campioni per le diverse prove meccaniche.

umidità compr. a.	pesi		umidità w [%]
	m ₀ [g]	m _{24h} [g]	
ADA	2.369	2.174	8.97%
ADB	2.365	2.169	9.04%
ADC	2.603	2.391	8.87%
ADN1	2.012	1.848	8.87%
ADN2	2.369	2.174	8.97%
ADN3	2.365	2.169	9.04%
ADN4	2.220	2.038	8.93%
ADN5	1.483	1.361	8.96%
ADN6	2.160	1.984	8.87%
ADN7	1.834	1.687	8.71%
ADN8	1.611	1.481	8.78%
ADN9	1.604	1.474	8.82%
media			8.90%

Tabella 9: contenuto d'umidità, campioni a compressione

umidità C-type	pesi		umidità w [%]
	m ₀ [g]	m _{24h} [g]	
ADLC	1.380	1.268	8.83%
ADMC	1.859	1.709	8.78%
ADNC	2.106	1.932	9.01%
ADOC	1.671	1.534	8.93%
media			8.89%

Tabella 10: contenuto d'umidità, campioni C-type

umidità trazione	pesi		umidità w [%]
	m ₀ [g]	m _{24h} [g]	
AD1T	0.615	0.574	7.14%
AD2T	0.610	0.574	6.27%
AD3T	0.376	0.352	6.82%
AD4T	0.548	0.508	7.87%
AD6T	0.709	0.661	7.26%
AD7T	0.546	0.509	7.27%
AD8T	0.490	0.458	6.99%
ADN1T	0.241	0.225	7.11%
ADN2T	0.427	0.399	7.02%
ADN3T	0.332	0.310	7.10%
ADN4T	0.300	0.282	6.38%

ADN5T	0.404	0.376	7.45%
ADN6T	0.398	0.371	7.28%
ADN7T	0.314	0.291	7.90%
ADN8T	0.504	0.470	7.23%
media			7.58%

Tabella 11: contenuto d'umidità, campioni a trazione

umidità taglio	pesi		umidità w [%]
	m ₀ [g]	m _{24h} [g]	
AD1DS	0.768	0.716	7.26%
AD2DS	0.659	0.612	7.68%
AD3DS	0.657	0.612	7.35%
AD4DS	0.724	0.672	7.74%
AD1ES	0.750	0.699	7.30%
AD2ES	0.941	0.875	7.54%
AD3ES	0.782	0.725	7.86%
AD4ES	0.661	0.614	7.65%
AD1FS	0.982	0.916	7.21%
AD2FS	0.900	0.84	7.14%
AD3FS	1.027	0.958	7.20%
AD4FS	1.069	0.999	7.01%
ADN10S	1.603	1.489	7.66%
ADN11S	1.064	0.992	7.26%
ADN12S	1.368	1.275	7.29%
ADN13S	0.861	0.803	7.22%
ADN14S	0.950	0.88	7.95%
ADN15S	1.322	1.235	7.04%
ADN16S	1.359	1.268	7.18%
ADN17S	1.741	1.619	7.54%
ADN18S	1.520	1.411	7.73%
ADN19S	1.216	1.135	7.14%
ADN20S	1.961	1.825	7.45%
ADN21S	1.628	1.518	7.25%
media			7.40%

Tabella 12: contenuto d'umidità, campioni a taglio

3.6.2 Calcolo della densità

La densità dei campioni viene calcolata con l'utilizzo di un kit che sfrutta il principio di Archimede per risalire alla densità di un solido. La densità dei provini

viene determinata tramite immersione in acqua distillata. Il campione viene prima pesato in aria (A) e poi nel liquido (B). La densità ρ del solido è calcolata a partire dai due valori misurati:

$$\rho = \frac{A}{A - B} \rho_{acqua} \quad (3.40)$$

La procedura di calcolo della densità consiste nelle seguenti fasi:

- si determina la massa iniziale m_0 del campione;
- si immerge il provino nella cera liquida al fine di non alterarne il contenuto d'umidità una volta immerso in acqua;
- si determina il peso del provino rivestito di cera $m_{0\text{ cera}}$;
- si immerge il campione in acqua e si misura la spinta idrostatica ($m_{0\text{ acqua}}$) con il kit densità, avendo cura di eliminare eventuali bolle d'aria in quanto influenzano drasticamente i risultati;

La densità della cera è nota e pari a $0,85 \text{ g/cm}^3$ (Konrath_C., 2019) per cui l'unica incognita è la densità del provino che si ricava tramite la (3.40). In Tabella 13, Tabella 14, Tabella 15 e Tabella 16 sono riportate le densità dei campioni per le diverse prove meccaniche.

densità compr. a.	m_0 [g]	$m_{0\text{ cera}}$ [g]	$ m_{0\text{ acqua}} $ [g]	$m_{0\text{ a}} + m_{0\text{ c}}$ [g]	$V_{0\text{ cera}}$ [cm ³]	$V_{\text{ cera}}$ [cm ³]	V_0 [cm ³]	ρ_0 [g/cm ³]
ADA	2.988	3.189	1.729	4.918	4.918	0.236	4.682	0.638
ADB	3.184	3.389	1.903	5.292	5.292	0.241	5.051	0.630
ADC	2.472	2.653	1.586	4.239	4.239	0.213	4.026	0.614
ADN1	2.988	3.189	1.729	4.918	4.918	0.236	4.682	0.638
ADN2	3.184	3.389	1.903	5.292	5.292	0.241	5.051	0.630
ADN3	3.443	3.656	2.302	5.958	5.958	0.251	5.707	0.603
ADN4	2.472	2.653	1.586	4.239	4.239	0.213	4.026	0.614
ADN5	1.572	1.713	0.917	2.630	2.630	0.166	2.464	0.638
ADN6	1.981	2.115	1.408	3.523	3.523	0.158	3.365	0.589
ADN7	1.830	1.973	1.194	3.167	3.167	0.168	2.999	0.610
ADN8	1.666	1.789	1.055	2.844	2.844	0.145	2.699	0.617
ADN9	1.548	1.719	0.909	2.628	2.628	0.201	2.427	0.638
media								0.622

Tabella 13: densità, campioni a compressione

densità C-type	m_0 [g]	$m_{0\text{ cera}}$ [g]	$ m_{0\text{ acqua}} $ [g]	$m_{0\text{ a}} + m_{0\text{ c}}$ [g]	$V_{0\text{ cera}}$ [cm ³]	$V_{\text{ cera}}$ [cm ³]	V_0 [cm ³]	ρ_0 [g/cm ³]
ADLC	1.281	1.395	0.962	2.357	2.357	0.134	2.223	0.576
ADMC	1.541	1.641	1.275	2.916	2.916	0.118	2.798	0.551
ADNC	2.047	2.260	1.347	3.607	3.607	0.251	3.356	0.610
ADOC	1.860	2.017	1.434	3.451	3.451	0.185	3.266	0.569
media								0.608

Tabella 14: densità, campioni C-type

densità trazione	m_0 [g]	$m_{0\text{ cera}}$ [g]	$ m_{0\text{ acqua}} $ [g]	$m_{0\text{ a}} + m_{0\text{ c}}$ [g]	$V_{0\text{ cera}}$ [cm ³]	$V_{\text{ cera}}$ [cm ³]	V_0 [cm ³]	ρ_0 [g/cm ³]
AD1T	0.656	0.707	0.370	1.077	1.077	0.060	1.017	0.645
AD2T	0.563	0.626	0.364	0.990	0.990	0.074	0.916	0.615
AD3T	0.355	0.404	0.180	0.584	0.584	0.058	0.526	0.674
AD4T	0.546	0.609	0.362	0.971	0.971	0.074	0.897	0.609
AD6T	0.609	0.666	0.317	0.983	0.983	0.067	0.916	0.665
AD7T	0.464	0.522	0.193	0.715	0.715	0.068	0.647	0.717
AD8T	0.593	0.669	0.341	1.010	1.010	0.089	0.921	0.644
ADN1T	0.225	0.268	0.085	0.353	0.353	0.051	0.302	0.744
ADN2T	0.240	0.286	0.087	0.373	0.373	0.054	0.319	0.753
ADN3T	0.258	0.295	0.126	0.421	0.421	0.044	0.377	0.683
ADN4T	0.336	0.385	0.158	0.543	0.543	0.058	0.485	0.692
ADN5T	0.369	0.423	0.174	0.597	0.597	0.064	0.533	0.692
ADN6T	0.326	0.382	0.153	0.535	0.535	0.066	0.469	0.695
ADN7T	0.229	0.280	0.181	0.461	0.461	0.060	0.401	0.571
ADN8T	0.210	0.249	0.082	0.331	0.331	0.046	0.285	0.737
media								0.676

Tabella 15: densità, campioni a trazione

densità trazione	m_0 [g]	$m_{0\text{ cera}}$ [g]	$ m_{0\text{ acqua}} $ [g]	$m_{0\text{ a}} + m_{0\text{ c}}$ [g]	$V_{0\text{ cera}}$ [cm ³]	$V_{\text{ cera}}$ [cm ³]	V_0 [cm ³]	ρ_0 [g/cm ³]
AD1DS	0.474	0.524	0.316	0.840	0.840	0.059	0.781	0.607
AD2DS	0.627	0.701	0.396	1.097	1.097	0.087	1.010	0.621
AD3DS	0.662	0.707	0.429	1.136	1.136	0.053	1.083	0.611
AD4DS	0.541	0.613	0.351	0.964	0.964	0.085	0.879	0.615
AD1ES	0.749	0.842	0.531	1.373	1.373	0.109	1.264	0.593
AD2ES	0.631	0.700	0.422	1.122	1.122	0.081	1.041	0.606
AD3ES	0.747	0.833	0.446	1.279	1.279	0.101	1.178	0.634
AD4ES	0.759	0.850	0.417	1.267	1.267	0.107	1.160	0.654

AD1FS	0.840	0.931	0.584	1.515	1.515	0.107	1.408	0.597
AD2FS	0.966	1.051	0.630	1.681	1.681	0.100	1.581	0.611
AD3FS	0.817	0.912	0.562	1.474	1.474	0.112	1.362	0.600
AD4FS	0.819	0.921	0.611	1.532	1.532	0.120	1.412	0.580
ADN10S	1.270	1.419	0.468	1.887	1.887	0.175	1.712	0.742
ADN11S	1.609	1.766	0.591	2.357	2.357	0.185	2.172	0.741
ADN12S	1.145	1.272	0.449	1.721	1.721	0.149	1.572	0.729
ADN13S	1.297	1.410	0.472	1.882	1.882	0.133	1.749	0.742
ADN14S	1.119	1.233	0.432	1.665	1.665	0.134	1.531	0.731
ADN15S	1.347	1.479	0.472	1.951	1.951	0.155	1.796	0.750
ADN16S	1.157	1.280	0.356	1.636	1.636	0.145	1.491	0.776
ADN17S	0.8550	0.984	0.295	1.279	1.279	0.158	1.121	0.758
ADN18S	0.962	1.088	0.330	1.418	1.418	0.148	1.270	0.758
ADN19S	1.202	1.322	0.338	1.660	1.660	0.141	1.519	0.791
ADN20S	1.301	1.429	0.466	1.895	1.895	0.151	1.744	0.746
ADN21S	0.729	0.803	0.260	1.063	1.063	0.087	0.976	0.747
media								0.681

Tabella 16: densità, campioni a taglio

4 ANALISI DEI RISULTATI

4.1 COMPRESSIONE ASSIALE

Per la totalità dei campioni il diagramma carico-spostamento osservato è di tipo elasto-plastico; una volta raggiunto il carico massimo, questo rimane pressoché costante all'aumentare della deformazione. In Figura 51 e Figura 52 sono rappresentati i grafici carico-spostamento per internodi e nodi.

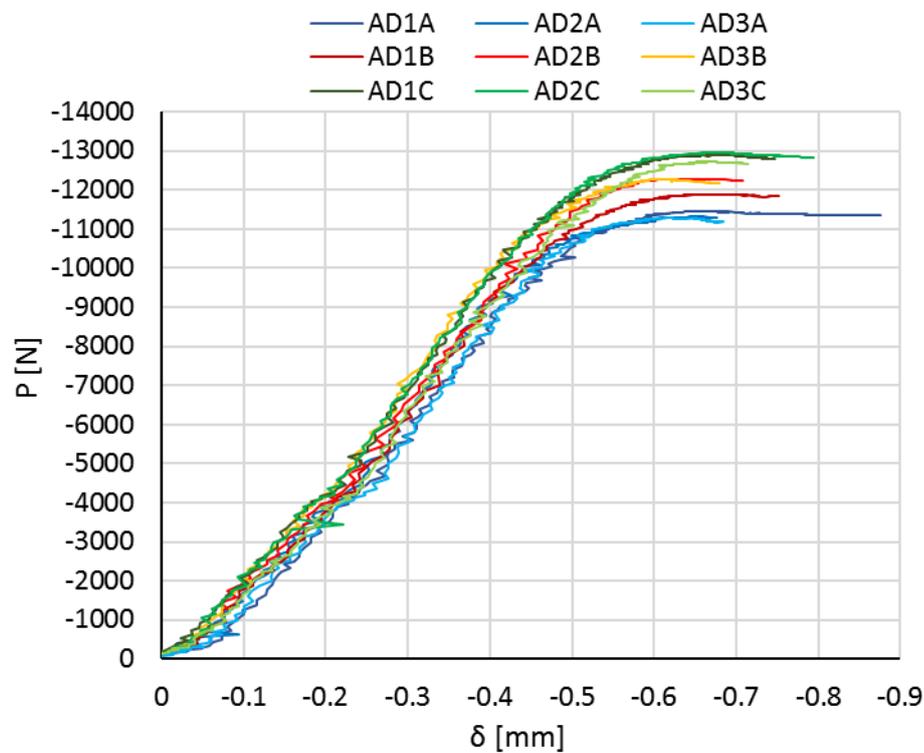


Figura 51: grafici carico-spostamento, campioni internodo

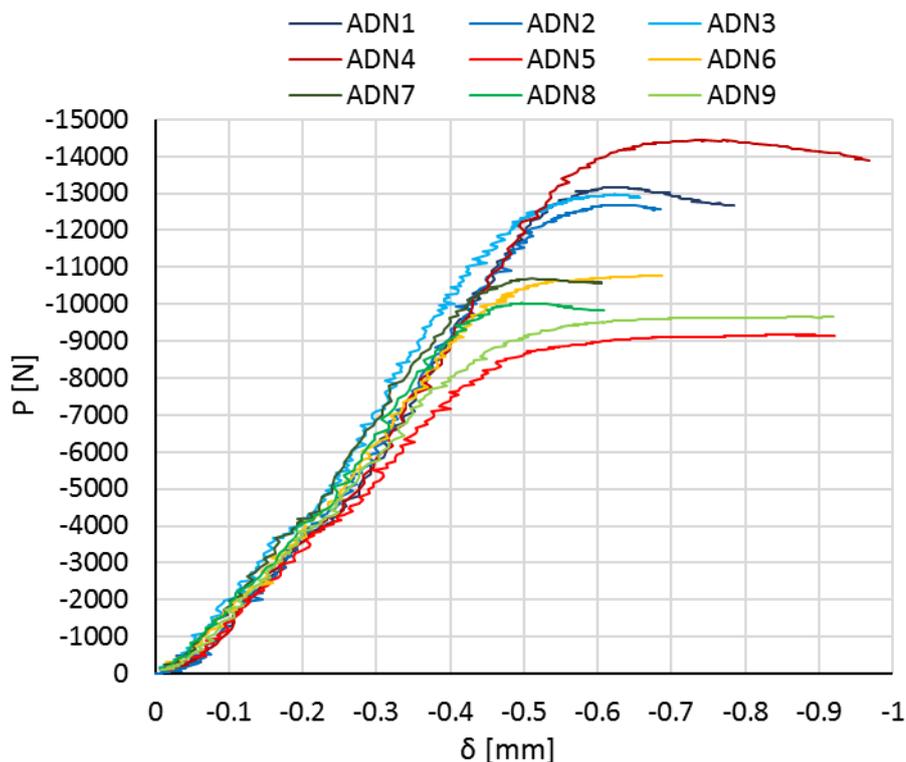


Figura 52: grafici carico-spostamento, nodi

Dal grafico di Figura 51 si nota l'omogeneità dei risultati in termini di inclinazione del ramo elastico e l'elevata duttilità del materiale, se soggetto ad un carico assiale di compressione. La resistenza a compressione è dovuta principalmente al parenchima, ossia alla matrice in cui sono inglobate le fibre. Il valore medio del modulo di Young secondo (Spatz_H._et_al., 1997) è di circa 9 GPa, per campioni provenienti dalla parte centrale del culmo, questo è leggermente inferiore nella base e nettamente più basso nella porzione alta del culmo, dove la densità di fibre è maggiore. I dati forniti da (Spatz_H._et_al., 1997) sono però solo indicativi, in quanto ricavati indirettamente da test di flessione a tre punti, sottraendo alla rigidità flessionale il contributo dovuto all'epidermide. Nel caso in esame il modulo elastico medio per i campioni di internodo è di 12,04 GPa (Tabella 17), mentre per i campioni con nodo è di 14,76 GPa (Tabella 18). Sia i campioni di internodo sia i nodi sono stati estratti dalle zone centrali dei culmi. Il coefficiente di dilatazione trasversale varia lungo il percorso di carico, nei primi step di carico ha delle grandi oscillazioni dovute al fatto che il provino sia ancora in fase di assestamento e non sia ancora entrato in campo elastico, il coefficiente tende poi a decrescere all'aumentare del carico (Tabella 17 e Figura 53).

internodi comp.	t_m [mm]	D_m [mm]	A [mm ²]	P_{max} [N]	δ [mm]	ϵ_h [-]	ϵ_v [-]	σ_c [MPa]	E [GPa]	ν [-]
AD1A	3.02	23.73	196.49	-11459.30	-0.65	0.0051	-0.0108	-58.32	9.77	0.47
AD2A	2.91	23.57	188.83	-11314.20	-0.65	0.0044	-0.0079	-59.92	13.09	0.55
AD3A	2.95	23.71	192.07	-11286.40	-0.62	0.0038	-0.0063	-58.76	18.08	0.60
AD1B	3.27	24.05	213.15	-11895.20	-0.68	0.0059	-0.0117	-55.81	13.59	0.51
AD2B	3.17	24.06	208.04	-12285.20	-0.63	0.0042	-0.0088	-59.05	12.99	0.48
AD3B	3.25	24.17	213.27	-12268.30	-0.61	0.0051	-0.0077	-57.53	11.02	0.66
AD1C	3.63	24.20	234.31	-12894.00	-0.68	0.0061	-0.0115	-55.03	9.79	0.53
AD2C	3.66	24.09	234.65	-12972.40	-0.67	0.0063	-0.0091	-55.29	11.71	0.69
AD3C	3.69	24.21	237.82	-12728.90	-0.66	0.0064	-0.0121	-53.52	8.29	0.53
media	3.28	23.97	213.18	-12122.66	-0.65	0.0053	-0.0095	-57.02	12.04	0.56
dev. st.	0.31	0.24	18.90	668.67	0.03	0.0010	0.0020	2.18	2.88	0.08

Tabella 17: valori di resistenza a compressione, campioni internodo

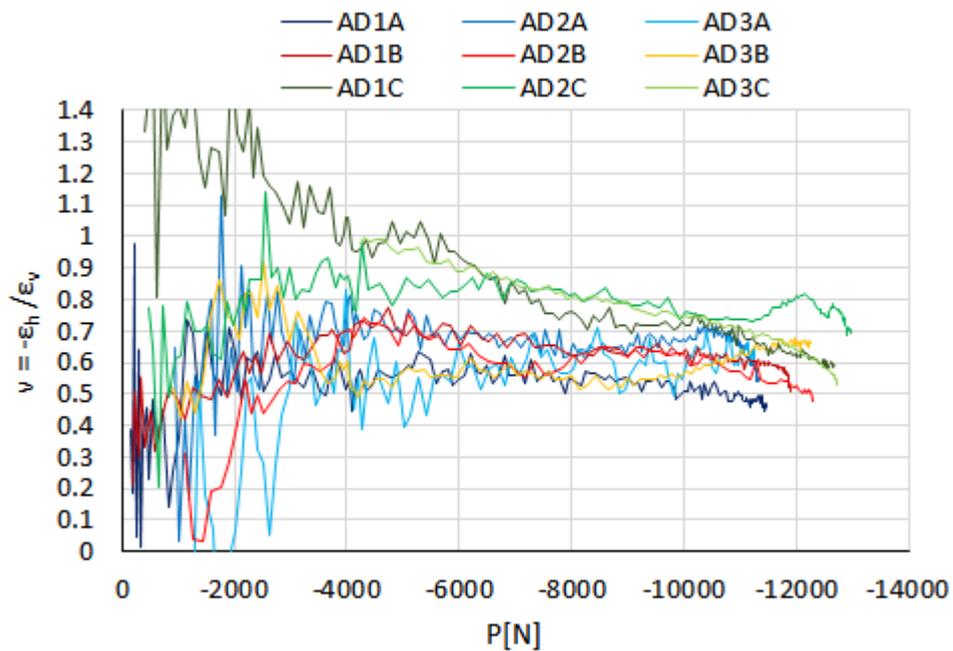


Figura 53: variabilità del coefficiente di Poisson, compressione assiale

nodi comp.	t_m [mm]	D_m [mm]	A [mm ²]	P_{max} [N]	δ [mm]	ϵ_v [-]	σ_c [MPa]	E [GPa]
ADN1	3.43	22.10	201.21	-13173.80	-0.61	-0.0049	-65.47	23.47
ADN2	3.66	22.57	217.16	-12686.80	-0.62	-0.0071	-58.42	11.89
ADN3	4.03	22.82	237.83	-12971.10	-0.61	-0.0096	-54.54	9.89
ADN4	4.44	23.16	261.05	-14434.30	-0.71	-0.0089	-55.29	9.88
ADN5	3.40	18.32	159.34	-9176.10	-0.86	-0.0080	-57.59	10.84
ADN6	4.39	19.60	209.74	-10782.40	-0.67	-0.0031	-51.41	23.62
ADN7	3.94	19.33	190.25	-10684.60	-0.49	-0.0067	-56.16	12.43
ADN8	3.69	19.07	178.05	-10026.60	-0.53	-0.0052	-56.31	17.71
ADN9	3.49	18.63	165.81	-9659.30	-0.85	-0.0072	-58.25	13.13
media	3.83	20.62	202.27	-11510.56	-0.66	-0.0067	-57.05	14.76
dev. st.	0.40	1.99	33.36	1841.29	0.13	0.0021	3.83	5.50

Tabella 18: valori di resistenza a compressione, nodi

Si esegue quindi un'analisi statistica dei risultati.

La distribuzione normale può essere usata per approssimare numerose distribuzioni di probabilità discrete (Garetto_M., 2002), definiamo la funzione di distribuzione della variabile X come:

$$f(E) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - X_m}{s} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

in cui s è la deviazione standard della popolazione, ed indica il grado di dispersione dei valori attorno alla media:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2} \quad (4.2)$$

dove

- n numero di campioni
- X_i valore del campione i esimo
- X_m media dei valori

In Figura 54 e Figura 55 sono riportate le distribuzioni di probabilità del modulo elastico e della tensione assiale massima per internodi e nodi.

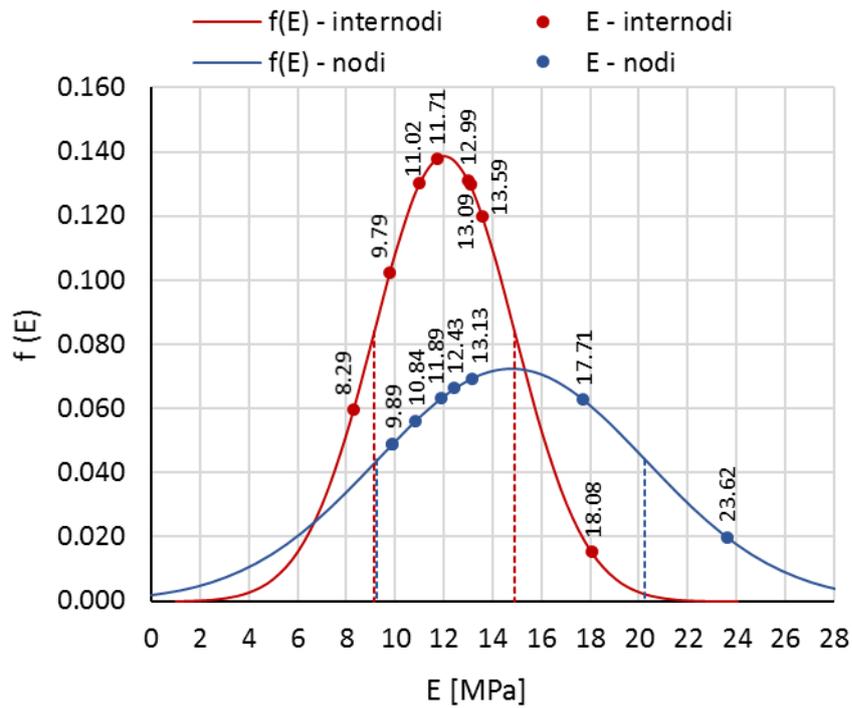


Figura 54: distribuzione normale del modulo elastico a compressione

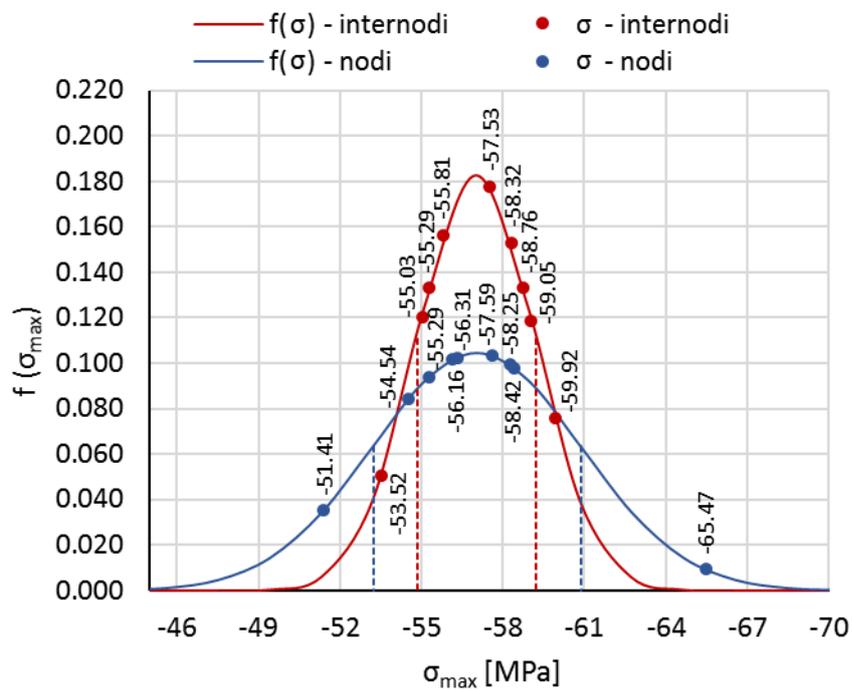


Figura 55: distribuzione normale della tensione massima a compressione

Per i nodi è evidente la forte dispersione dei valori del modulo elastico attorno alla media, a differenza degli internodi che hanno una deviazione standard molto più bassa (Figura 54), mentre in termini di tensione massima la varianza dei dati è più ridotta (Figura 55). Per il caso in esame, avendo selezionato campioni con altezza pari al diametro, la resistenza a compressione non è influenzata significativamente dal nodo (si veda Tabella 17). È lecito pensare che se il rapporto L/D fosse stato pari a 2, i campioni avrebbero risentito maggiormente dalla presenza del nodo. L'effetto confinante dovuto al diaframma interno è in ogni caso chiaramente visibile in Figura 56, dove è tracciato l'andamento della deformazione trasversale lungo l'altezza per il campione ADN5.

Per gli internodi il comportamento è opposto, si nota l'effetto del confinamento generato dall'attrito alle basi (Figura 57).

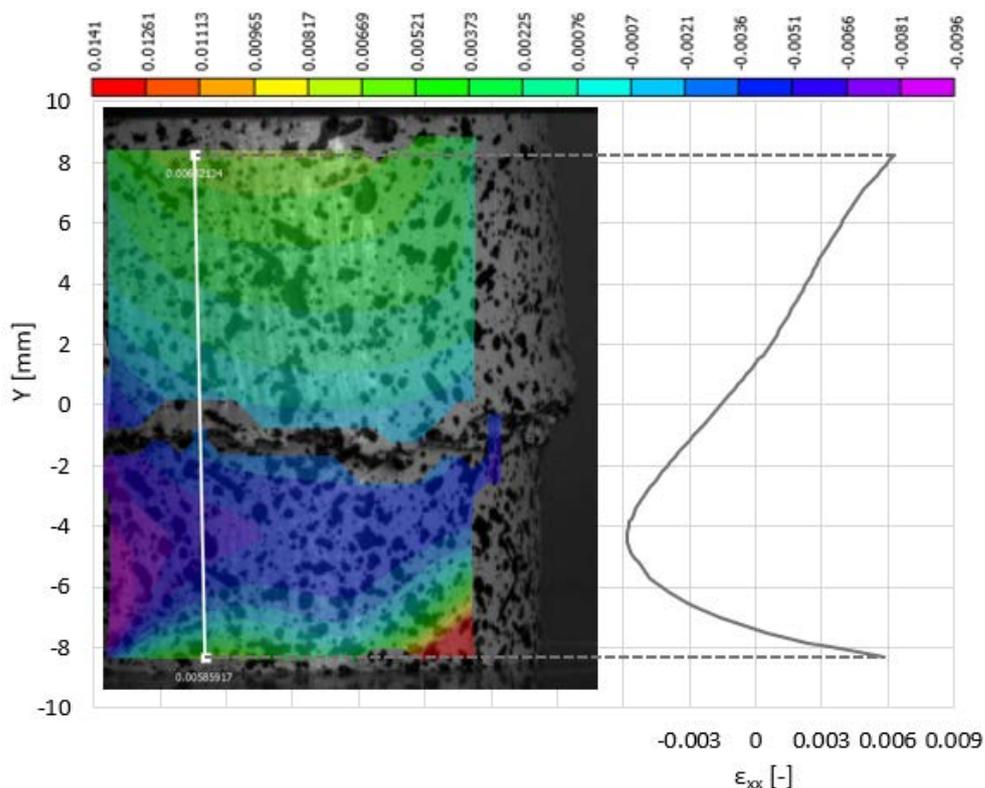


Figura 56: deformazione trasversale del nodo ADN5, per $\sigma_c = -54,54$ MPa

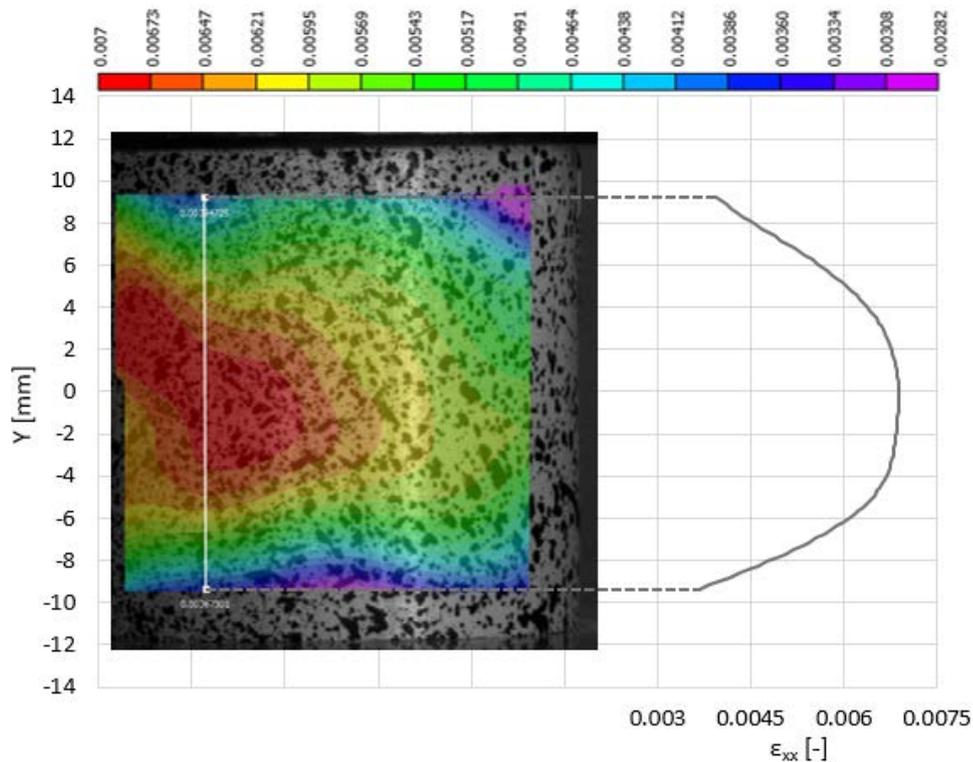
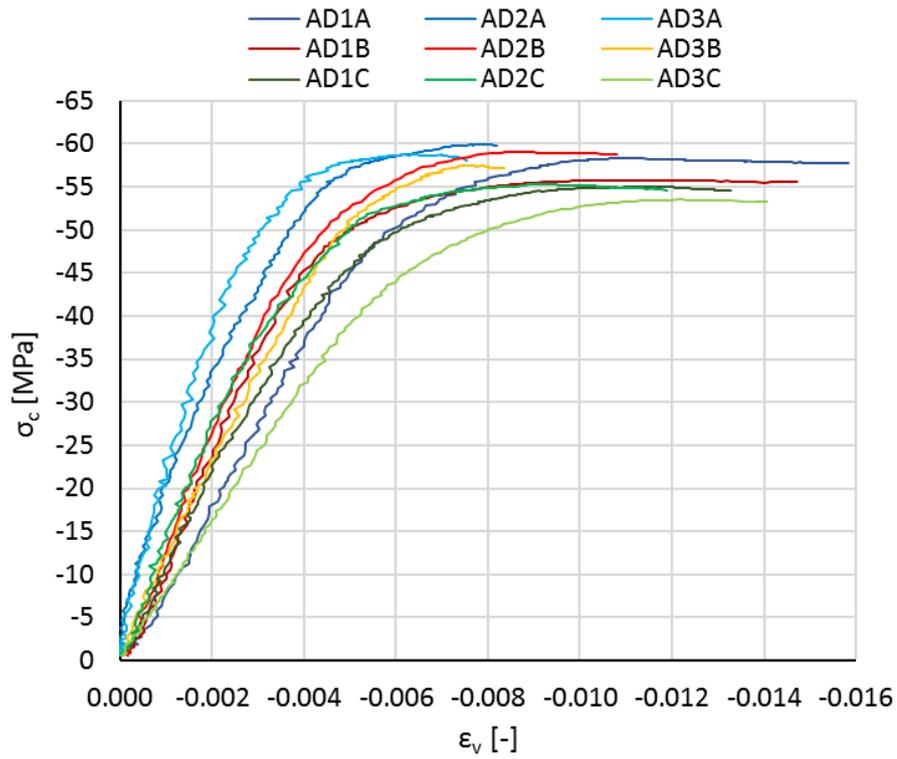
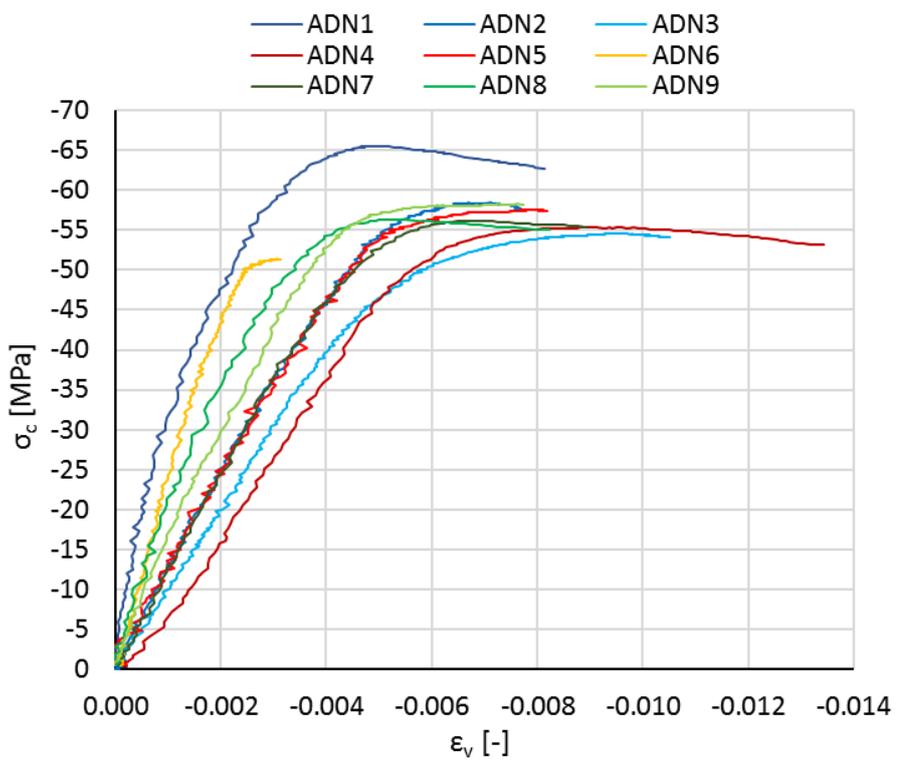


Figura 57: deformazione trasversale dell'internodo AD3C, per $\sigma_c = -53,52$ MPa

I grafici σ_c - ε_v per i campioni di internodo e per nodi sono rappresentati rispettivamente in Figura 58 e Figura 59. Analogamente a quanto riportato da (Gauss_C._et_al., 2019) per una varietà di bambù brasiliano (*Edulis*), in Figura 60 è mostrato il grafico σ_c - ε_v per il campione AD3C. Si nota che per il ramo elastico la deformazione è pressoché costante lungo il campione, mentre in fase plastica le deformazioni si localizzano nella parte centrale.

In Figura 61 è mostrato in dettaglio l'andamento della deformazione verticale al raggiungimento del carico massimo, il range di riferimento è relativo al singolo fotogramma e scalato rispetto allo spettro di deformazione rilevata.

In Figura 62, per un campione con nodo, si nota l'effetto irrigidente del diaframma, che rimane pressoché indeformato fino a rottura. In Figura 63 è mostrato il dettaglio delle deformazioni in condizioni di massima sollecitazione.

Figura 58: grafici σ - ϵ , internodiFigura 59: grafici σ - ϵ , nodi

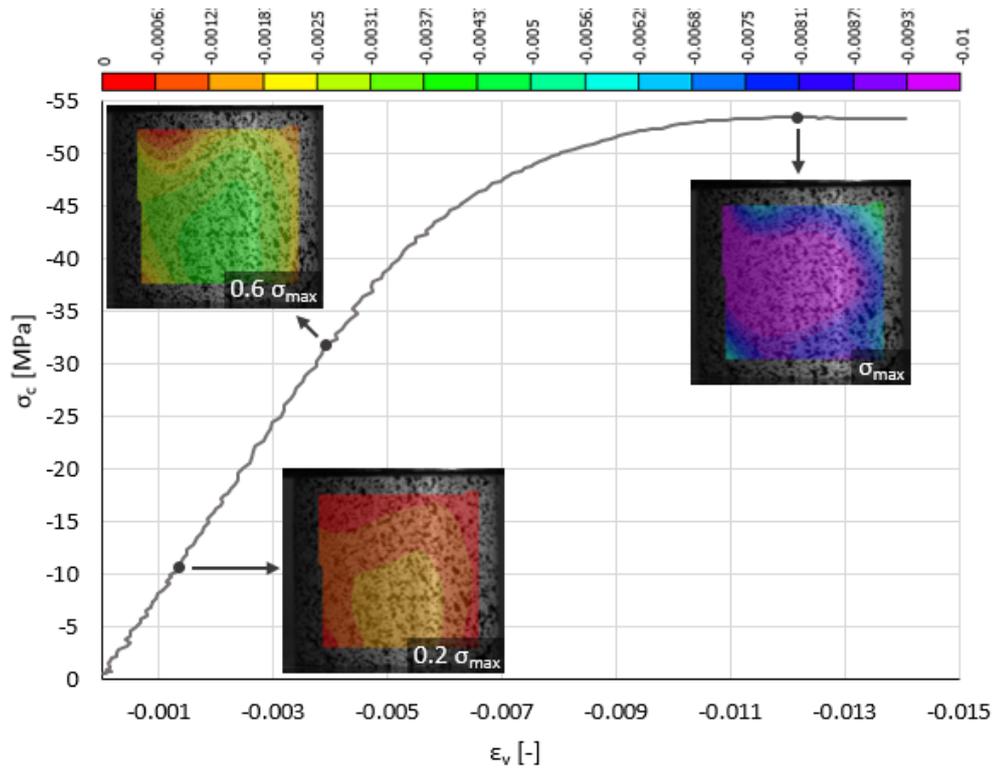


Figura 60: grafico σ - ϵ per l'internodo AD3C, compressione assiale

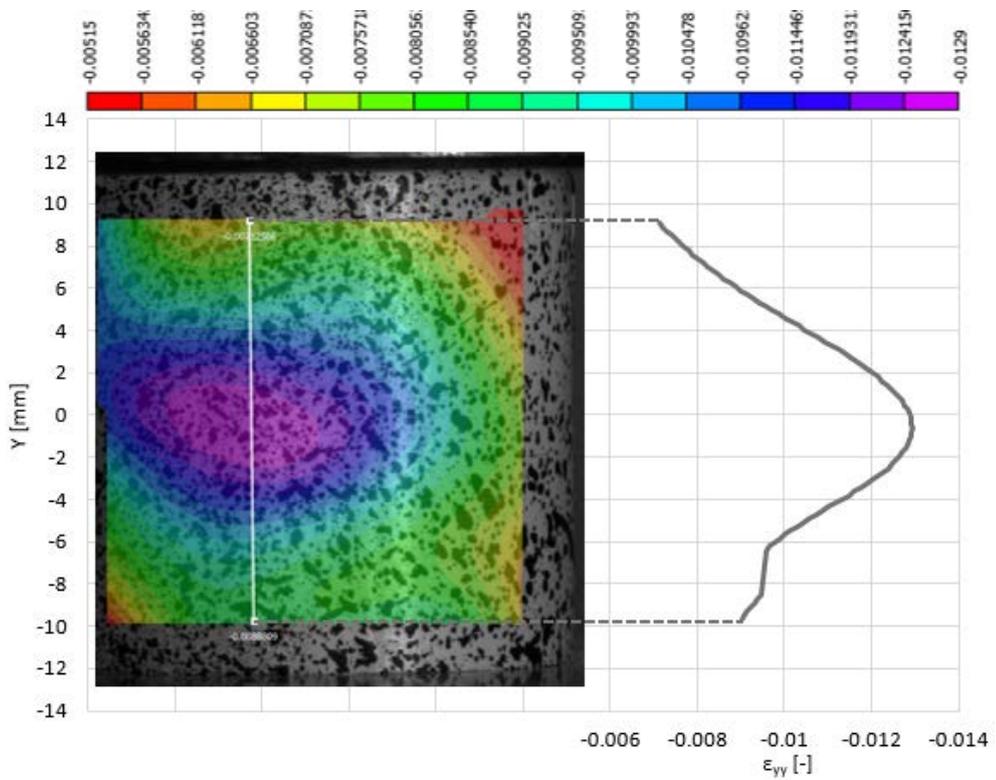


Figura 61: deformazione assiale dell'internodo AD3C, per $\sigma_c = -53,52$ MPa

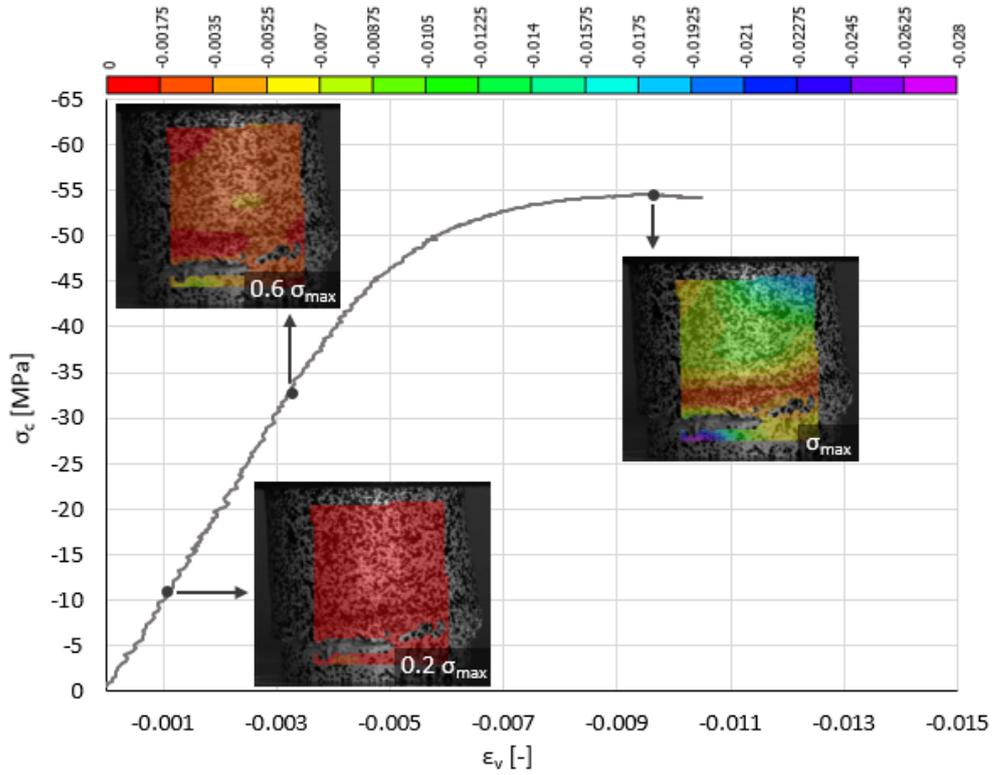


Figura 62: grafico σ - ϵ per il nodo ADN3, compressione assiale

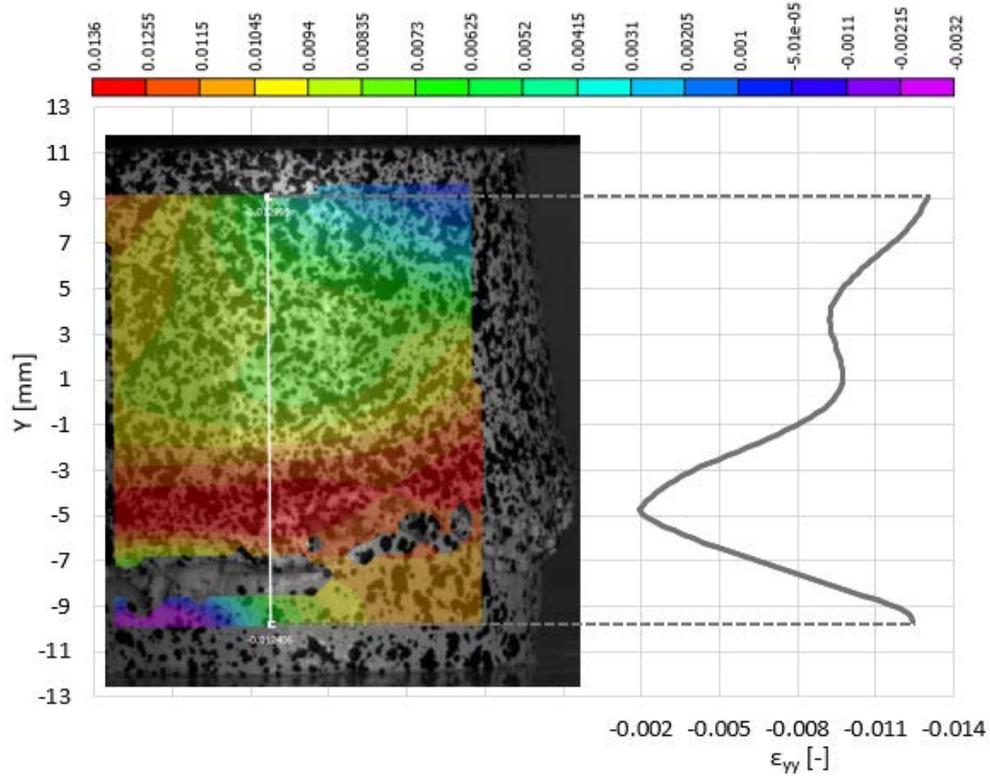


Figura 63: deformazione assiale del nodo ADN5, per $\sigma_c = -54,54$ MPa

Data l'elevata duttilità dei campioni, se soggetti ad un carico assiale di compressione, il raggiungimento del carico massimo avviene in campo plastico. Una volta rimosso il carico, i provini presentano una deformazione residua impercettibile ad occhio nudo. Per questioni di tempistiche di laboratorio, una volta raggiunto il carico massimo, per un paio di campioni, si decide di aumentare la velocità di carico al fine di mettere in luce il comportamento per grandi deformazioni. A titolo di esempio, in Figura 64 è mostrata la rottura del nodo ADN4. Si nota la formazione di fessure verticali lungo la superficie esterna dell'anello superiore al nodo, dovute alle trazioni che si generano in direzione radiale; il diaframma interno risulta perfettamente integro. La modalità di rottura per grandi deformazioni dei campioni di internodo è simile a quanto illustrato per i nodi; anche in questo caso le fessure si localizzano nella parte superiore del campione.



Figura 64: rottura a compressione per grandi deformazioni del nodo ADN4

4.2 TRAZIONE

Se soggetta a trazione l'Arundo Donax rivela delle caratteristiche meccaniche molto diverse dal comportamento a compressione. La resistenza a trazione è fornita unicamente dalle fibre e il ramo di carico si sviluppa solo in campo elastico. La rottura del materiale è quindi di tipo fragile. Il comportamento perfettamente elastico è chiaramente visibile nei grafici carico-spostamento di Figura 65 e Figura 66 e non risulta particolarmente influenzato dalla presenza del nodo. I risultati delle prove sono riportati in Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21.

La variabilità dei moduli elastici è nettamente inferiore al caso di compressione assiale, soprattutto per i campioni con nodo. La deviazione standard dei campioni è molto ridotta, indice dell'ottima omogeneità dei risultati (Figura 67). Un valore di riferimento per il modulo di Young a trazione è fornito da (Spatz_H._et_al., 1997), che effettua delle prove a trazione su strisce di internodo

prive del parenchima, la resistenza a trazione è infatti fornita soprattutto dall'epidermide, dove la densità di fibre è massima. Il modulo elastico medio dell'epidermide per internodi estratti nella parte centrale e alla base del culmo secondo (Spatz_H._et_al., 1997) è di circa 10 GPa, mentre nel caso in esame risulta pari a 14,83 MPa per gli internodi e 15,68 MPa per i nodi. Le porzioni intere di culmo risultano quindi in media più rigide a trazione rispetto a campioni costituiti dalla sola epidermide.

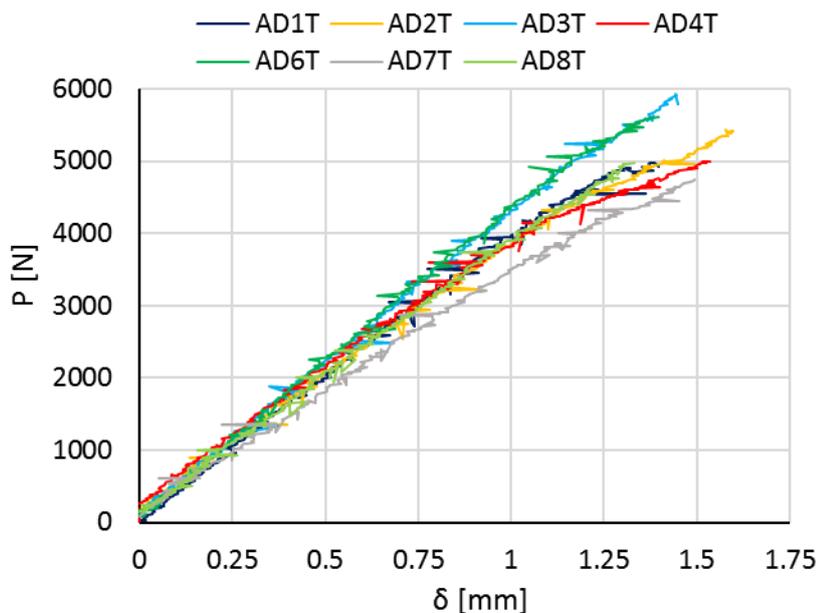


Figura 65: grafici carico-spostamento internodi, trazione

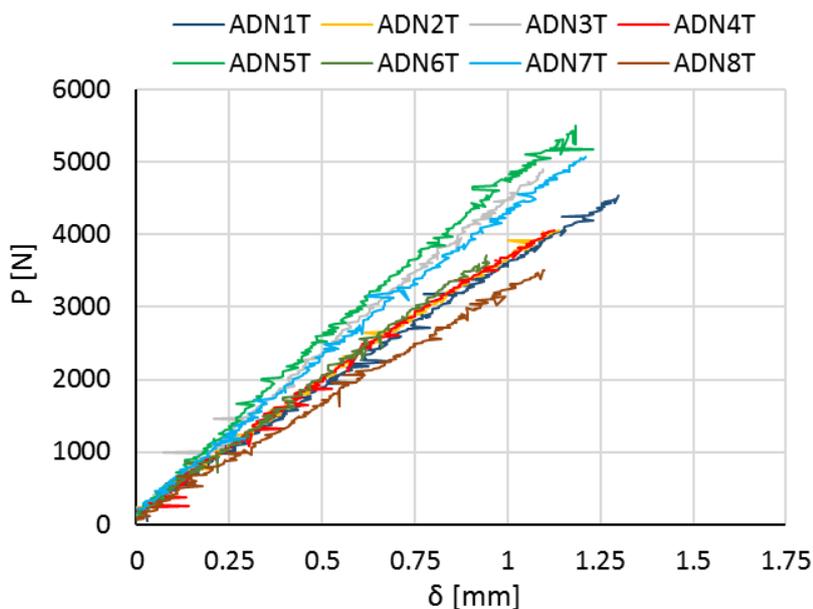


Figura 66: grafici carico-spostamento nodi, trazione

internodi trazione	$t_{sez\ 2}$ [mm]	$D_{sez\ 2}$ [mm]	$A_{sez\ 2}$ [mm ²]	P_{max} [N]	δ [mm]	ϵ_h [-]	ϵ_v [-]
AD1T	1.68	10.65	47.37	4977.36	1.39	-0.00388	0.00783
AD2T	1.40	10.91	41.87	5435.73	1.58	-0.00397	0.00920
AD3T	1.55	11.00	45.89	5931.66	1.44	-0.00414	0.00859
AD4T	1.67	10.34	45.46	5000.67	1.53	-0.00421	0.00837
AD6T	1.65	11.01	48.52	5609.24	1.40	-0.00385	0.00844
AD7T	1.38	9.44	34.82	4741.70	1.49	-0.00387	0.00876
AD8T	1.49	10.32	41.31	4968.29	1.33	-0.00264	0.00566
media	1.55	10.52	43.61	5237.81	1.45	-0.00380	0.00812
dev. st.	0.13	0.56	4.70	428.45	0.09	0.00053	0.00116

Tabella 19: carico, spostamento e deformazione ultimi, campioni internodo

internodi trazione	$\sigma_{sez\ 2}$ [MPa]	E_t [GPa]	ν [-]	t_R [mm]	D_R [mm]	A_R [mm ²]	ϵ_{vR} [-]	σ_R [MPa]
AD1T	105.07	14.093	0.50	1.61	10.39	44.47	0.02691	111.94
AD2T	129.83	14.505	0.43	1.39	10.65	40.50	0.02604	134.22
AD3T	129.25	15.221	0.48	1.56	10.72	44.75	0.02278	132.56
AD4T	110.00	13.363	0.50	1.57	10.05	41.88	0.00913	119.40
AD6T	115.61	14.587	0.46	1.58	10.71	45.32	0.02343	123.77
AD7T	136.19	16.376	0.44	1.32	9.22	32.79	0.01048	144.60
AD8T	120.27	15.659	0.47	1.46	10.15	39.74	0.03203	125.00
media	120.89	14.83	0.47	1.50	10.27	41.35	0.02154	127.36
dev. st.	11.41	1.007	0.03	0.11	0.54	4.36	0.00857	10.73

Tabella 20: risultati delle prove a trazione, campioni internodo

nodii trazione	P_{max} [daN]	δ_{press} [mm]	$\epsilon_{v\ 2\ inf}$ [μm/m]	$\epsilon_{v\ 2\ sup}$ [μm/m]	$\sigma_2\ media$ [MPa]	$E_t\ media$ [GPa]	σ_f [MPa]
ADN1T	454.49	1.30	0.00809	0.00744	120.04	16.17	122.51
ADN2T	404.77	1.14	0.00772	0.00681	108.87	15.75	124.76
ADN3T	490.10	1.10	0.00669	0.00657	99.09	15.21	130.40
ADN4T	404.90	1.12	0.00664	0.00653	96.48	15.50	97.33
ADN5T	549.27	1.18	0.00608	0.00756	110.86	16.29	115.63
ADN6T	371.23	0.94	0.00492	0.00633	88.77	14.08	81.89
ADN7T	506.15	1.21	0.00901	0.00463	99.55	17.93	102.55
ADN8T	350.90	1.10	0.00897	0.00712	105.56	14.53	103.40
media	441.47	1.14	0.00726	0.00662	103.65	15.68	109.81

Tabella 21: risultati delle prove a trazione, nodi

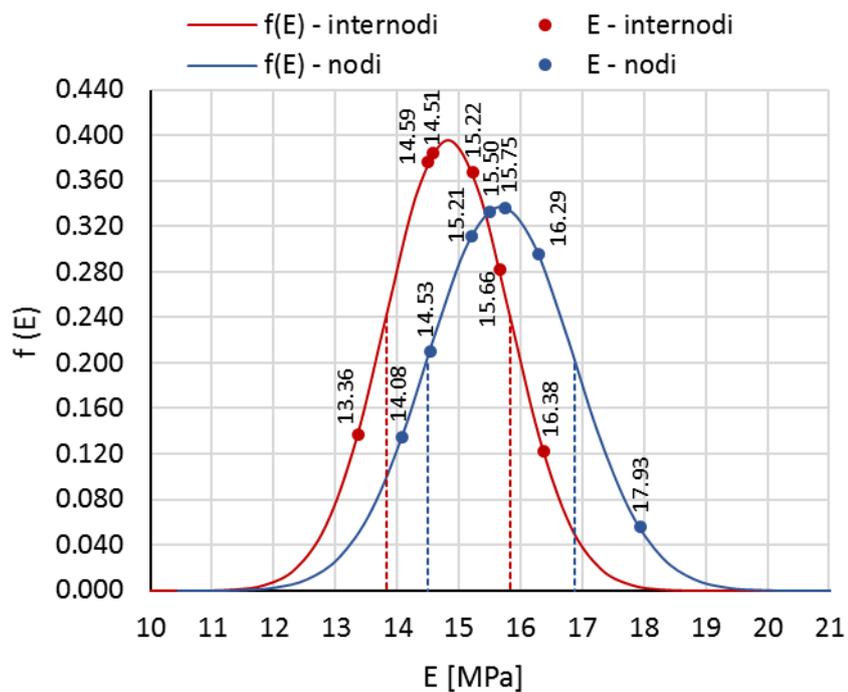


Figura 67: distribuzione normale del modulo elastico a trazione

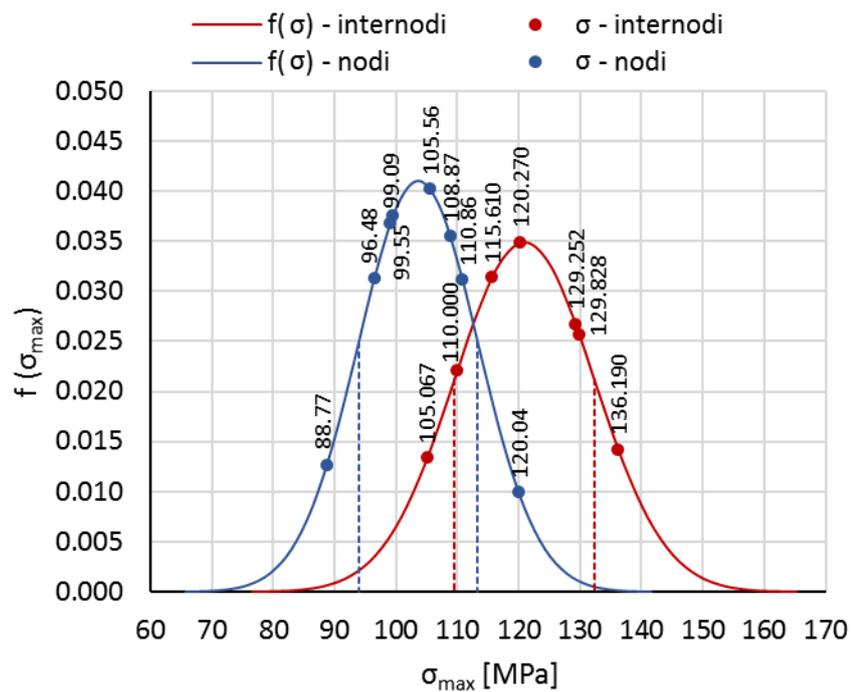


Figura 68: distribuzione normale della tensione massima a trazione

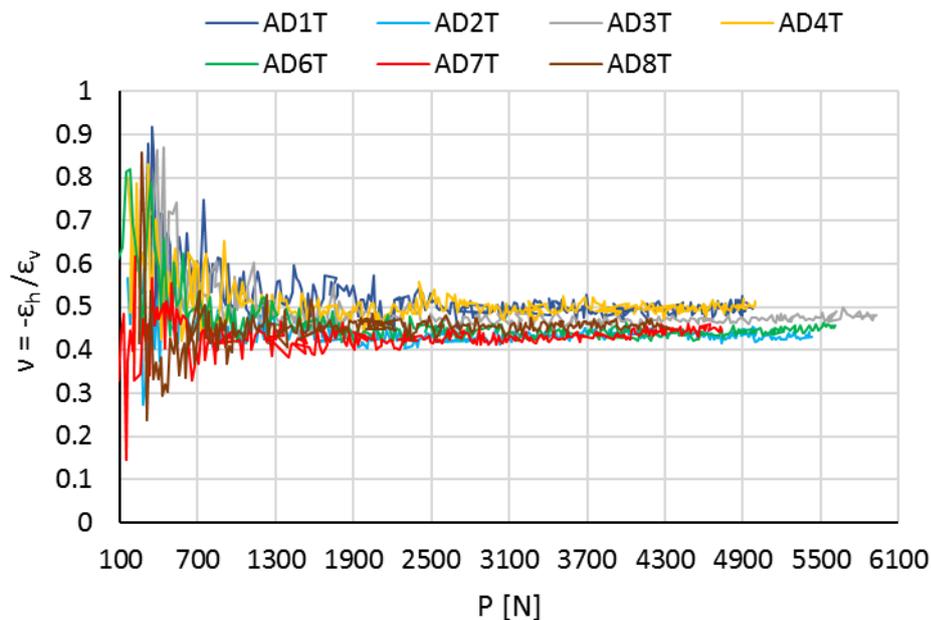


Figura 69: variabilità del coefficiente di Poisson, trazione assiale

Nel caso della trazione, la variazione del coefficiente di dilatazione trasversale durante la prova di carico è molto più contenuta, la maggioranza delle oscillazioni sono registrate nei primi step di carico, dalla seconda metà del ramo di carico il rapporto tra deformazione trasversale e assiale si mantiene pressoché costante fino a rottura. I valori di ν per i diversi campioni variano tra 0,4 e 0,5, con una media di 0,47 (Figura 69).

I grafici $\sigma_t - \epsilon_v$ per i campioni di internodo e per nodi sono rappresentati rispettivamente in Figura 70 e Figura 71.

La Figura 72 riporta il diagramma $\sigma - \epsilon$ per un internodo soggetto a trazione. Processando i dati acquisiti con la DIC, si nota che per ogni step di carico la deformazione ha un gradiente nullo lungo l'altezza del campione, tranne che nelle vicinanze di uno dei due ancoraggi, dove l'area della sezione trasversale è minima (Figura 73). Nei campioni con nodo, le deformazioni si localizzano in corrispondenza del nodo stesso, dove non tutte le fibre sono passanti e la sezione ha una leggera strizione. In Figura 74 si riportano gli andamenti della deformazione assiale lungo l'altezza per un internodo e per un nodo, il picco di deformazione nel nodo è più di due volte superiore alla ϵ_v media del campione internodo.

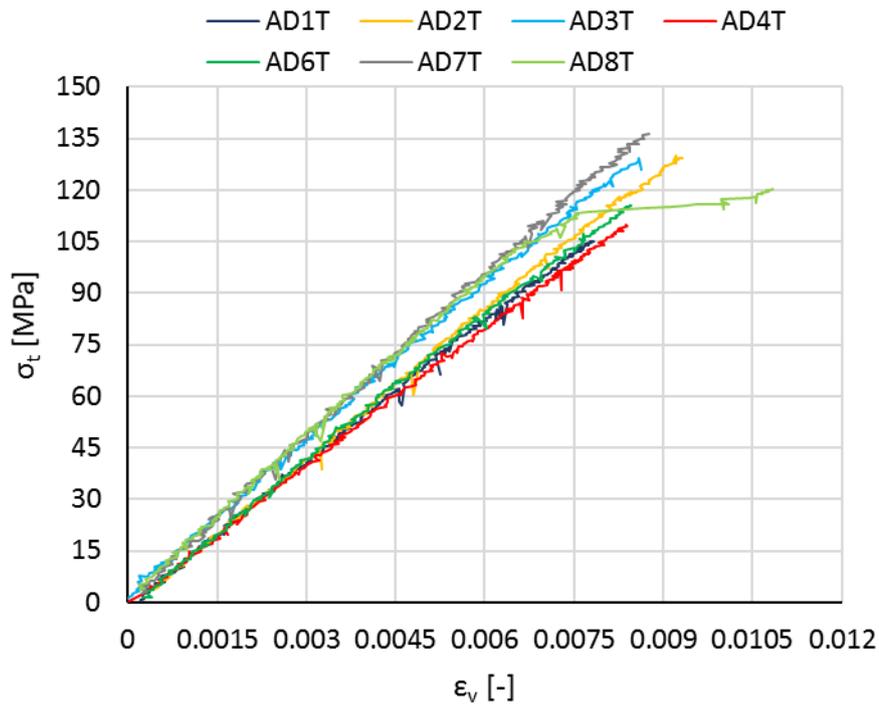


Figura 70: grafici σ - ϵ per gli internodi, prove a trazione

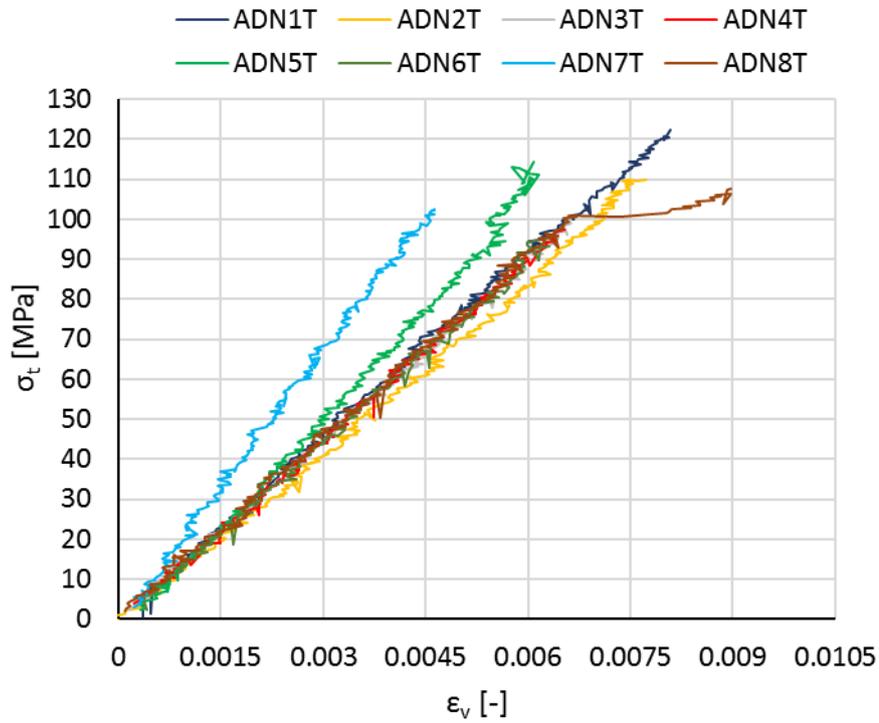


Figura 71: grafici σ - ϵ per i nodi, prove a trazione

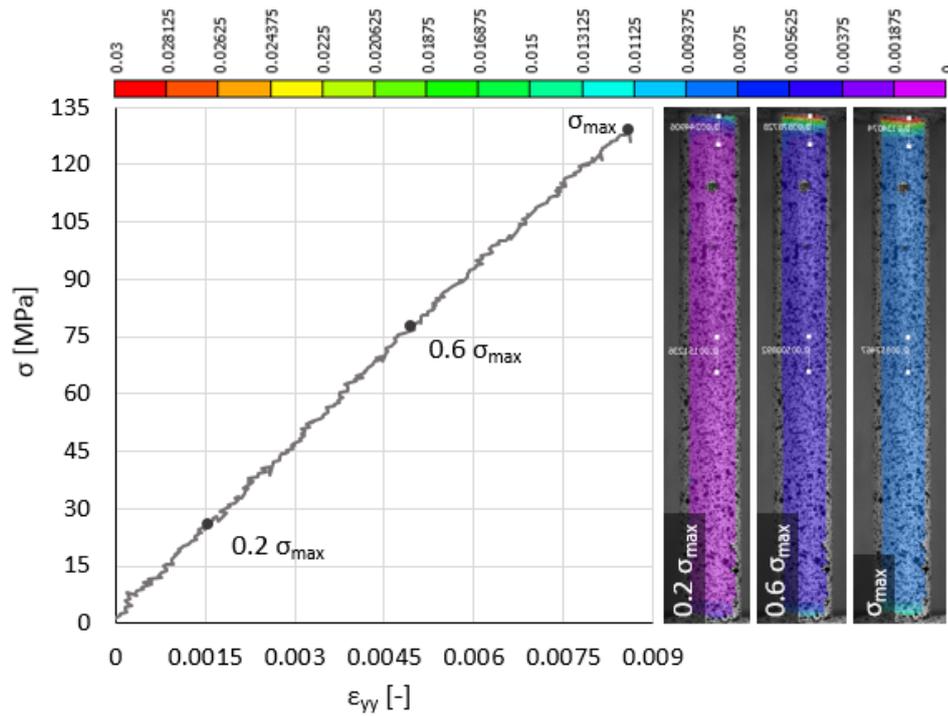


Figura 72: grafico σ - ϵ per l'internodo AD3T, trazione

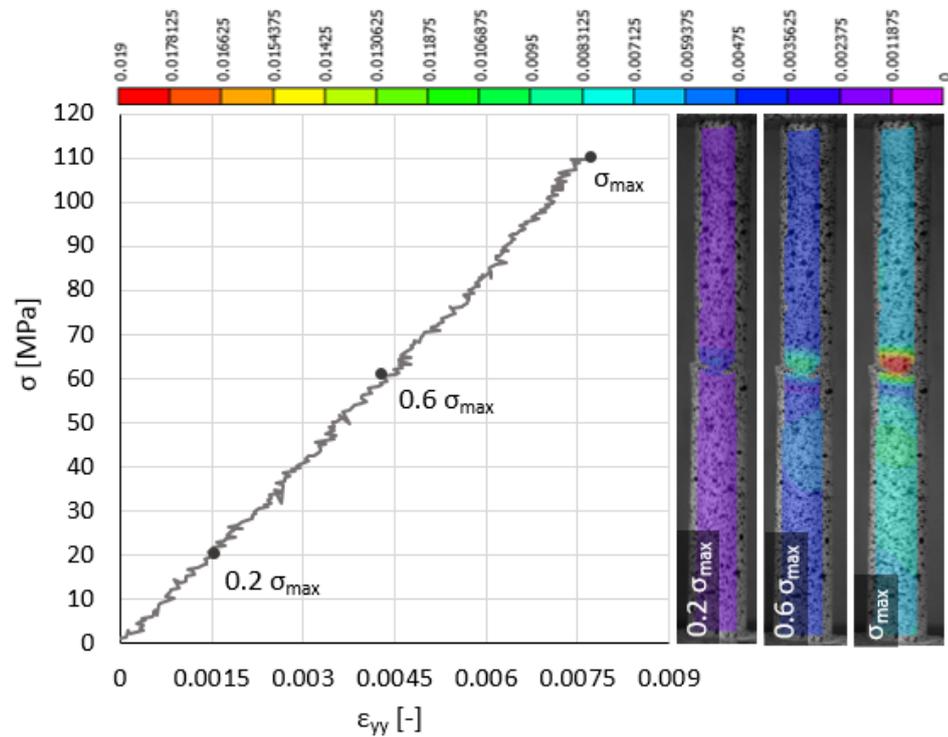


Figura 73: grafico σ - ϵ per il nodo ADN2T, trazione

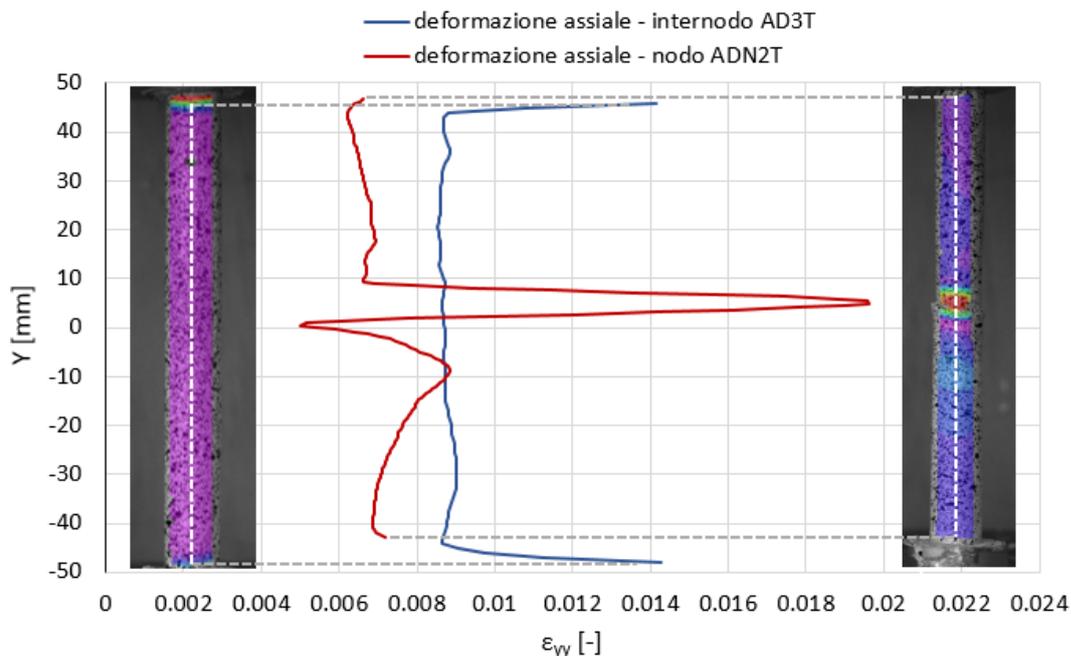


Figura 74: confronto delle deformazioni assiali, campioni AD3T ($\sigma_t = 129,25$ MPa) e ADN2T ($\sigma_t = 108,87$ MPa)

Le modalità di rottura osservate per i campioni di internodo sono le seguenti.

A) *Rottura nelle vicinanze di uno dei due ancoraggi.*

La rottura è localizzata dove l'area della sezione trasversale risulta minima, si osserva la rottura netta delle fibre del parenchima e la delaminazione localizzata delle fibre esterne (Figura 75).



Figura 75: delaminazione nelle vicinanze di uno dei due ancoraggi

B) *Sfilamento del campione.*

Degli otto internodi testati, solo per il provino AD5T si è verificato lo sfilamento da una delle zanche di ancoraggio, favorito dalle caratteristiche geometriche del provino, il quale presentava una strizione nelle vicinanze del nodo (Figura 76).



Figura 76: sfilamento del campione dall'ancoraggio

In Tabella 22 sono riportate le modalità di rottura per ogni campione internodo.

internodo	AD1T	AD2T	AD3T	AD4T	AD5T	AD6T	AD7T	AD8T
rottura	A	A	A	A	B	A	A	A

Tabella 22: modalità di rottura, internodi

Le modalità di rottura che si manifestano dei campioni con nodo sono le seguenti.

C) Rottura localizzata nelle immediate vicinanze del nodo.

In quattro campioni su otto la rottura avviene in corrispondenza della sezione immediatamente superiore o inferiore al diaframma interno (Figura 77).



Figura 77: rottura localizzata nelle immediate vicinanze del nodo

D) Rottura all'internodo.

In due provini su otto la rottura è avvenuta per delaminazione delle fibre in corrispondenza dell'internodo; si ipotizza che le prime fessurazioni siano nate in corrispondenza del nodo per poi propagarsi lungo l'internodo, portandolo a rottura (Figura 78).



Figura 78: rottura all'internodo

E) Rottura a cavallo del nodo

In un provino su otto la rottura si è localizzata a cavallo del nodo, con la conseguente rottura del diaframma interno (Figura 79).



Figura 79: rottura a cavallo del nodo

F) Rottura diffusa

Per il campione ADN3T la rottura nasce nel nodo e si propaga portando alla delaminazione dell'intero provino (Figura 80).



Figura 80: rottura diffusa, nodo ADN3T

In Tabella 23 sono riportate le modalità di rottura per ogni campione internodo.

nodo	ADN1T	ADN2T	ADN3T	ADN4T	ADN5T	ADN6T	ADN7T	ADN8T
rottura	B	B	F	D	B	B	E	D

Tabella 23: modalità di rottura, nodi

4.3 COMPRESSIONE TRASVERSALE (C-TYPE)

I diagrammi carico-spostamento dei provini C-type (Figura 81) presentano un andamento pressoché lineare nel tratto centrale, seguito da un breve tratto curvo in cui il materiale inizia a perdere rigidità, la rottura è di tipo fragile, in analogia a quanto studiato per diverse specie di bambù italiano e colombiano da (Molari_L._Garcia_J., 2020). Il tratto iniziale presenta una leggera concavità verso l'alto (la rigidità cresce all'aumentare del carico), ciò è da attribuire alla deformazione dello strato in gomma; tale andamento è quindi assente nei diagrammi carico-deformazione in quando lo spostamento relativo è misurato direttamente sul campione (si veda Figura 88, per il campione AD2LC).

Il software di processing della DIC fornisce una mappa della deformazione della superficie del campione, sulla quale è possibile inserire degli estensimetri virtuali (Figura 82). Al fine di determinare l'andamento tensionale nella sezione in cui avverrà la rottura, si posizionano gli estensimetri verticali a cavallo della sezione di mezzeria, uno sul lembo interno, l'altro sul lembo esterno. Se durante il post processing non risulta possibile posizionare l'estensimetro in corrispondenza dei bordi, è necessario scalare i valori della deformazione rispetto allo spessore.

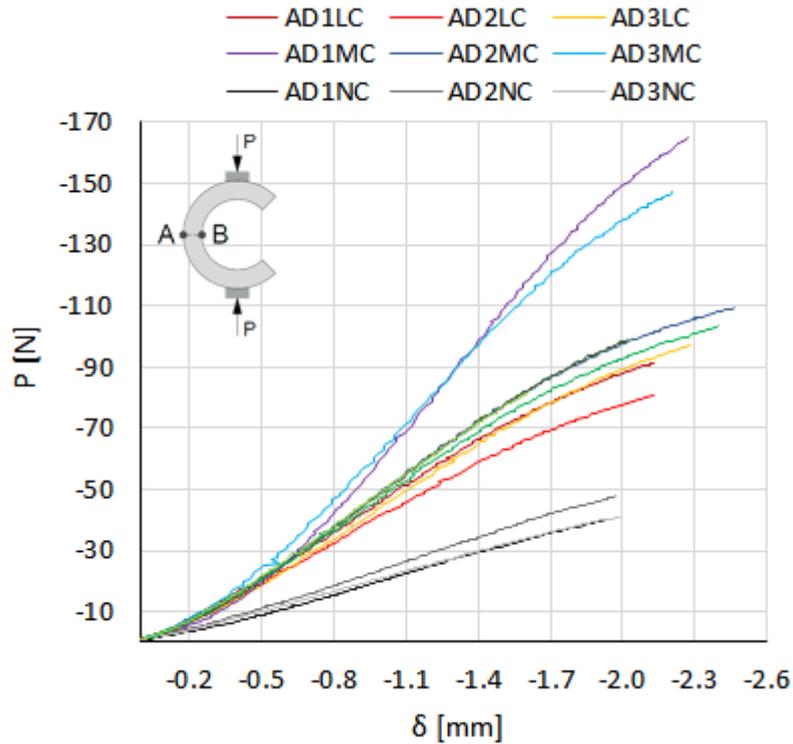


Figura 81: grafici carico-spostamento, C-type

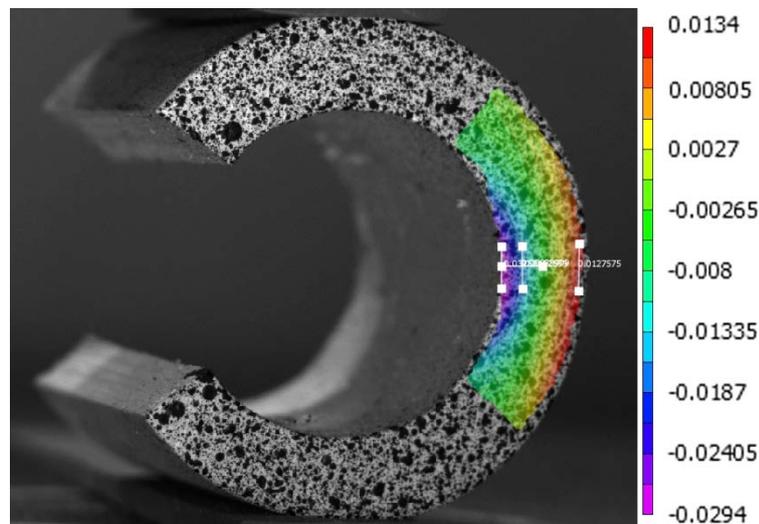


Figura 82: mappa della deformazione assiale ottenuta tramite la DIC, campione AD2LC

Volendo determinare anche il coefficiente di dilatazione trasversale del parenchima, si posizionano in zona compressa due estensimetri sovrapposti in direzione x, y (Figura 82). L'andamento del coefficiente di Poisson per i campioni

analizzati è riportato in Figura 83. In Tabella 24 e Tabella 25 e sono elencati i risultati delle prove a compressione trasversale.

Dai risultati delle prove è evidente come il valore di E calcolato con il modello omogeneo sia sempre compreso tra i valori dei moduli elastici calcolati sui bordi con il modello eterogeneo. In particolare con il modello ad E costante si ottiene un valore medio di 1046,40 MPa, mentre per il caso ad E variabile si ha un modulo interno medio di 515,79MPa ed un modulo esterno di 1557,26 MPa. I risultati in termini di E_0 hanno una varianza più alta rispetto agli altri moduli (Figura 84). In termini tensionali, la σ calcolata sul bordo esterno della sezione risulta sempre più bassa nel caso omogeneo rispetto a quello eterogeneo, viceversa la tensione interna col modello omogeneo risulta, in valore assoluto, più elevata. Tale comportamento è illustrato in Figura 87 per il campione AD2LC ma, come ben visibile delle distribuzioni di probabilità di

Figura 85 e dai grafici σ - ϵ di Figura 86, è comune ad ogni campione.

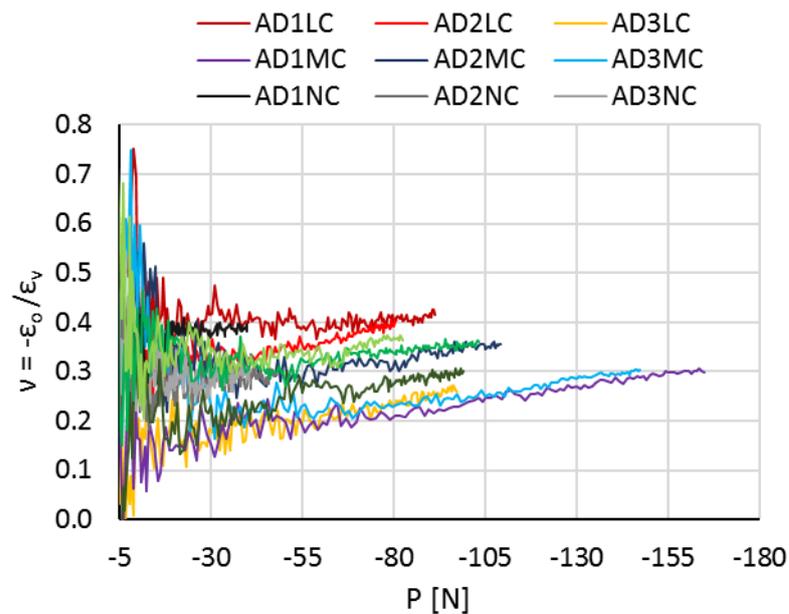


Figura 83: variabilità del coefficiente di Poisson per i campioni C-type

C-type	t [mm]	b [mm]	D _{medio} [mm]	P _{max} [N]	δ _{press} [mm]	ε _i [-]	ε _o [-]
AD1LC	4.08	21.61	22.40	91.40	2.13	-0.02857	0.01266
AD2LC	4.05	20.16	22.68	80.69	2.13	-0.03018	0.01622
AD3LC	4.02	21.85	22.74	97.14	2.28	-0.02774	0.01478
AD1MC	4.51	21.49	20.76	164.81	2.27	-0.04244	0.01446
AD2MC	4.22	19.62	21.14	109.19	2.46	-0.05303	0.02207
AD3MC	4.92	20.95	21.25	147.32	2.21	-0.04900	0.02108
AD1NC	3.34	22.10	22.65	39.91	1.93	-0.02129	0.00935
AD2NC	3.14	21.92	23.44	47.85	1.97	-0.02226	0.00997
AD3NC	3.09	20.64	23.55	40.86	1.99	-0.02054	0.01044
AD1OC	3.81	21.61	20.12	98.84	2.02	-0.03393	0.01571
AD2OC	3.86	21.60	20.21	103.34	2.40	-0.04511	0.02143
AD3OC	3.97	21.34	20.34	82.30	1.61	-0.02567	0.01307
media	3.92	21.24	21.77	91.97	2.12	-0.03331	0.01510

Tabella 24: dimensioni dei campioni, carico applicato, spostamento e deformazioni ultime per le prove di compressione trasversale

C-type	σ _{o, hom} [MPa]	σ _{i, hom} [MPa]	E _{hom} [MPa]	E _o [MPa]	E _i [MPa]	v [-]	v _{medio} [-]	σ _o [MPa]	σ _i [MPa]
AD1LC	11.08	-17.43	1070.60	1696.70	429.31	0.414	0.405	18.29	-8.76
AD2LC	10.88	-16.93	911.90	1085.70	698.38	0.404	0.352	14.28	-12.86
AD3LC	12.37	-19.13	1130.10	1413.40	790.32	0.259	0.211	16.54	-14.14
AD1MC	13.72	-24.26	1232.20	1883.90	576.01	0.302	0.231	27.32	-7.11
AD2MC	12.22	-20.34	910.17	1197.10	590.99	0.356	0.329	20.49	-10.16
AD3MC	10.33	-19.25	754.43	901.23	587.56	0.303	0.268	14.62	-13.73
AD1NC	7.85	-11.14	1117.50	2109.30	187.61	0.383	0.364	14.32	-3.68
AD2NC	11.51	-15.72	1324.70	2424.60	254.26	0.293	0.283	21.23	-4.70
AD3NC	10.90	-14.78	1215.80	1922.80	440.70	0.303	0.293	17.74	-7.05
AD1OC	12.09	-19.45	972.71	1273.40	622.93	0.300	0.257	18.55	-11.61
AD2OC	12.31	-19.92	877.23	1128.50	588.04	0.360	0.334	18.12	-12.86
AD3OC	9.33	-15.30	1039.40	1650.50	423.41	0.364	0.339	12.32	-11.65
media	11.22	-17.80	1046.40	1557.26	515.79	0.337	0.306	17.82	-9.86

Tabella 25: tensioni interne/esterne massime e moduli di resistenza per le prove di compressione trasversale, assumendo un modello omogeneo o eterogeneo

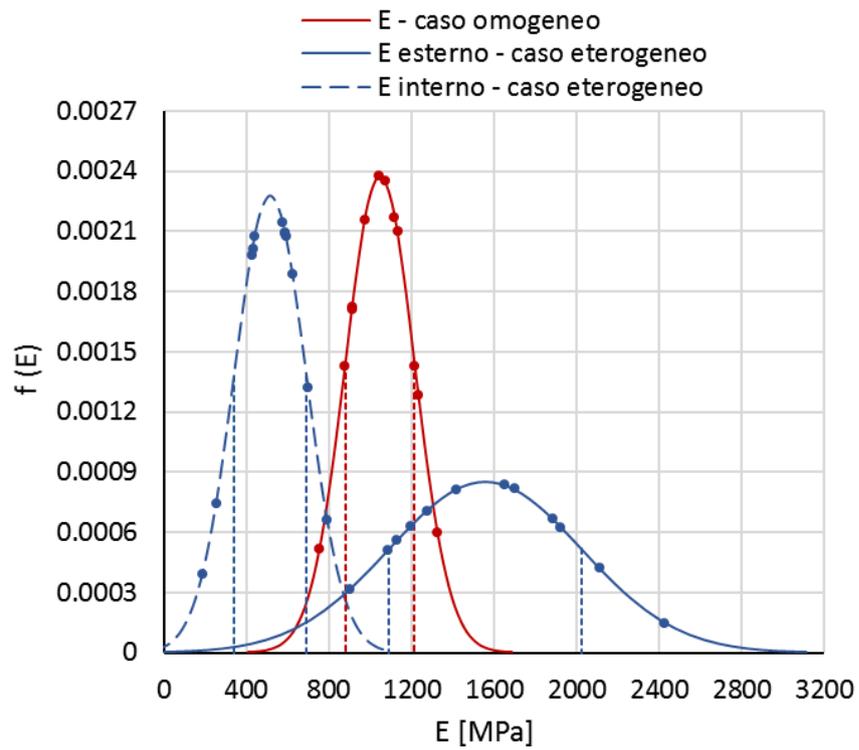


Figura 84: distribuzione normale di probabilità per il modulo elastico, C-type

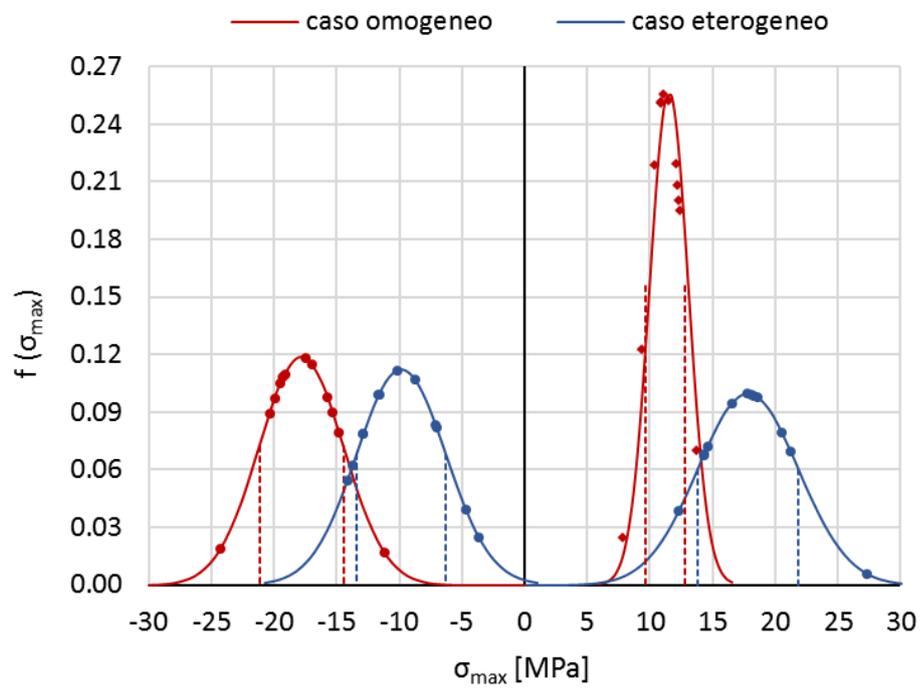


Figura 85: distribuzione di probabilità delle tensioni normali massime e minime, C-type

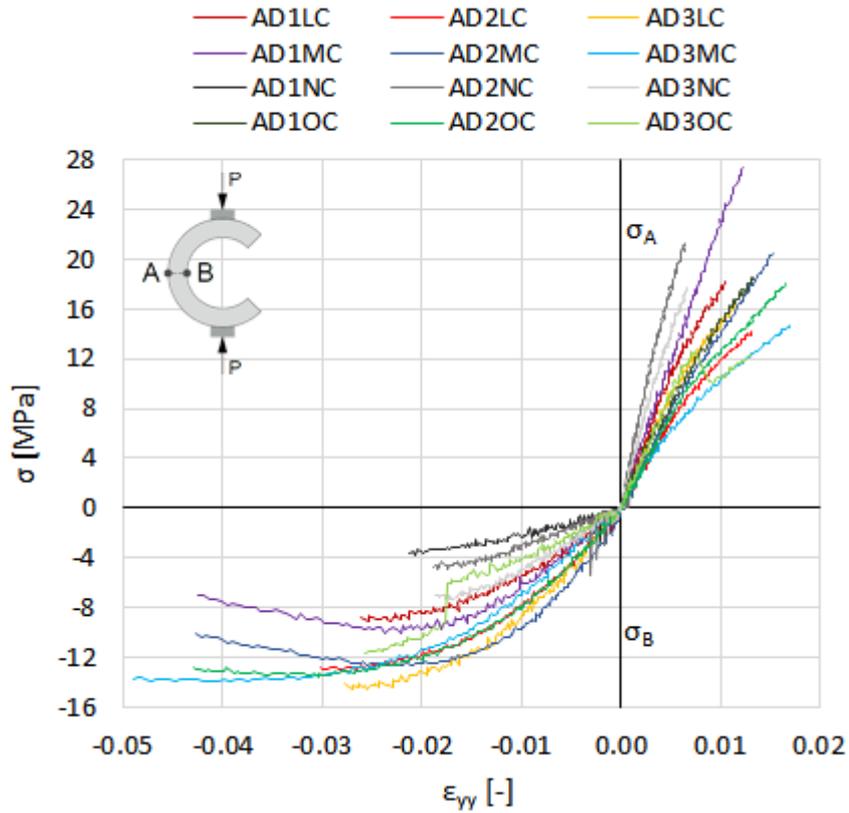


Figura 86: grafici σ - ϵ per il caso eterogeneo, campioni C-type

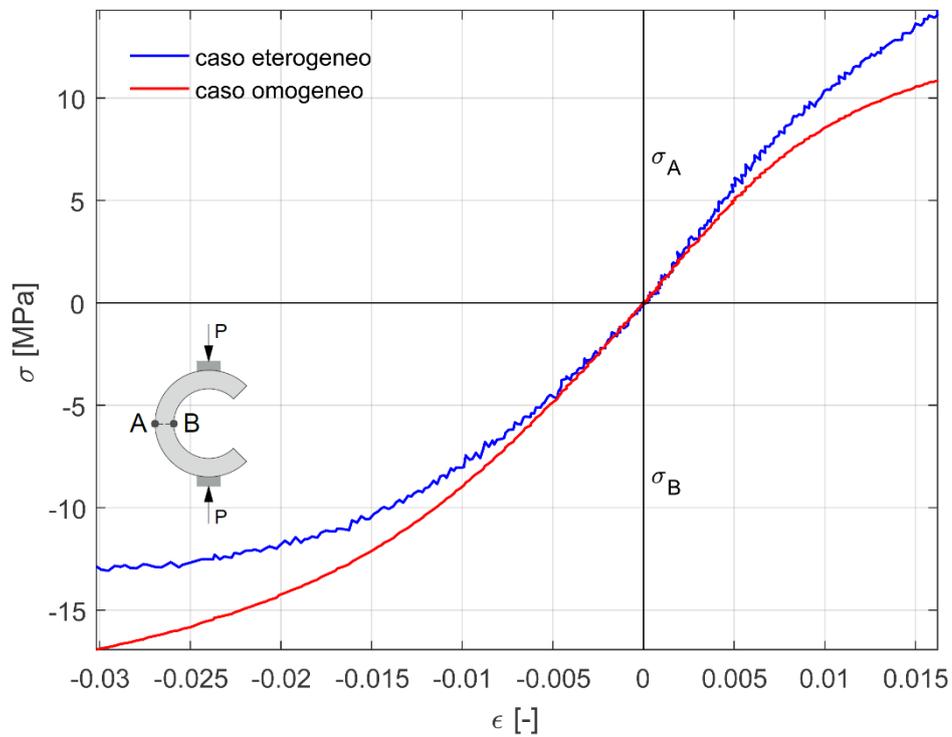


Figura 87: grafici σ - ϵ per il caso omogeneo e eterogeneo, campione AD2LC

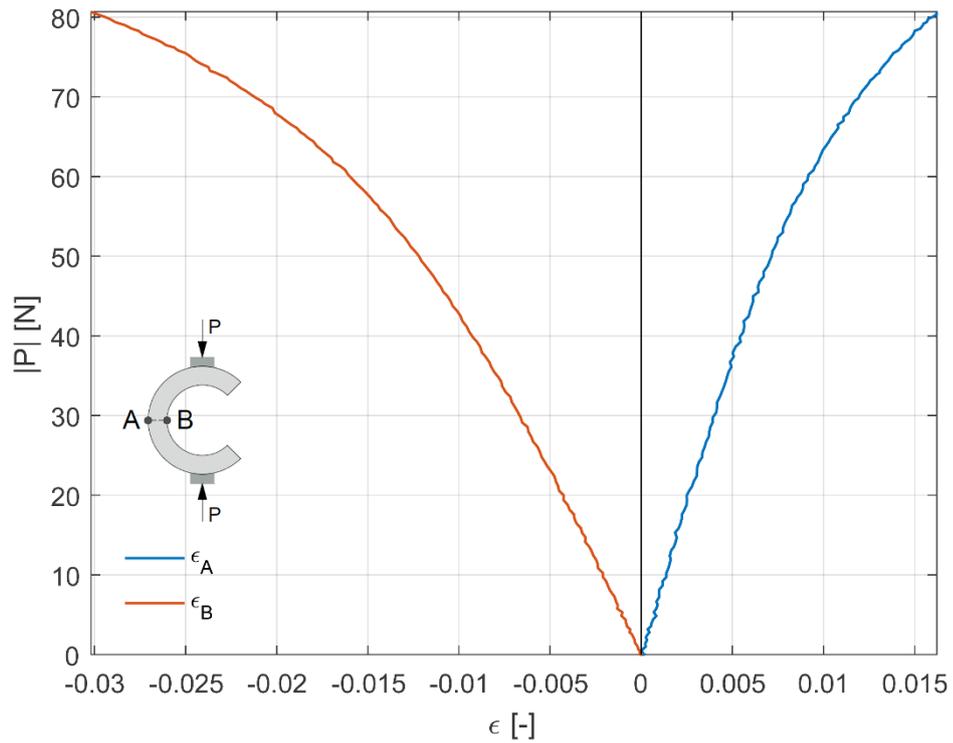


Figura 88: diagrammi carico-deformazioni assiali, misurate al lembo interno ed esterno della sezione di mezzeria (sezione di rottura), per il campione AD2LC

Nelle prove di compressione trasversale per i campioni C-type, la rottura avviene nella sezione di mezzeria, in cui si generano le tensioni massime dovute allo sforzo normale eccentrico applicato in sommità (Figura 89).

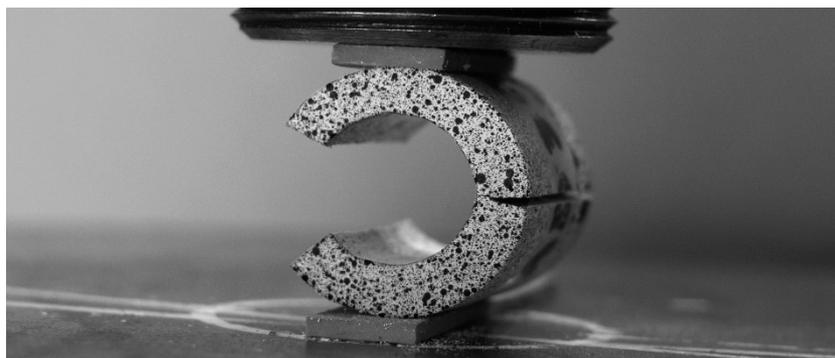


Figura 89: rottura tipica dei campioni C-type, provino AD3OC

4.4 TAGLIO

Non esiste in letteratura alcun risultato riguardante le caratteristiche di resistenza a taglio in direzione assiale dell'Arundo Donax. Nello studio condotto da (Spatz_H._et_al., 1997), ad esempio, viene determinato solo il modulo di taglio del parenchima in direzione radiale.

Analizzando i diagrammi carico spostamento, all'aumentare del carico si nota che nel tratto centrale i campioni hanno un'inclinazione del ramo elastico pressoché omogenea, mentre nell'ultima fase entrano gradualmente in campo plastico. Il comportamento è quindi di tipo elasto-plastico incrudente (

Figura 90 e Figura 91). È interessante notare che alcuni diagrammi T- δ dei campioni con nodo presentano dei piccoli "salti" in prossimità del raggiungimento del carico ultimo (si vedano i campioni ADN17S e ADN21S di Figura 91); l'improvvisa perdita di carico corrisponde alla rottura del diaframma interno.

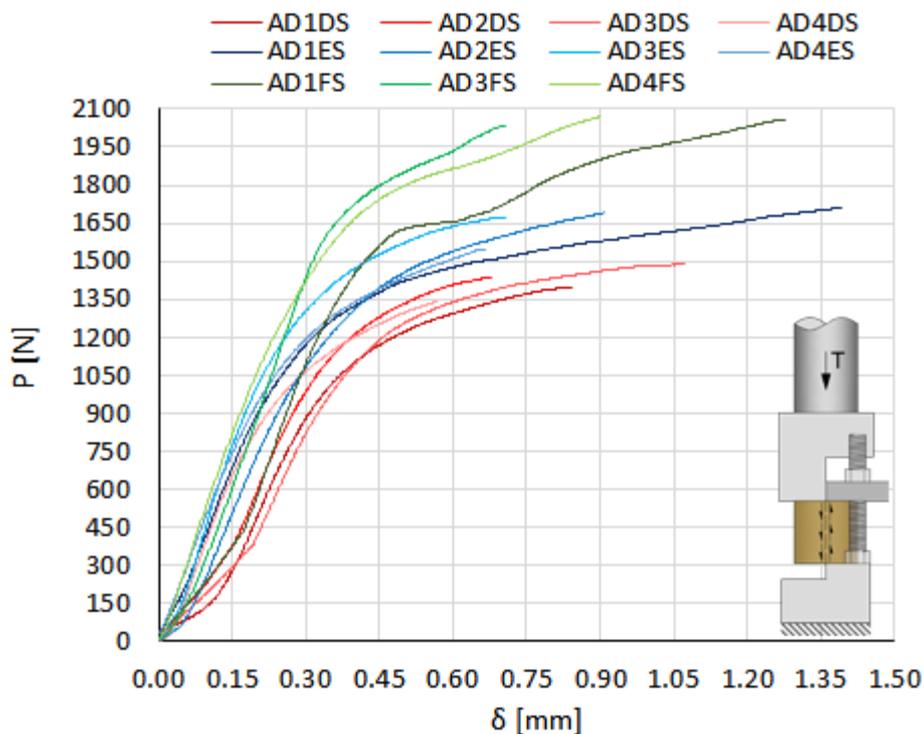


Figura 90: grafici carico-spostamento per la prova a taglio, internodi

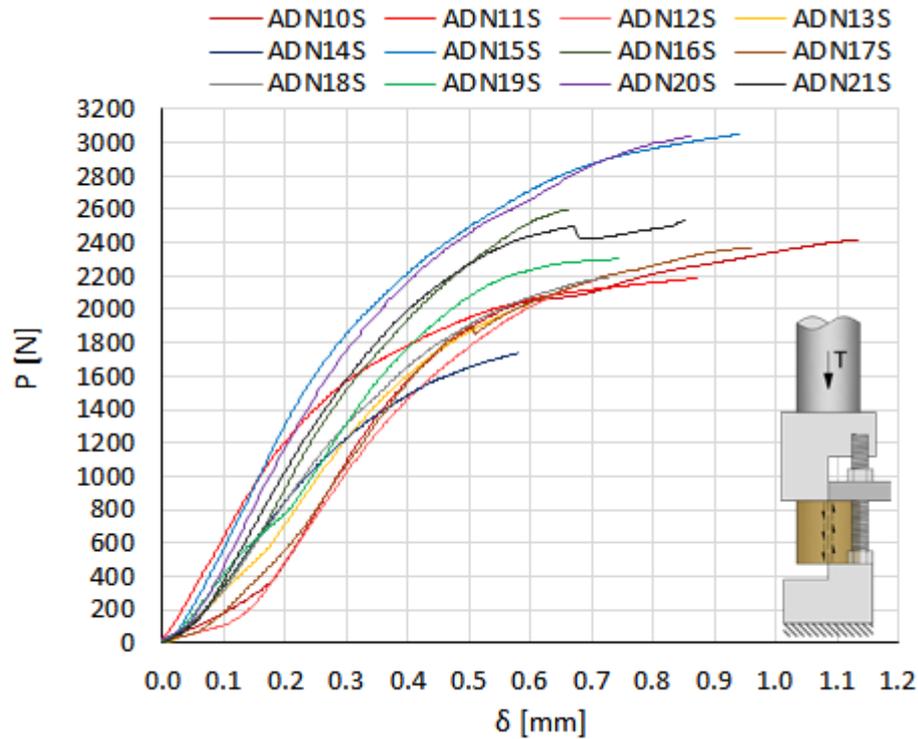


Figura 91: grafici carico-spostamento per la prova a taglio, nodi

Per l'Arundo Donax, la tensione tangenziale media ricavata è di circa 20 MPa per gli internodi e di 24 MPa per i nodi; il valore medio del modulo di taglio è pari 3,13 GPa per gli internodi e 3,94 GPa per i nodi. I valori ottenuti da (Gauss_C._et_al., 2019) per l'*Edulis* sono, una resistenza a taglio media di 18 MPa per gli internodi e di 18,1 Mpa per i nodi, mentre il modulo di elasticità tangenziale risulta 2,85GPa per gli internodi e 2,79 MPa per i nodi. I risultati delle prove sono riportati in Tabella 26 e Tabella 27.

internodi taglio	t_{medio} [mm]	L [mm]	A [mm ²]	A' [mm ²]	T_{max} [daN]	δ_{press} [mm]	τ [MPa]	γ [-]	G [GPa]
AD1DS	2.60	17.12	88.85	74.04	139.68	1.058	18.86	0.0128	3.30
AD2DS	2.50	17.39	86.95	72.46	144.08	0.851	19.89	0.0115	2.98
AD3DS	2.46	18.24	89.56	74.63	148.69	1.273	19.92	0.0145	2.04
AD4DS	2.45	17.26	84.40	70.33	134.00	1.039	19.05	0.0099	2.95
AD1ES	2.78	18.38	102.19	85.16	171.00	1.442	20.08	0.0129	2.81
AD2ES	2.69	19.41	104.23	86.86	169.13	1.149	19.47	0.0096	4.69
AD3ES	2.64	18.91	99.84	83.20	167.33	0.826	20.11	0.0114	3.53
AD4ES	2.66	17.28	91.76	76.46	154.51	0.749	20.21	0.0132	2.99
AD1FS	2.77	20.68	114.57	95.47	205.67	1.372	21.54	0.0128	2.97
AD3FS	2.79	20.69	115.24	96.04	203.20	0.819	21.16	0.0102	3.08

AD4FS	3.06	20.70	126.68	105.57	206.81	0.961	19.59	0.0097	3.13
media	2.67	18.73	100.39	83.66	167.65	1.049	19.99	0.0117	3.13

Tabella 26: risultati delle prove a taglio, internodi

nodi taglio	t_{medio} [mm]	L [mm]	A [mm ²]	A' [mm ²]	T_{max} [daN]	δ_{press} [mm]	τ [MPa]	γ [-]	G [GPa]
ADN10	3.07	19.62	120.47	100.39	241.81	1.322	24.09	0.0111	4.11
ADN11	3.00	19.28	115.68	96.40	218.77	1.218	22.69	0.0095	3.52
ADN12	2.94	19.14	112.35	93.63	218.16	1.071	23.30	0.0102	3.64
ADN13	3.39	17.47	118.45	98.71	201.73	0.850	20.44	0.0092	3.17
ADN14	2.71	17.25	93.32	77.77	173.94	0.766	22.37	0.0114	3.28
ADN15	3.47	20.11	139.56	116.30	306.21	1.055	26.33	0.0121	4.08
ADN16	3.31	19.51	128.96	107.47	259.71	0.942	24.17	0.0088	4.56
ADN17	3.01	18.99	114.32	95.27	237.07	1.493	24.88	0.0097	4.27
ADN18	2.67	18.99	101.22	84.35	219.37	1.160	26.01	0.0109	3.38
ADN19	3.15	19.41	122.28	101.90	229.99	1.318	22.57	0.0092	2.92
ADN20	2.92	22.13	129.02	107.51	303.40	0.935	28.22	0.0118	4.55
ADN21	3.34	19.89	132.67	110.56	253.30	1.407	22.91	0.0071	5.78
media	3.08	19.32	119.02	99.19	238.62	1.128	24.00	0.0101	3.94

Tabella 27: risultati delle prove a taglio, nodi

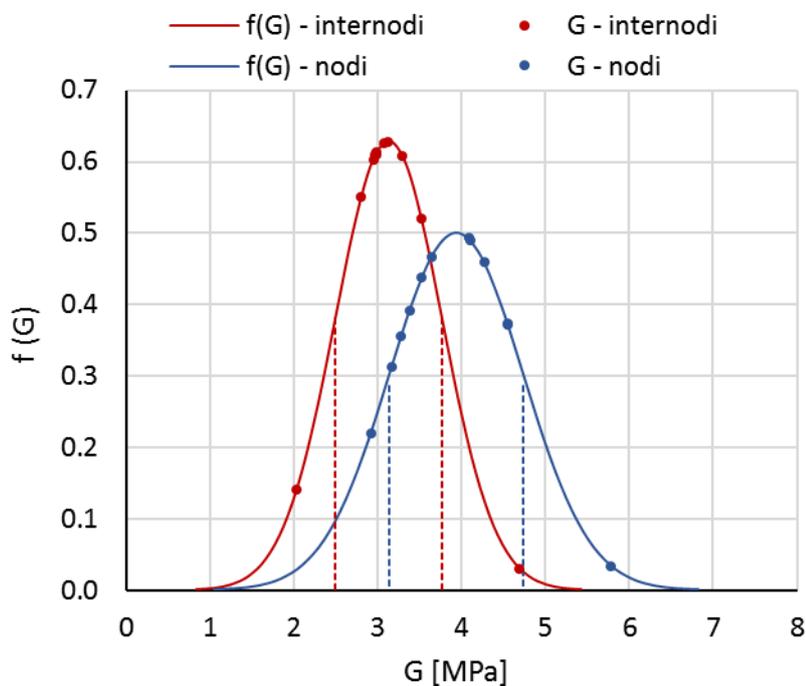


Figura 92: distribuzione normale di probabilità per il modulo di taglio

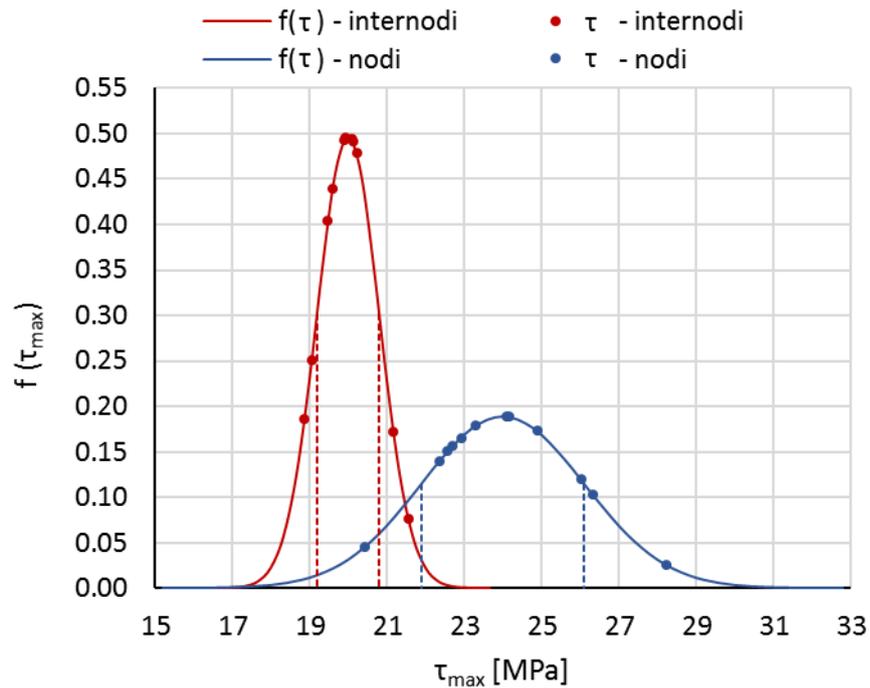


Figura 93: distribuzione normale di probabilità della tensione tangenziale massima

Le distribuzioni di probabilità per il modulo di elasticità tangenziale hanno una varianza molto bassa (Figura 92), indice della buona attendibilità e ripetibilità della prova. I valori tensionali sono molto omogenei per i campioni di internodo, mentre presentano una più ampia variabilità per i nodi (Figura 93). I grafici $\tau - \gamma$ per i campioni di internodo e per nodi sono rappresentati rispettivamente in Figura 94 e Figura 95.

Processando i dati acquisiti con la DIC, si ottiene la mappa dello scorrimento angolare γ per ogni step di carico. In Figura 96 è riportato il diagramma $\tau - \gamma$ per l'internodo AD4ES. All'incrementare della forza di taglio si rileva la concentrazione delle deformazioni angolari in corrispondenza della superficie di scorrimento.

La Figura 97 mostra l'andamento di γ lungo l'altezza del provino, le deformazioni si concentrano in corrispondenza degli spigoli delle piastre superiore ed inferiore, punti di innesco per formazione della superficie di rottura.

A differenza della prova di compressione assiale, nei test a taglio la presenza del nodo non influenza particolarmente il comportamento del campione, in quanto in queste condizioni di sollecitazione il nodo non fornisce alcun effetto di cerchiatura ma solo un incremento dell'area resistente a taglio (Figura 98 e Figura 99).

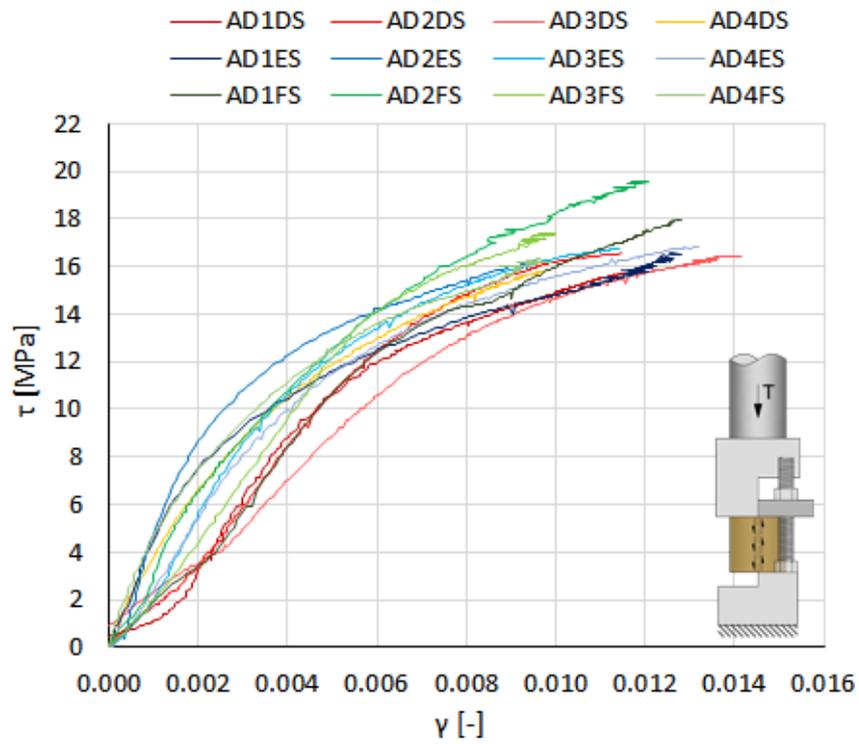


Figura 94: grafici τ - γ per gli internodi, prove a taglio

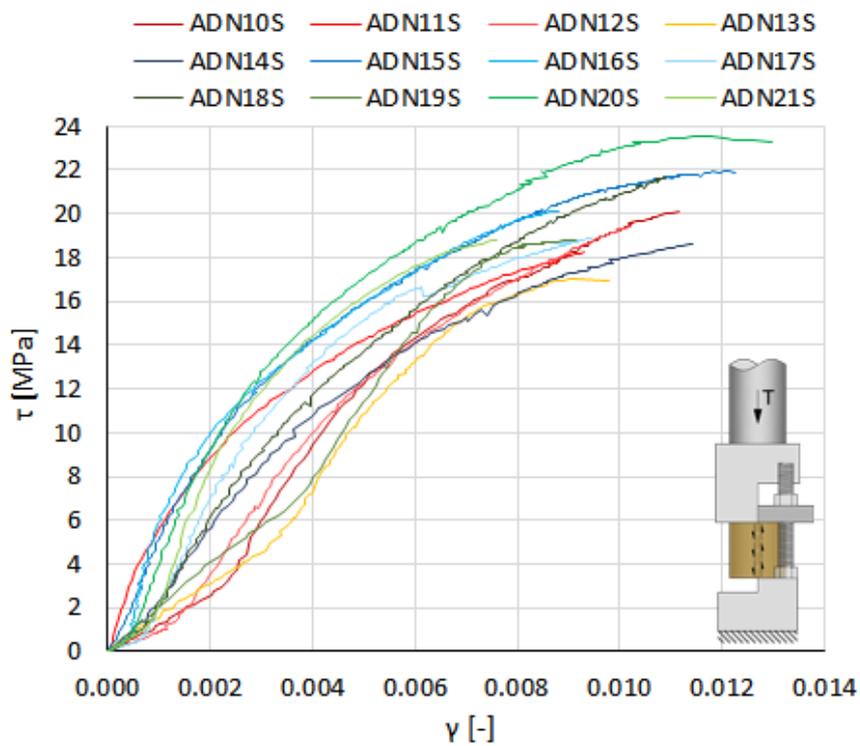


Figura 95: grafici τ - γ per i nodi, prove a taglio

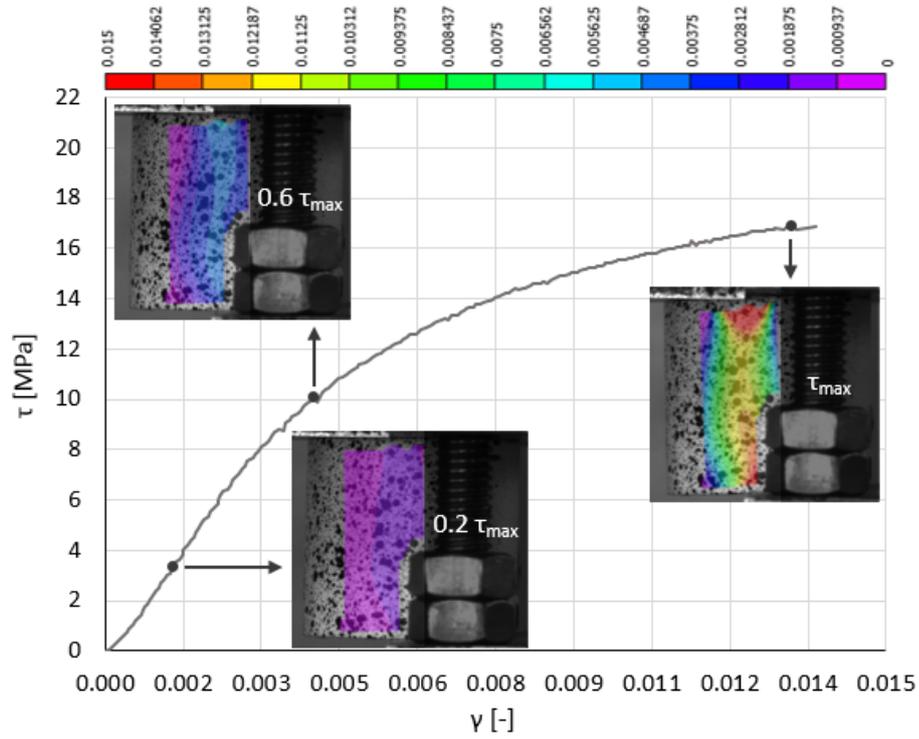


Figura 96: grafico τ - γ per l'internodo AD4ES, taglio

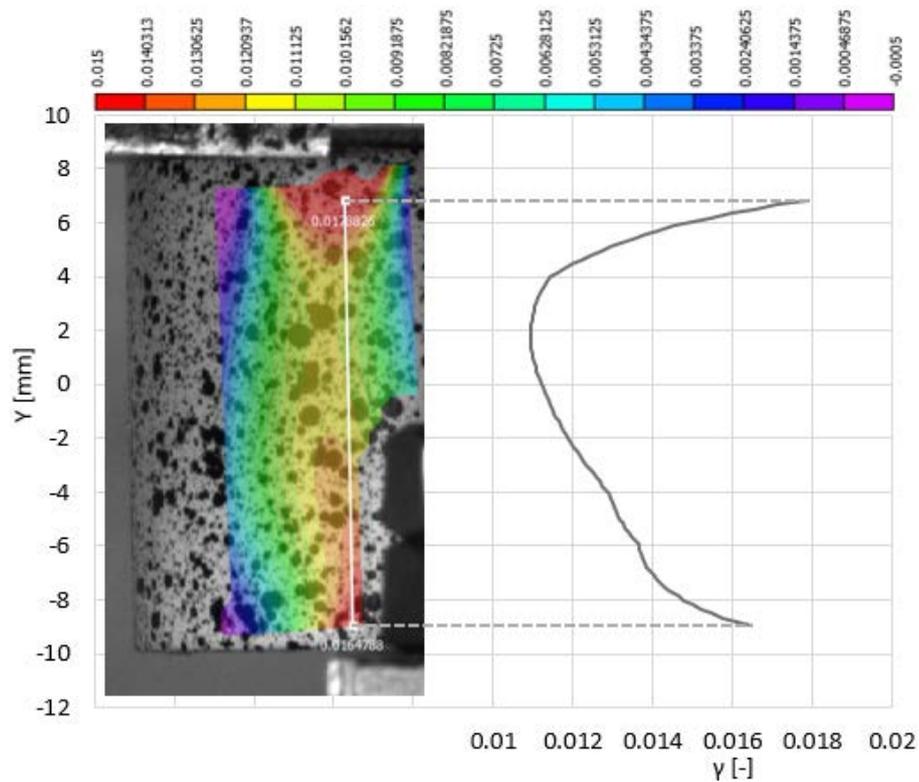


Figura 97: variazione dello scorrimento angolare, internodo AD4ES, $\tau = 20,21$ MPa

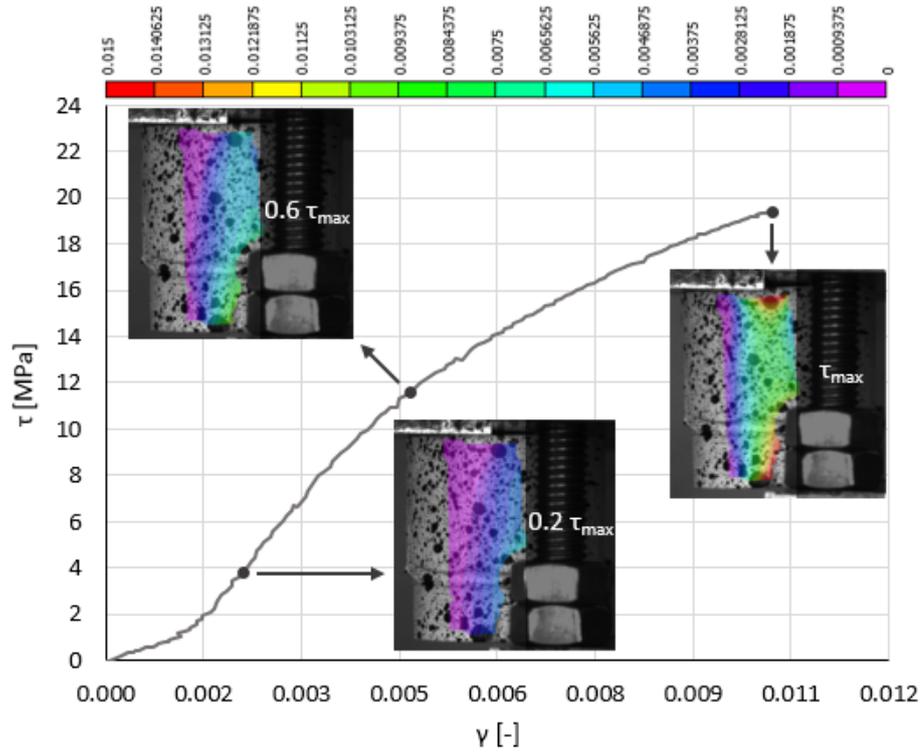


Figura 98: grafico τ - γ per il nodo ADN12S, taglio

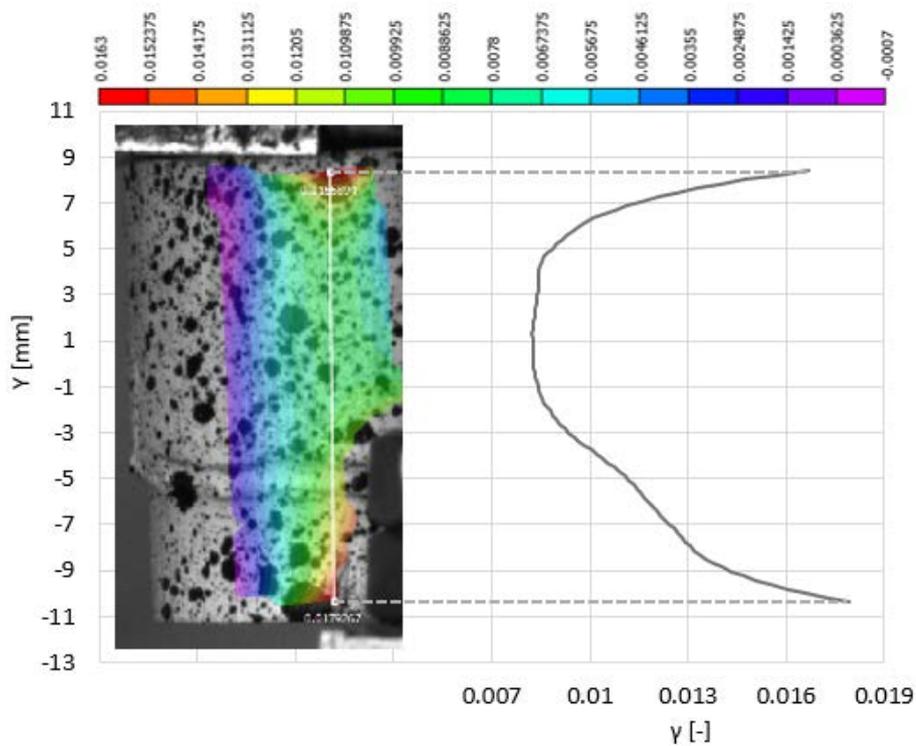


Figura 99: variazione dello scorrimento angolare, nodo ADN12S, $\tau = 23,30$ MPa

La rottura a taglio avviene in corrispondenza della superficie di scorrimento, dove le tensioni tangenziali risultano massime (Figura 100). Come già accennato, è poco probabile che il collasso si verifichi con la formazione contemporanea di entrambi i piani di scorrimento, nella maggior parte dei casi si forma solo una delle due superfici di taglio.

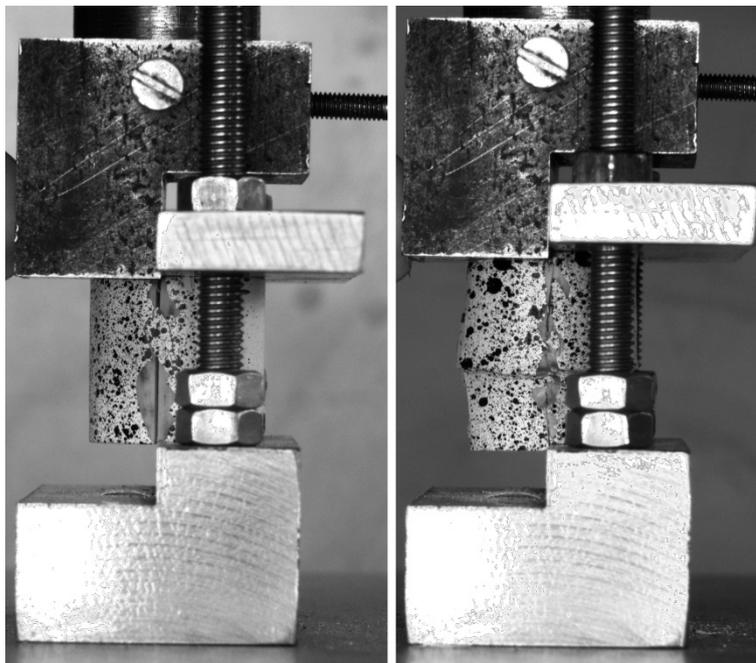


Figura 100: rotture a taglio; internodo (sinistra) e nodo (destra)

4.5 CONFRONTO STATISTICO DEI RISULTATI CON DIFFERENTI SPECIE DI BAMBÙ

In questo paragrafo si mettono a confronto i risultati ottenuti per l'Arundo Donax, in termini di resistenza e rigidezza, con le caratteristiche meccaniche di diverse specie di Bambù, con riferimento agli studi condotti da (Molari_L._Garcia_J., 2020) e da (Konrath_C., 2019). Si esegue un'analisi statistica con il metodo ANOVA (Analysis of Variance), al fine di verificare se esistono o meno delle correlazioni tra le distribuzioni campionarie delle differenti popolazioni.

Si ricerca una correlazione statistica tra i risultati delle prove di compressione assiale, trazione e compressione trasversale (C-type); non si esegue il confronto con

i risultati ottenute dalle prove a taglio in quanto non sono presenti sufficienti dati in letteratura relativi alle specie di bambù analizzate.

4.5.1 Compressione assiale

Confrontando le distribuzioni normali di probabilità per i test a compressione, si osserva che il campo di variabilità del modulo elastico dell'AD è molto simile a quello di EDU, VIV e VIO. Le specie IRI e BAM hanno un modulo di Young medio significativamente differente dalla distribuzione di AD (Figura 101 e Tabella 28). In termini di resistenza a compressione, AD risulta paragonabile a VIO ma staticamente indipendente dalle altre specie (Figura 102 e Tabella 29). La distribuzione del coefficiente di dilatazione trasversale (Figura 103 e Tabella 30) è simile nelle specie AD, VIO e VIV. Dalle analisi di varianza del modulo elastico, della tensione massima e del coefficiente di Poisson, si evince che l'Arundo ha un comportamento a compressione analogo alla *Violascens* e con delle caratteristiche comuni alle specie EDU e VIV.

	E _c [GPa]					
	BAM	EDU	IRI	VIV	VIO	AD
nodi	25.34	19.09	20.95	16.74	12.26	23.47
	13.27	11.84	32.36	21.94	8.77	11.89
	18.67	15.38	22.12	13.36	15.45	9.89
	30.28	12.26	23.93	16.67	12.97	9.88
	17.13	15.30	19.52	14.17	29.80	10.84
	21.44	13.88	23.50			23.62
						12.43
						17.71
internodi						13.13
	23.92	16.26	22.10	17.77	13.19	9.77
	21.86	13.32	22.45	15.02	22.07	13.09
	20.42	15.46	18.33	16.85	19.13	18.08
	20.89	14.60	19.58	19.68	14.31	13.59
	19.01	17.56	21.80	19.82	14.36	12.99
	11.84	13.53	16.05	19.06	16.62	11.02
						9.79
					11.71	
					8.29	
media	20.34	14.87	21.89	17.37	16.27	13.40
dev. st.	5.02	2.11	3.99	2.61	5.71	4.49

Tabella 28: moduli elastici a compressione; BAM, EDU, IRI, VIV, VIO, AD

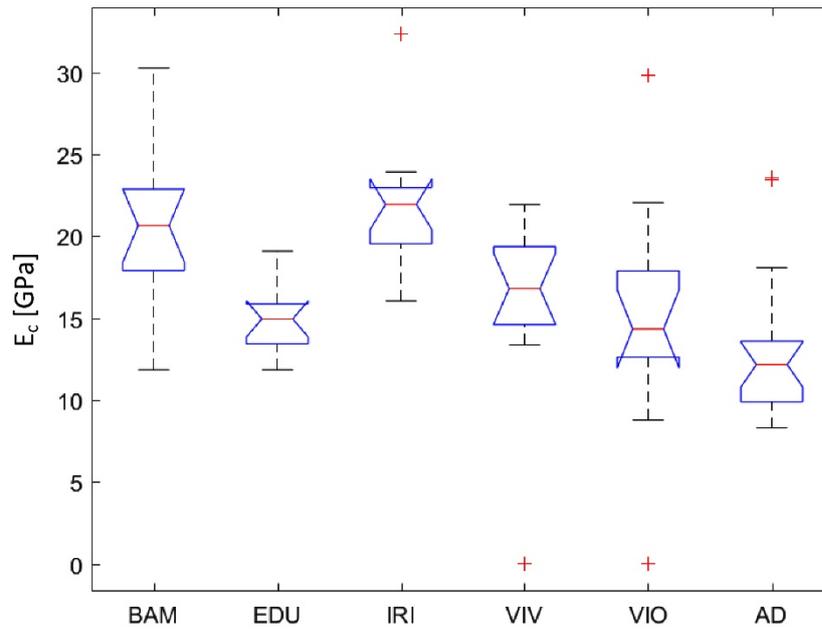


Figura 101: analisi di varianza, moduli elastici a compressione (nodi e internodi)

	σ_c [MPa]					
	BAM	EDU	IRI	VIV	VIO	AD
nodi	74.36	77.35	81.38	65.91	61.70	65.47
	72.83	64.27	71.98	58.47	55.62	58.42
	84.02	75.95	83.86	67.38	61.00	54.54
	76.96	62.82	82.92	65.39	59.36	55.29
	82.39	66.96	84.66	66.28	79.60	57.59
	82.57	61.93	76.63	65.58	54.51	51.41
						56.16
						56.31
					58.25	
internodi	73.38	75.56	84.43	59.98	60.79	58.32
	71.61	61.19	70.38	62.30	50.86	59.92
	87.84	82.33	82.97	64.58	55.81	58.76
	79.03	61.94	81.16	65.90	58.76	55.81
	89.74	75.44	84.39	67.01	62.08	59.05
	90.53	58.52	76.65	63.44	53.90	57.53
						55.03
						55.29
					53.52	
media	80.44	68.69	80.12	64.35	59.50	57.04
dev. st.	6.75	8.06	5.00	2.80	7.26	3.02

Tabella 29: resistenze a compressione; BAM, EDU, IRI, VIV, VIO, AD

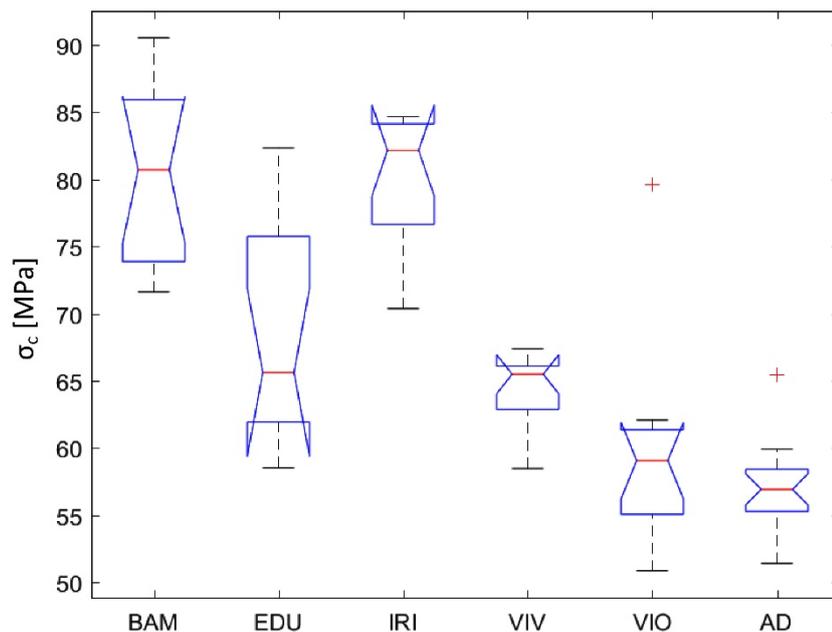


Figura 102: analisi di varianza, resistenza a compressione (nodi e internodi)

	ν [-]					
	BAM	EDU	IRI	VIV	VIO	AD
internodi	0.45	0.23	0.12	0.53	0.56	0.47
	0.16	0.29	0.50	0.51	0.76	0.55
	0.35	0.38	0.13	0.59	0.83	0.60
	0.25	0.32	0.23	0.50	0.48	0.51
	0.21	0.32	0.24	0.42	0.70	0.48
	0.34	0.38	0.23	0.425	0.14	0.66
						0.53
					0.69	
					0.53	
media	0.29	0.32	0.24	0.50	0.58	0.56
dev. st.	0.11	0.06	0.14	0.06	0.25	0.08

Tabella 30: coefficiente di Poisson a compressione; BAM, EDU, IRI, VIV, VIO, AD

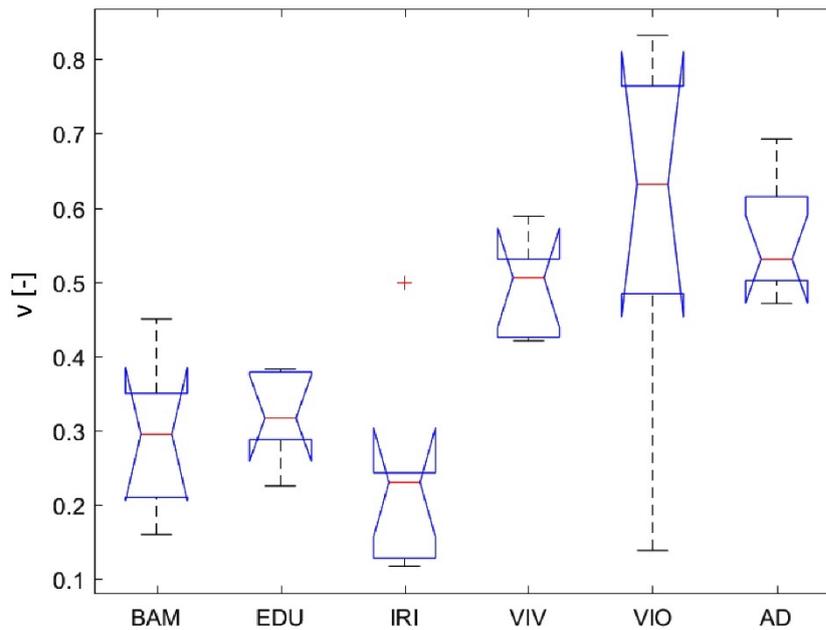


Figura 103: analisi di varianza, coefficiente di Poisson a compressione per campioni di internodo

4.5.2 Trazione

Dalle analisi statistiche eseguite per i test a trazione, si nota un'ottima omogeneità dei risultati, soprattutto in termini di rigidezza. L'Arundo ha un modulo elastico a trazione confrontabile con tutte le specie di Bambù analizzate, ad eccezione del *Bambusoides* (Tabella 31 e Figura 104). La media delle resistenze a trazione di 4 specie di Bambù su 5 risulta circa due volte superiore a quella dell'Arundo, mentre è paragonabile a quella della *Vivax* (Tabella 32 e Figura 105).

	E_t [GPa]					
	BAM	EDU	IRI	VIV	VIO	AD
nodi	24.23	19.26	23.75	14.52	15.91	16.17
	16.61	15.11	16.16	20.56	17.97	15.75
	18.49	16.37	19.01	15.70	16.80	15.21
	17.30	13.44	14.95	11.76	23.25	15.50
	22.01		22.70	12.65	24.03	16.29
	16.92		15.11			14.08
						17.93
						14.53

internodi	20.62	15.71	15.90	18.19	15.91	14.09
	16.05	17.14	17.83	18.61	13.07	14.51
	20.17	14.09	22.24	17.84	14.51	15.22
	21.03	16.69	18.01	14.46	27.36	13.36
	17.70	8.89	15.14	16.59	16.88	14.59
			17.89	2.99	14.14	16.38
					15.66	
media	19.19	15.19	18.22	14.90	18.17	15.29
dev. st.	2.60	2.92	3.12	4.75	4.63	1.15

Tabella 31: moduli elastici a trazione; BAM, EDU, IRI, VIV, VIO, AD

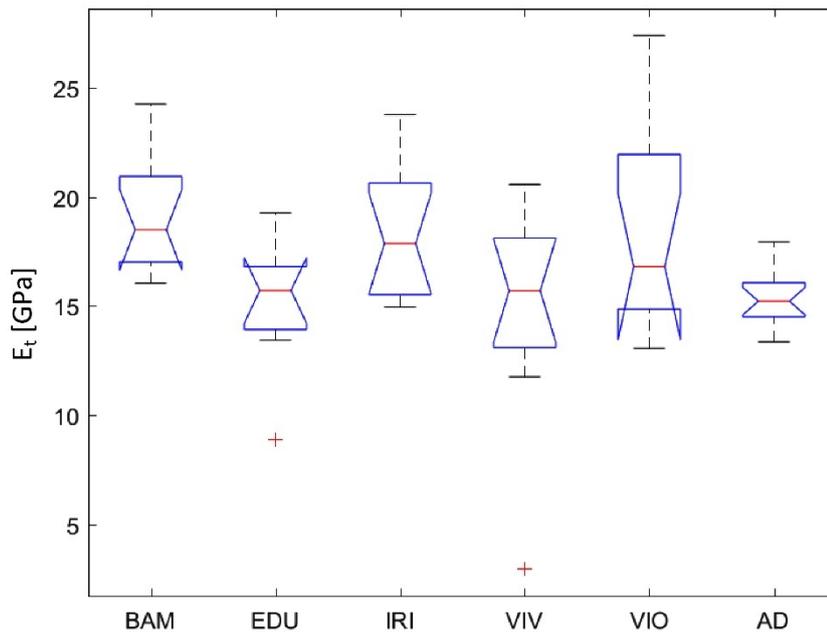


Figura 104: analisi di varianza, moduli elastici a trazione (nodi e internodi)

	σ _t [MPa]					
	BAM	EDU	IRI	VIV	VIO	AD
nodi	220.62	197.51	183.23	136.61	115.42	120.04
	235.89	116.16	186.68	133.80	85.76	108.87
	215.81	181.29	249.84	155.08	137.32	99.09
	166.22	134.92	234.44	214.41	151.18	96.48
	212.66		227.89	161.15	115.17	110.86
	133.05		207.84			88.77
						99.55
						105.56

internodi	222.67	204.95	257.37	245.39	168.97	111.94
	270.27	243.80	167.55	205.64	140.79	134.22
	256.74	227.38	260.51	230.77	196.78	132.56
	273.68	213.41	272.51	212.20	169.26	119.40
	215.44	222.20	257.66	195.66	168.90	123.77
			247.09	186.50	154.99	144.60
					125.00	
media	220.28	193.51	229.38	188.84	145.87	114.71
dev. st.	41.91	42.73	34.92	37.62	31.46	15.70

Tabella 32: resistenze a trazione; BAM, EDU, IRI, VIV, VIO, AD

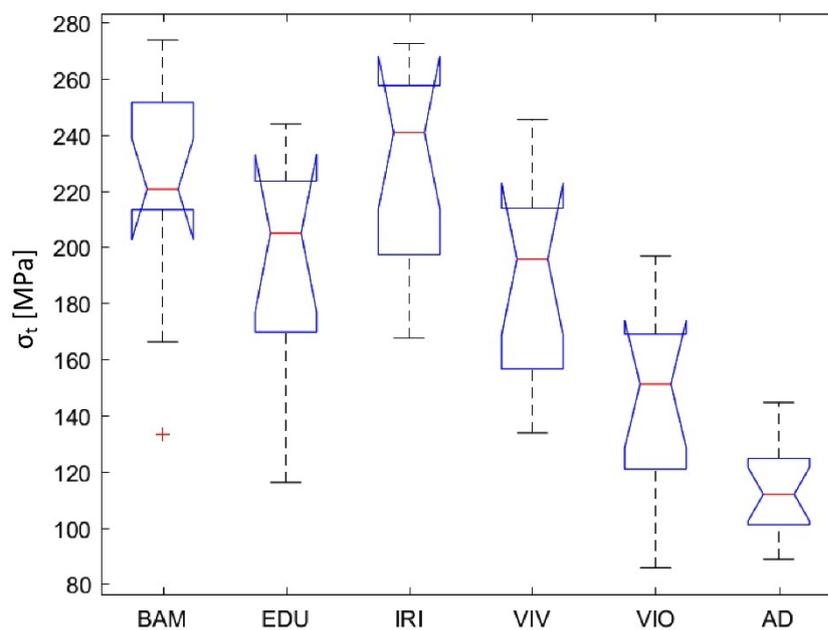


Figura 105: analisi di varianza, resistenza a trazione (nodi e internodi)

4.5.3 C-type

Il modulo elastico calcolato al lembo interno della sezione trasversale dell'Arundo risulta statisticamente confrontabile con GA, BAM E VIO (Tabella 33 e Figura 106); mentre i valori del modulo elastico al lembo esterno si collocano tra le distribuzioni di GA e VIO (Tabella 34 e Figura 107). L'Edulis mostra un comportamento a compressione trasversale opposto rispetto alle altre specie di Bambù e all'Arundo, avendo un modulo di Young crescente dall'esterno verso l'interno della sezione. Per quanto riguarda i valori di resistenza, la media delle tensioni massime al lembo interno di AD è molto vicina a quella di GA e confrontabile con BAM (Tabella 35 e Figura 108). Al lembo esterno invece le

distribuzioni di 4 specie su 5 sono confrontabili con AD; solo BAM presenta dei valori statisticamente indipendenti (Tabella 36 e Figura 109). Dal punto di vista del comportamento a compressione trasversale l'Arundo Donax presenta quindi delle caratteristiche molto simili alle specie Guadua e Violascens.

C-type	E_i [MPa]					
	GA	BAM	IRI	VIO	EDU	AD
	1010.00	957.09	2883.00	1405.70	3778.00	429.31
	321.99	1343.70	1231.60	1937.20	2630.10	698.38
	736.38		954.81	1206.40	4185.00	790.32
	922.46		1513.20	799.85	3226.20	576.01
	1078.00		1655.50	733.10	5190.10	590.99
	798.38		1924.80		4780.20	587.56
	739.33					187.61
	685.96					254.26
	785.50					440.70
	881.14					622.93
						588.04
						423.41
media	795.91	1150.40	1693.82	1216.45	3964.93	515.79
dev. st.	208.76	273.37	672.51	490.56	956.72	175.19

Tabella 33: moduli elastici calcolati sul lembo interno; BAM, EDU, IRI, VIO, AD (C-type)

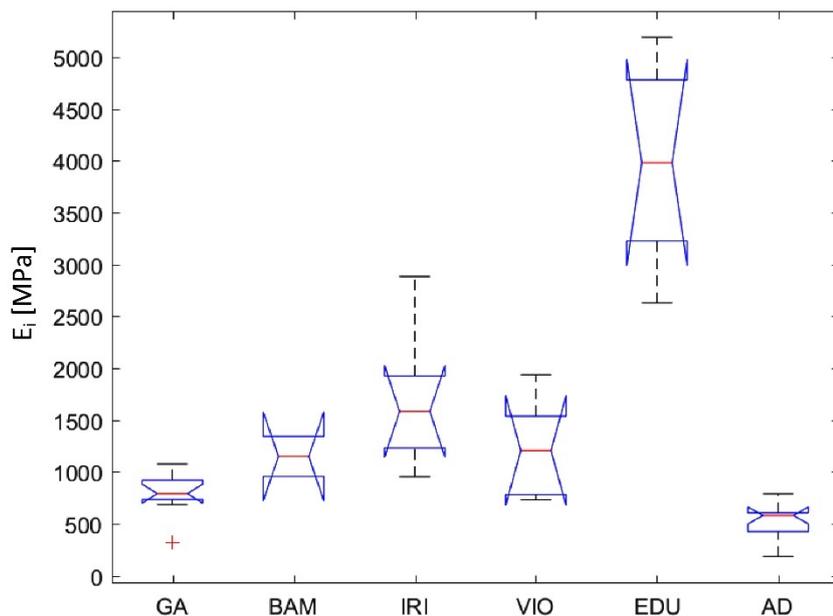


Figura 106: analisi di varianza, modulo elastico interno (C-type)

	E _o [MPa]					
	GA	BAM	IRI	VIO	EDU	AD
C-type	1325.10	3521.30	3816.50	2265.20	3205.70	1696.70
	605.39	3822.40	5349.30	2424.40	1938.10	1085.70
	1021.00		2463.30	2097.30	2789.90	1413.40
	1525.90		2909.00	2099.80	3149.00	1883.90
	1889.30		3039.10	993.79	2332.80	1197.10
	2028.90		3300.30		1806.80	901.23
	1390.20					2109.30
	1637.10					2424.60
	917.78					1922.80
	1055.10					1273.40
						1128.50
					1650.50	
media	1339.58	3671.85	3479.58	1976.10	2537.05	1557.26
dev. st.	447.55	212.91	1019.21	565.57	603.20	466.42

Tabella 34: moduli elastici calcolati al lembo esterno; BAM, EDU, IRI, VIO, AD (C-type)

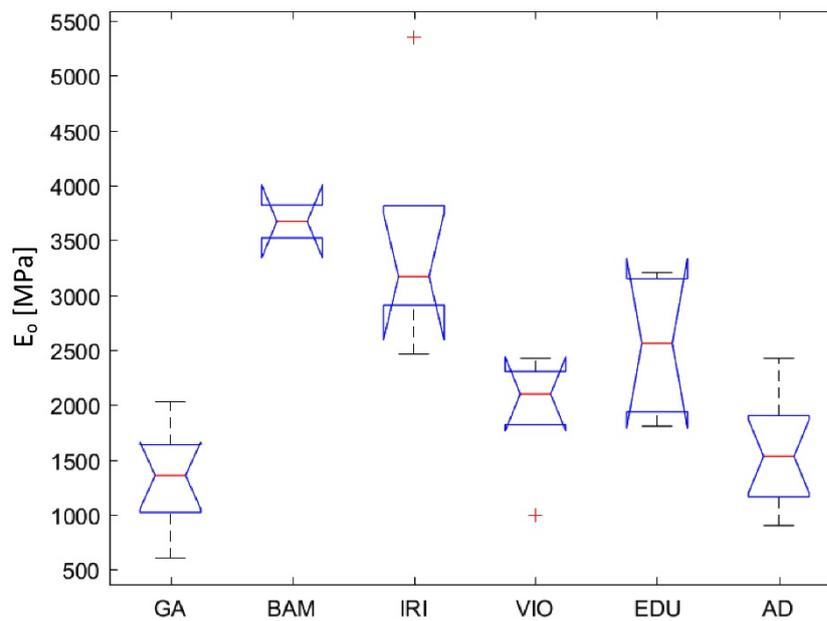


Figura 107: analisi di varianza, modulo elastico esterno (C-type)

	σ_i [MPa]					
	GA	BAM	IRI	VIO	EDU	AD
C-type	-12.19	-13.58	-21.11	-25.523	-28.56	-8.76
	-3.90	-16.53	-12.93	-22.52	-42.30	-12.86
	-7.29		-17.60	-17.589	-32.94	-14.14
	-13.68		-23.35	-21.868	-23.61	-7.11
	-8.49		-22.40	-21.783	-22.26	-10.16
	-11.77		-19.23		-40.84	-13.73
	-12.35					-3.68
	-6.41					-4.70
	-13.22					-7.05
	-11.53					-11.61
					-12.86	
					-11.65	
media	-10.08	-15.05	-19.43	-21.86	-31.75	-9.86
dev. st.	3.32	2.09	3.81	2.83	8.51	3.56

Tabella 35: tensione massima al lembo interno; BAM, EDU, IRI, VIO, AD (C-type)

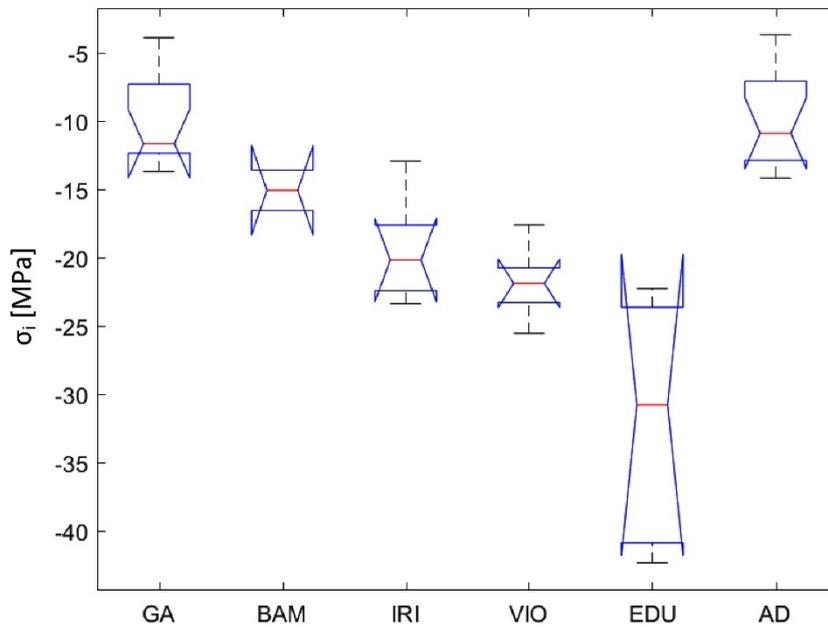


Figura 108: analisi di varianza, tensione massima al lembo interno (C-type)

	σ_o [MPa]					
	GA	BAM	IRI	VIO	EDU	AD
C-type	17.29	25.06	26.89	31.92	14.48	18.29
	8.26	35.84	18.78	17.46	17.27	14.28
	18.46		23.56	22.32	16.14	16.54
	15.44		24.64	24.49	14.76	27.32
	17.78		23.52	16.85	10.73	20.49
	18.29		21.79		13.68	14.62
	16.37					14.32
	19.48					21.23
	11.75					17.74
	21.51					18.55
						18.12
						12.32
media	16.46	30.45	23.20	22.61	14.51	17.82
dev. st.	3.87	7.62	2.74	6.12	2.25	4.01

Tabella 36: tensione massima al lembo esterno; BAM, EDU, IRI, VIO, AD (C-type)

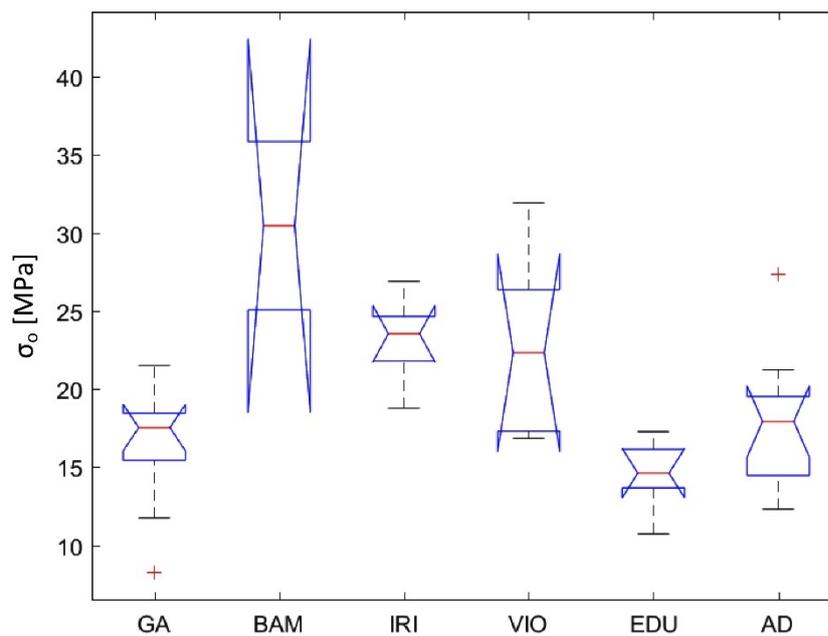


Figura 109: analisi di varianza, tensione massima al lembo esterno (C-type)

Conclusioni

Nell'ottica di un possibile inserimento del materiale all'interno della normativa internazionale, si sono sviluppate una serie di prove di laboratorio fino ad ottenere una metodologia che portasse ad una rottura dell'elemento congruente alle condizioni di carico applicato, di facile ripetibilità e con una buona omogeneità dei risultati. L'utilizzo della DIC ha permesso di cogliere caratteristiche del materiale altrimenti difficilmente determinabili come la variazione del modulo elastico lungo lo spessore della sezione trasversale, ottenuta grazie alle prove di compressione trasversale eseguite sugli elementi *C-type*. Il monitoraggio delle prove a compressione e a trazione ha permesso di comprendere l'influenza dei risultati in funzione della presenza o meno del nodo. Si è appurato che, se nel comportamento a compressione il nodo funge da irrigidimento trasversale, a trazione rappresenta il "difetto" da cui nascono le prime fessurazioni che portano alla rottura dell'intero elemento. Particolare attenzione si è rivolta allo studio di una metodologia di prova a taglio alternativa al fine di semplificare la procedura di prova proposta dalla (ISO_22157, 2019). È stata sviluppata un'apparecchiatura di taglio alternativa che riducesse i possibili piani di scorrimento, proposti dalla normativa, da quattro a due; tale procedura di prova ha portato ad un'ottima omogeneità dei risultati e ad un netto miglioramento della ripetibilità della rottura a taglio. L'apparecchiatura a taglio è stata realizzata nell'ottica di un suo futuro sviluppo per testare anche campioni di Bambù.

L'analisi dei risultati ottenuti mette in luce la forte somiglianza dell'Arundo Donax alle diverse specie di Bambù studiate da (Molari_L._Garcia_J., 2020) e (Konrath_C., 2019); le analogie in termini di resistenza meccanica e rigidità sono state comprovate dal confronto statistico delle distribuzioni di probabilità delle diverse popolazioni. Il fatto che le caratteristiche meccaniche dell'Arundo Donax risultino simili a quelle di diverse specie di Bambù non pone alcun dubbio sul suo possibile utilizzo come materiale strutturale.

Questi risultati pongono le basi su cui fondare il futuro lavoro della ricerca sull'utilizzo della canna comune ai fini strutturali, che dovrà altresì occuparsi dei possibili fattori, quali contenuto d'umidità o età dei culmi, che possano influenzare le caratteristiche meccaniche del materiale. Dato il piccolo diametro dei culmi, l'impiego strutturale prevede che questi siano legati in fasci; successivi studi

dovranno essere incentrati sul comportamento meccanico di tali elementi e delle loro connessioni

Bibliografia

- Abbis_I. (2009). *Ikhlās Abbas. The Architecture of Reed Houses*. Tratto da <http://www.abbis.photo/portfolio/architecture/>
- Ambiente_&_Sviluppo. (s.d.). *Canna palustre come isolante: caratteristiche, utilizzo e posa*. Tratto da <https://www.teknoring.com/news/materiali-da-costruzione/canna-palustre-come-isolante-caratteristiche-utilizzo-e-posa/>
- Barreca_F. (2012). *Francesco Barreca. Use of giant reed Arundo Donax L. in rural constructions*. Reggio Calabria: Agric Eng Int: CIGR Journal.
- Bissanti_G. (2018). *Guido Bissanti. Recuperare la canna comune per una nuova ecologia rurale*. Tratto da <http://antropocene.it/2018/02/24/recuperare-la-canna-comune-per-una-nuova-ecologia-rurale/>
- Broadbent_G. (2008). *The ecology of the mudhif*. University of Portsmouth, UK.
- Brunetti_B. (2015). *Barbara Brunetti. Baraccas: esempi antichi di architettura in canna palustre*. Tratto da <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/baraccas-esempi-canna-187>
- Bucci_A._et_al. (2012). *Andrea Bucci, Francesco Cerino Barone, Roberto Pilu. La canna comune (Arundo donax L.) - Aspetti storici, scientifici e tecnologici*. Roma: ARACNE editrice S.r.l.
- CanyaViva. (). *CanyaViva*. Tratto da <https://canyaviva.org/>
- Conte_P_et_al. (2018). *Pellegrino Conte, Vincenzo Fiore, Antonio Valenza. Structural and Mechanical Modification Induced by Water Content in Giant Wild Reed (A. donax L.)*. Palermo.
- Correlated_Solutions. (2011). *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software*. Correlated Solutions, Inc.
- Cosentino_S., & Copani_V. (2012). *Salvatore Luciano Cosentino, Venera Copani. Canna comune per la destinazione energetica. Il punto sulla propagazione agamica negli ambienti del Meridione d'Italia*.
- Felipe_López_L._et_al. (2019). *Gusti Made Oka, Andreas Triwiyono, Ali Awaludin, Suprpto Siswosukarto. Investigation of an alternative testing protocol to determine the shear strength of bamboo parallel to the grain*. Researchgate.
- Garetto_M. (2002). *Maria Garetto. STATISTICA Lezioni ed esercizi, quaderni didattici del dipartimento di matematica, Università di Torino*.

- Gauss_C_et_al. (2019). *Christian Gauss, Holmer Savastano Jr., Kent A. Harries. Use of ISO 22157 mechanical test methods and the characterisation of Brazilian P. edulis bamboo*. Elsevier.
- Gini_F., & Piva_F. (2019). *Francesco Gini, Fabrizio Piva. Tesi di laurea magistrale: "Fibre naturali e sostenibilità". L'utilizzo delle fibre di canna plaustre per una tecnologia innovativa nel riedificazione del Centro d'incontro per anziani di via Vipacco*. Torino.
- Gobbi_A. (2012). *Alberto Gobbi. Tesi di laurea: Sensori di forza e coppia per macchine automatiche*. Padova.
- Greco_S. (2017). *Silvia Greco. Tesi di laurea magistrale: Il Bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per prospettive sostenibili*. Bologna.
- ISO_22157. (2019). *Bamboo structures - Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms - Test methods*.
- Konrath_C. (2019). *Cliff Konrath. Experimental investigations on the mechanical characteristics of European bamboo - Master's thesis*.
- Martínez_Gabarrón_A_et_al. (2014). *Increase of the flexural strength of construction elements made with plaster (calcium sulfate dihydrate) and common reed (Arundo donax L.)*. Elsevier.
- McCormick_N., & Lord_J. (2010). *Nick McCormick, Jerry Lord. Digital Image Correlation*.
- Molari_L. (2019). *Luisa Molari. Arising Student Consciousness Regarding Structural Properties of Natural Materials with a Structural Challenge Employing Arundo Donax. Creative Education, 10, 1155-1162*. Bologna.
- Molari_L_Garcia_J. (2020). *Luisa Molari, Jose J. García. On the radial variation of the transverse mechanical properties of bamboo (in attesa di pubblicazione)*.
- Mordà_N_et_al. (2012). *N. Mordà, P. Macías, M. Stroschia, P. Bajzelj. Il Bambù: una scelta di "Ecologia Strutturale"*. Torino: Domo Studio.
- Pascale_G. (2017). *Giovanni Pascale. Dispense del corso di "Diagnostica e Sperimentazione delle Strutture M"*. Bologna.
- Polunin_O., & Hurley_A. (1987). *Flowers of the Mediterranean*. London: Hogarth Press.
- Sacco_L. (2007). *Appunti di Teoria delle Strutture*.
- Sorbetti_Guerri_et_al. (2009). *F. Sorbetti Guerri, L. Conti, M. Monti, L. Pini, M. Barbari. Razionalizzazione ed ingegnerizzazione dell'utilizzo di materiali naturali locali per l'impiego in costruzioni ed infrastrutture in ambiente agricolo e periurbano toscano*.

- Spatz_H._et_al. (1997). *H.-Ch. Spatz, H. Beismann, F. Brüchert, A. Emanns. Biomechanics of Giant Reed Arundo Donax*. The Royal Society.
- Speck_O., & Spatz_H. (2003). *O. Speck, H.-C. Spatz. Mechanical Proprieties of the Rhizome of Arundo donax L.*
- Uniroma. (2013). *Vita quotidiana dei sumeri tra passato e presente*. Tratto da <https://www.uniroma1.it/it/node/19554>

Ringraziamenti

Il percorso di tesi che ho intrapreso si è svolto in un ambito di ricerca sperimentale in cui si applica la propria preparazione teorica nello studio delle prove di laboratorio e per la comprensione critica di inevitabili difficoltà legate all'esecuzione dei test.

Desidero ringraziare in primis la Prof.ssa Molari per la disponibilità fornitami, per i confronti reciproci e gli insegnamenti sui temi affrontati nello sviluppo della tesi e in generale per aver riposto fiducia nella mia preparazione.

Ringrazio inoltre Mario, Luca, Roberto e tutti i tecnici del LISG, che mi hanno assistito ed istruito nello svolgimento delle diverse prove e nella risoluzione dei vari problemi riscontrati, dimostrando sempre una grande preparazione e disponibilità.