

Composito per deformazioni in legno mediante stampa 3D

La deformazione del legno o *Wood Warping* è un fenomeno noto che si verifica quando il legno tagliato cambia nel tempo il contenuto di umidità e questo causa una variazione volumetrica non uniforme per via dell'orientamento delle fibre.

In questo articolo presentiamo uno studio su oggetti deformati in legno fabbricati mediante stampa 3D. Simile al legno naturale, la deformazione e l'evaporazione dell'acqua provoca la diminuzione del volume dell'oggetto stampato ma al contrario la stampa del percorso del modello e la portata determinano la direzione dell'allineamento e la sua intensità. Tutto ciò può essere progettato in anticipo ed influenzare la struttura risultante dopo l'essiccazione.

La fabbricazione degli oggetti è eseguita da una tecnica di stampa 3D basata sull'estrusione che consente il deposito di acqua ed inchiostri in oggetti 3D. L'inchiostro da stampa è composto al 100% da materiali a base di legno, farina di legno, nanocristalli di cellulosa e xiloglucano, leganti naturali estratti dalle piante, senza bisogno di alcune resine sintetiche aggiuntive.

Sono state stampate due strutture archetipiche: struttura cilindrica e struttura ad eliche. Nel primo, abbiamo identificato una nuova scala di lunghezza che misura l'effetto della gravità sulla forma. Nel secondo, la struttura mostra una transizione di forma analoga all'apertura di un baccello, quantitativamente riproduzione di previsioni teoriche.

Insieme, regolando accuratamente la portata e il percorso di stampa, la morfologia degli oggetti in legno completamente essiccati può essere controllata. Quindi, è possibile progettare la stampa di oggetti bagnati che formeranno diverse strutture 3D finali.

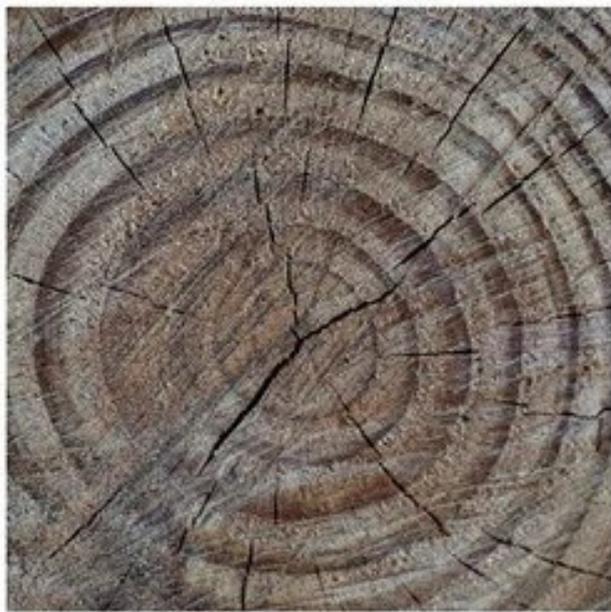
1. Introduzione

Il legno viene lavorato mediante lavorazione sottrattiva, in cui un tronco d'albero viene prima tagliato e poi segato in pezzi più piccoli. Tradizionalmente questi pezzi costituiscono gli elementi costitutivi da cui possono essere costruiti i prodotti in legno, o in un approccio più moderno, questi pezzi vengono lavorati chimicamente e meccanicamente con additivi per produrre materiali in lastre di legno (ad esempio MDF o compensato). Questi processi influenzano il modo in cui progettiamo i nostri prodotti, fornendo linee guida per ottimizzare i costi e migliorare la stabilità dimensionale. Ad esempio, le lastre di legno stratificate sono sia economiche che meccanicamente resistenti. Pertanto, ogni volta che una struttura in legno contiene una parte curva e sottile, si forma piegando una lastra piana. Questo limita la parte a piegarsi solo in una direzione e gli oggetti che devono avere una doppia curvatura, cioè il sedile di una sedia, non possono essere costruiti da una piastra, aumentandone così la complessità e il prezzo [1]. Questo è ben noto a falegnami ed ebanisti.

Qui, invertiamo questa produzione sottrattiva in produzione additiva stampando in 3D i leganti naturali delle pareti cellulari delle piante e le particelle di legno [2]. Il nostro approccio alla fabbricazione consente di creare o ricostruire compositi senza "pagare" in manodopera per la loro complessità. Questo ci permette di rivoluzionare il modo in cui progettiamo e realizziamo strutture in legno. Con il nostro approccio, stampiamo in 3D un inchiostro per legno a dispersione liquida che in seguito si asciuga e si solidifica. Tradizionalmente, questo può essere problematico in quanto porta a una distorsione della forma dopo la fabbricazione dell'oggetto 3D. Inoltre, in molti casi, un ritiro non uniforme può portare alla rottura del materiale (cioè, nel fango in essiccazione, le sollecitazioni interne causate dai gradienti di umidità portano alla frattura).

Ad esempio, questo è spesso il caso quando un albero viene abbattuto. La perdita di acqua provoca un restringimento lungo i tre assi al variare del contenuto di umidità [3]. La struttura interna del legno è costituita principalmente da cellule tracheidi longitudinali e circa il 5% di cellule a raggi orientate radialmente [4]. Pertanto, il ritiro in volume impone un ritiro assisimmetrico che è diverso in direzione radiale e longitudinale e porta frequentemente allo sviluppo di cricche (Figura 1a) [5]. Tale ritiro irregolare è un fenomeno noto come deformazione del legno. Questo fenomeno, per quanto bello sia,

non solo danneggia i prodotti in legno, come le costruzioni di case e i mobili, ma danneggia le tolleranze ingegneristiche [6].



(a)



(b)



(c)

Figura 1. Esempi di cambiamenti di forma indotti dal restringimento nell'essiccazione di materiali naturali. (a) Propagazione della fessura nel tronco d'albero di *Pinus halepensis* a causa della diminuzione del volume dovuta all'evaporazione dell'acqua in un vincolo di geometria cilindrica. (b) Il baccello di semi di *Delonix regia* si attorciglia in una forma chirale. (c) Una sottile fetta essiccata di un tronco di quercia si deforma fuori piano rilasciando le sollecitazioni interne invece di rompersi (credito: Pascal Oudet [7]).

Tuttavia, lo stesso meccanismo viene sfruttato dai membri del regno vegetale per cambiare la loro forma. Le piante non hanno muscoli o scheletri e fanno affidamento su una crescita differenziale per ottenere cambiamenti di forma [8,9]. Inoltre, quando una pianta si secca e avvizzisce a causa dell'evaporazione dell'acqua, che ne riduce il volume, i vincoli della parete cellulare determinano le caratteristiche della deformazione risultante [10,11]. Questi vincoli possono assumere un ruolo funzionale di movimento, per spargere semi o scavare nella sabbia per la germinazione (Figura 1b).

Recentemente, questo fenomeno è stato adottato per fabbricare materiali responsivi biomimetici che subiscono un restringimento irregolare come mezzo per indurre cambiamenti di forma in fogli sottili, che favoriscono l'instabilità fuori piano, piuttosto che la rottura [12]. Di conseguenza, una sottile fetta di tronco d'albero può deformarsi fuori piano invece di rompersi, come mostrato nella Figura 1c. Un'importante classe di materiali intelligenti che subisce un restringimento anisotropo include elastomeri nematici [13], termoplastici stampati in 3D [14], idrogel [15] e gonfiabili canalizzati [16]. Appartiene a questa categoria anche la stampa 3D basata su estrusione, come indagato nella presente ricerca, per la quale i rapporti precedenti hanno identificato due fattori principali che governano la geometria programmata: la quantità di anisotropia da ritiro e il suo orientamento locale [17]. Il primo corrisponde all'entità dell'allineamento indotto e il secondo alla direzione di stampa. Pertanto, il controllo della direzione dell'allineamento è semplice preprogrammando l'orientamento con varie tecniche. Tuttavia, il controllo diretto dell'allineamento stesso non è semplice ed è possibile solo in pochi sistemi sperimentali [18].

In questo rapporto, abbiamo utilizzato un approccio di stampa 3D per controllare la direzione di allineamento e la velocità di flusso di stampa per controllare l'anisotropia di restringimento degli oggetti di legno. La velocità di stampa è stata selezionata come parametro di controllo poiché si presumeva che l'allineamento dei materiali nell'inchiostro dipendesse dalla portata. Mirando a un materiale simile al legno, abbiamo utilizzato inchiostro a base di cellulosa composto da microparticelle di scarto del legno, denominate farina di legno (WF) e leganti naturali estratti dalle piante, nanocristalli di cellulosa (CNC) e xyloglucan (XG). Come nel legno naturale, utilizziamo anche l'acqua come componente principale nelle strutture edilizie che, attraverso l'evaporazione dell'acqua, si traducono in un oggetto deformato in 3D. Il cambiamento controllato della

struttura all'evaporazione dell'acqua apre la strada alla stampa 4D di oggetti in legno completamente naturali.

2. Materiali e metodi

La polvere liofilizzata di nanocristalli di cellulosa (CNC) è stata ottenuta da Celluforce Inc., Montreal, Canada (liofilizzata, LOTTO n. 2015-009). Farina di legno (WF) da legno duro (distribuzione granulometrica 92% < 75 µm e 2% > 150 µm) è stata ottenuta in regalo da **LA.SO.LE. EST S.P.A**, Percoto, Italia (MOD-EASY FIBER-75). Lo xiloglucano (XG) da semi di tamarindo è stato fornito da Megazyme Inc., Bray, Irlanda (lotto n. 150901).

Le sospensioni di XG al 2% in peso sono state preparate mescolando vigorosamente XG con acqua distillata (DW) in una fiala di vetro per 1 ora, a 80 ° C, fino a ottenere una sospensione limpida. Il CNC è stato sospeso in DW (7,5% in peso) e sonicato. L'inchiostro per legno è stato preparato miscelando WF:CNC:XG (2,9:1:0,01 peso) per 5 minuti, utilizzando un miscelatore planetario (AR-100, THINKY Co. Ltd., Tokyo, Giappone).

2.2. Caratterizzazione dell'oggetto

Le dimensioni degli oggetti deformati sono state fotografate utilizzando uno scanner 2D (HP LaserJet 1536dnf MFP) e una fotocamera digitale (Sony a6000 dotata di obiettivo Laowa 65 mm F2.8). Sono stati misurati 16 campioni per i campioni cilindrici e 18 campioni per i campioni elicoidali.

2.3. Modellazione e Simulazione

L'ottimizzazione numerica è stata eseguita in Python3, utilizzando l'ottimizzatore integrato del pacchetto SciPy (scipy.optimize, v1.7.1) utilizzando l'algoritmo Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno con memoria limitata (L-BFGS-B).

3. Risultati e discussioni

Gli oggetti deformati in legno sono stati ottenuti mediante la tecnologia di stampa 3D basata sull'estrusione utilizzando inchiostro acquoso "di legno" costituito da particelle di WF finemente macinate e leganti naturali estratti dalle piante dalla parete cellulare della pianta, CNC e XG. L'estrusione di tale inchiostro è possibile grazie alle particelle a forma di bastoncino CNC che funzionano come modificatori reologici, il che si traduce in un comportamento reologico pseudoplastico. Significa che a riposo, la viscosità dell'inchiostro è elevata e quindi impedisce che goccioli dall'ugello dell'estrusore, ma quando la pressione viene applicata dal pistone della siringa, la viscosità diminuisce e consente il flusso regolare dell'inchiostro [19]. Una volta che l'inchiostro liquido si è depositato nella sua posizione pre-progettata, la viscosità aumenta nuovamente e consente la fissazione dell'oggetto 3D (nella nostra precedente pubblicazione sono state riportate ampie misurazioni reologiche [2]). È stato dimostrato che la pressione applicata nei sistemi di stampa basati sull'estrusione influenza l'allineamento delle particelle, il che si traduce in un'anisotropia unica degli oggetti stampati [20,21].

Esperimenti preliminari hanno mostrato che nel nostro sistema, la proprietà anisotropa determinava un diverso rapporto di restringimento degli oggetti bagnati e asciutti, perpendicolarmente e parallelamente alla direzione di stampa. Sulla base di questa comprensione, abbiamo stampato oggetti in legno a diversi percorsi di predesign 2D e varie velocità, mentre l'oggetto essiccato ottenuto è stato deformato spontaneamente in un oggetto 3D.

A causa della fragilità del legno essiccato e della tecnica del processo di stampa, ottenere un oggetto essiccato non fessurato è una sfida importante. Per ridurre l'influenza del substrato sull'essiccazione e lo sviluppo di crepe, il processo di stampa è stato condotto su un foglio sottile di plastica posizionato su un substrato di teflon, come mostrato nell'illustrazione della Figura 2. Dopo che un oggetto è stato stampato con successo, il foglio di plastica è stato tagliato lungo l'oggetto stampato, consentendo così all'oggetto e al foglio di plastica di scivolare sul substrato di teflon durante l'asciugatura. Inoltre, per ridurre l'effetto di essiccazione non omogeneo dovuto al contatto con il supporto, abbiamo esteso il processo di essiccazione mantenendo l'oggetto in una camera chiusa, che ha prolungato il tempo ad almeno 48 h per la completa essiccazione. Tipicamente, la massa è diminuita del 23,3% dalla stampa allo stato secco finale.

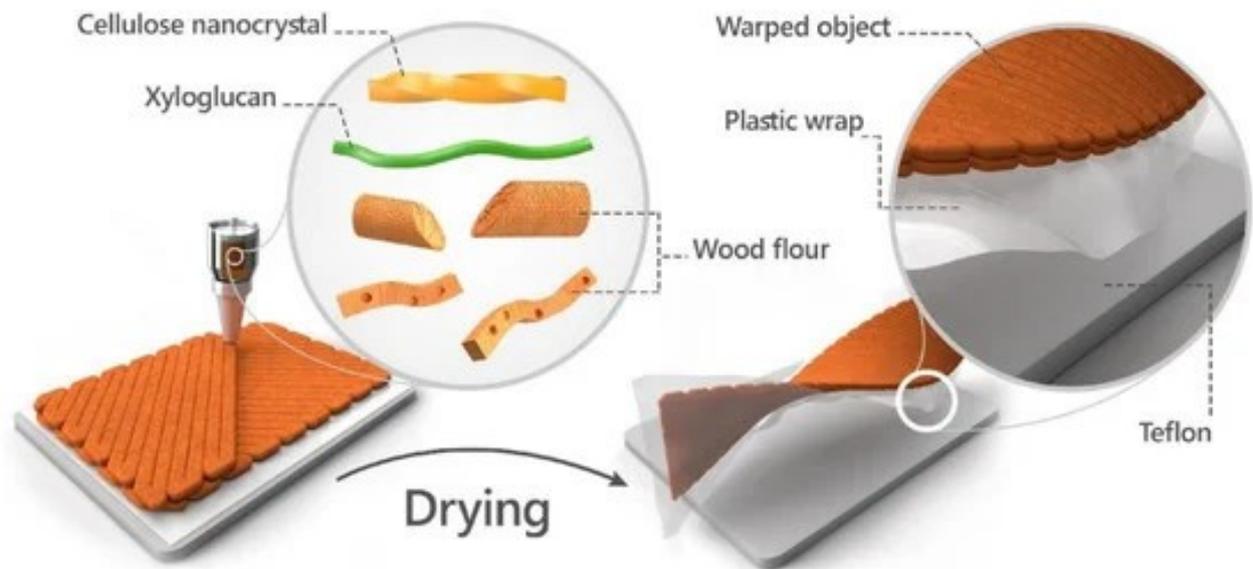


Figura 2. Disegno schematico del processo di stampa e asciugatura. L'inchiostro per legno è costituito da WF e CNC e XG vengono estrusi in un percorso di predesign 2D su un involucro di plastica posizionato su un substrato di teflon. L'oggetto ottenuto si riduce di volume per effetto della graduale evaporazione dell'acqua e scivola sul supporto di teflon. I restringimenti anisotropici si traducono in un oggetto deformato in legno 3D.

Per controllare il comportamento 4D, abbiamo stampato strutture a doppio strato che differivano per orientamento di stampa e velocità di flusso. Quando i campioni vengono essiccati, la differenza nell'orientamento di stampa determina una curvatura spontanea bi-assiale (doppia), che potrebbe variare in direzione e ampiezza [22]. L'emergere di questa curvatura trasforma la forma del campione. Trovare la forma risultante implica un calcolo elastico che di solito non è trattabile e può essere eseguito solo numericamente [23].

La complessità deriva da due tendenze concorrenti della lastra: la curvatura spontanea biassiale privilegia configurazioni con doppia curvatura a sella, mentre la geometria laterale piatta della lastra ammette una sola curvatura (cilindri e coni) senza allungamento.

Chiaramente, le due tendenze non possono essere realizzate simultaneamente in un'unica configurazione. Pertanto, le configurazioni di equilibrio di tali strutture, dette lastre incompatibili, sono stabilite dalla competizione tra i loro termini energetici di allungamento e flessione. Il primo penalizza per curvatura gaussiana non evanescente e

il secondo per deviazioni della curvatura da quella indotta [23,24]. Nel limite sottile, il foglio è inestensibile, obbedendo alla sua geometria nel piano, quindi avendo curvatura gaussiana zero e la curvatura essendo uniassiale ovunque (deviando da quella indotta). Questa deviazione costa energia di piegatura. Nel limite di spessore, la struttura obbedisce alla (doppia) curvatura indotta a scapito dell'energia di stiramento. Questo fatto è all'origine delle transizioni di forma che compaiono in molti di questi sistemi, in cui le lastre realizzate con lo stesso materiale subiscono transizioni di forma a seconda della loro geometria laterale e dello spessore. Ogni volta che la struttura è allungata ed è nastriforme, come le strutture stampate in questo lavoro, il passaggio di forma coinvolge anche la larghezza della struttura, dove i nastri larghi e stretti corrispondono rispettivamente ai limiti sottili e spessi.

Per sfruttare la capacità di programmazione della forma del nostro sistema, dobbiamo prima calibrare la curvatura indotta, κ_0 . Per questo, abbiamo scelto una configurazione che si traducesse in una forma robusta e facilmente misurabile: oggetti rettangolari costituiti da due strati. Lo strato inferiore è stato pre-progettato in modo che le linee del percorso di stampa si spostassero parallelamente all'asse lungo del rettangolo, mentre lo strato superiore fosse stampato perpendicolarmente ad esso (Figura 3a).

Inoltre, abbiamo ipotizzato che diverse velocità di stampa (corrispondenti a diverse portate) influiscano sull'anisotropia microscopica del materiale che sarebbe rappresentato nella curvatura indotta. La struttura di questo oggetto rettangolare ha una curvatura indotta di segni opposti, insieme e attraverso la sua dimensione lunga. In entrambi i limiti elastici, la soluzione è cilindrica, con raggio corrispondente alla curvatura indotta.

Nel limite sottile/largo non dovrebbe apparire alcuna curvatura perpendicolare e nel limite spesso/stretto il cilindro avrà un profilo a sella, simile a un catenoide. In entrambi i casi, il raggio del cilindro corrisponde all'entità della curvatura indotta.

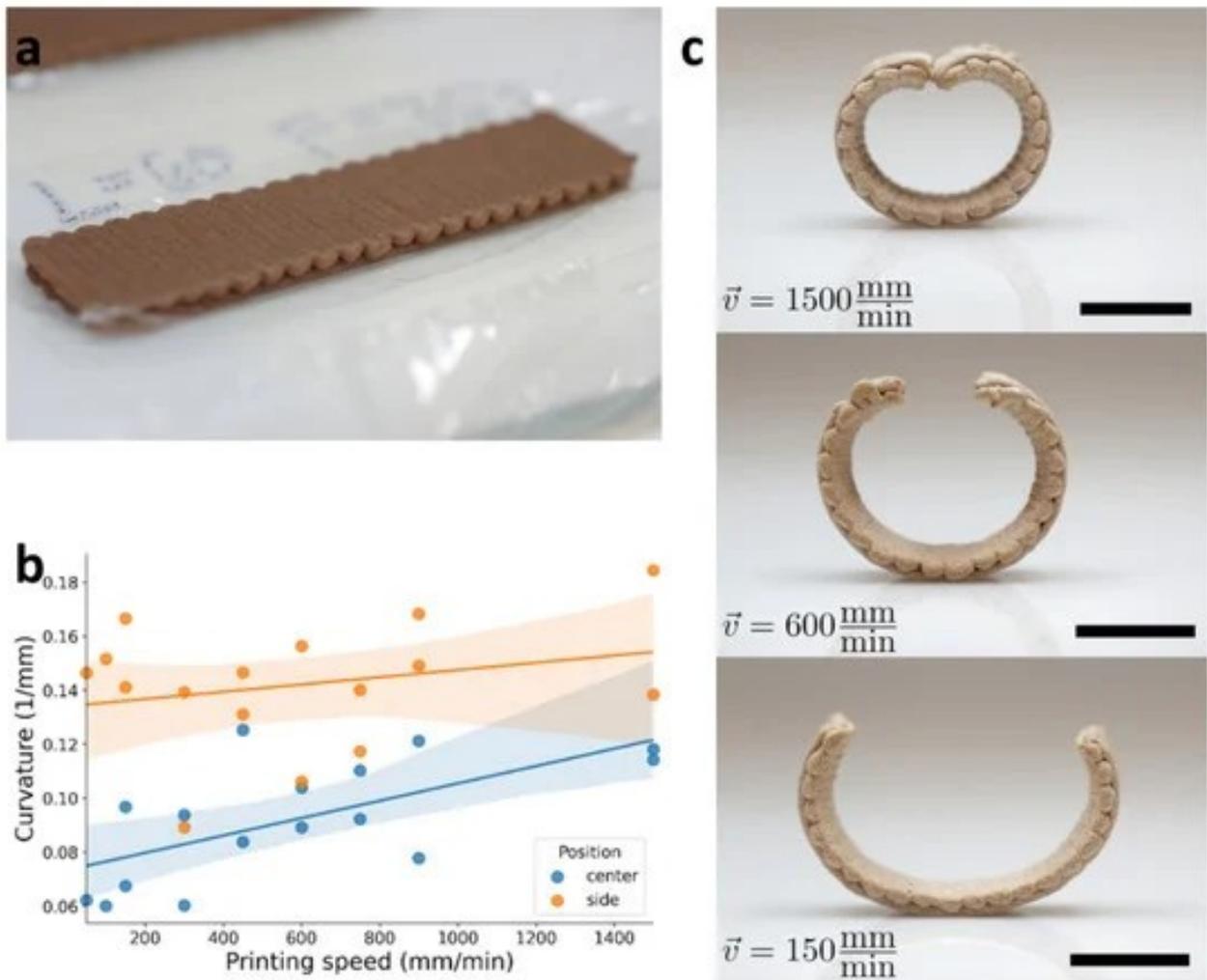


Figura 3. Doppio strato orientato a 90°. (a) oggetto stampato “come stampato”, lunghezza bagnata = 60 mm, larghezza bagnata = 15 mm. (b) Curvatura in funzione della velocità di stampa misurata in due diverse posizioni: rispettivamente centrale e laterale, indicatori blu e arancioni. (c) Oggetti deformati 3D essiccati a velocità diverse, la barra della scala indica 10 mm, dimostrando un effetto maggiore a velocità più elevate.

Successivamente, abbiamo stampato oggetti di lunghezza variabile e velocità di stampa variabili mantenendo le stesse dimensioni dell'oggetto regolando la portata di stampa, che, una volta asciugata, ha infatti adottato forme cilindriche con raggi variabili. La dipendenza della microstruttura degli oggetti dalla velocità di stampa è stata valutata mediante imaging SEM ed è presentata nell'Appendice A. Le microstrutture sono state valutate dopo che gli oggetti sono stati stampati e avvolti. Le particelle di legno appena ricevute sono viste in dimensioni di decine di micron (Figura A1), in accordo con la scheda tecnica dei materiali (dimensione delle particelle inferiore a 75 μm di dimensione delle particelle per il 92% delle particelle e superiore a 150 μm per il 2% del legno particelle di

farina). A 150 mm/min, l'inchiostro sembrava essersi solidificato in una struttura uniforme ma senza orientamento preferito (Figura A2). A velocità di stampa più elevate di 600 mm/min e 1500 mm/min, è apparso che alcune delle particelle si erano allineate con la direzione del percorso di stampa (rispettivamente Figura A3 e Figura A4). Questa scoperta, insieme al comportamento della macrostruttura dell'oggetto avvolto, suggerisce che le particelle si allineano rispetto al percorso di predesign durante la stampa per estrusione.

Per l'analisi della forma, abbiamo scattato foto di queste strutture da una vista laterale e misurato i loro profili circolari. Tuttavia, le nostre misurazioni hanno rivelato che in molti casi il raggio di questi profili cambia insieme al nastro, contraddicendo la nostra previsione di strutture cilindriche. La figura 3b mostra la differenza della curvatura misurata in due punti, il centro e il lato del nastro. Come si può vedere, la curvatura misurata al centro del nastro era minore che sul lato. Ipotizziamo che questa discrepanza sia dovuta agli effetti gravitazionali, risultanti dal fatto che il percorso di stampa pre-progetto imponeva una flessione in direzione opposta alla gravità. Per testarlo, abbiamo realizzato un modello semplice che riduce al minimo l'energia di flessione e gravitazionale del profilo (vedi Appendice B per maggiori dettagli). Il modello assume una struttura quasi 1D, con curvatura spontanea (κ_0), rigidità flessionale (B) e densità di energia gravitazionale ($\rho g z \equiv Gz$), da cui si può dedurre qual è la curvatura finale ottenuta dell'oggetto (Figura 4). Il comportamento di questo semplice modello sembra quasi identico alle nostre misurazioni sperimentali e ha rivelato alcune intuizioni chiave riguardanti il sistema.

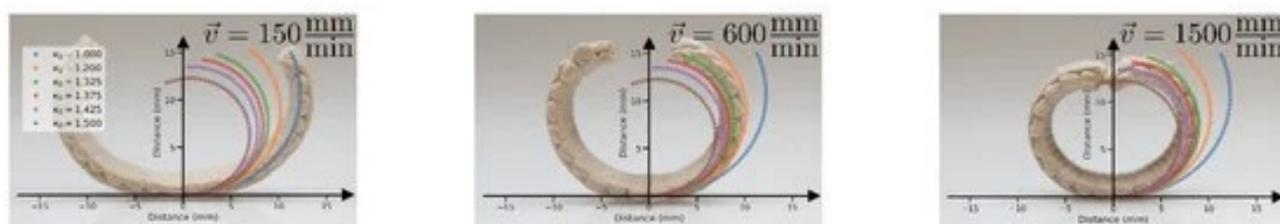


Figura 4. Applicazione del modello di curvatura su oggetti deformati 3D a velocità diverse. Le linee tratteggiate sono i profili risultanti dal nostro modello numerico per diversi valori di κ_0 . I valori risultanti variano da 0,1 mm⁻¹ a 0,14 mm⁻¹.

In primo luogo, ai due bordi del nastro, la curvatura coincide con quella indotta, e più vicino al suo centro gli effetti gravitazionali diventano più dominanti. Ciò era previsto, poiché una leggera modifica della curvatura vicino al centro ridurrà l'altezza dell'intera struttura, riducendo così notevolmente l'energia gravitazionale. Al contrario, la modifica della curvatura ai bordi difficilmente ridurrà l'energia gravitazionale.

Inoltre, la competizione tra gravità ed energia flettente introduce una nuova scala di lunghezze, $\lambda \equiv Bk/202G$, che imposta l'altezza tipica, $\langle z \rangle$, in cui la gravità diventa dominante. Ogni volta che $\lambda^{-1}\langle z \rangle \gg 1$, la gravità domina la meccanica della struttura e ogni volta che $\lambda^{-1}\langle z \rangle \ll 1$, la gravità può essere trascurata.

Infine, se $\lambda^{-1}\langle z \rangle$ è prossimo a uno, fissando la rigidità a flessione e variando solo leggermente la curvatura indotta, si avvicinano al centro variazioni molto grandi della curvatura (mentre la curvatura vicino al bordo segue quella indotta e varia solo di poco). Pertanto, vediamo ancora che l'effetto della gravità sul centro dell'anello è maggiore.

Sulla base di questa comprensione, abbiamo misurato la curvatura indotta, κ_0 , calcolando il raggio dal lato del nastro, e la curvatura ottenuta è risultata essere 0,135–0,145 1/mm, aumentando con la velocità di stampa (Figura 3b). Questa osservazione aggiunge un altro livello alla geometria deformata del legno programmata, introducendo un grado di allineamento all'orientamento del materiale. Inoltre, troviamo che per $\lambda \approx 21$ mm, il nostro modello riproduce la grande variazione della curvatura al centro del nastro. Per i nastri formati, $L \approx 60$ mm che corrisponde ad una configurazione con un'altezza tipica di circa 10 mm, quindi $\lambda^{-1}\langle z \rangle \approx 0.5$, e quindi si inserisce in un regime intermedio in cui la forma è dominata dalla flessione ma gravitazionale gli effetti non possono essere trascurati.

Dopo la calibrazione della struttura cilindrica, l'architettura elicoidale è stata realizzata pre-progettando percorsi di stampa non solo ortogonali tra i due strati ma orientati con un angolo di $\pm 45^\circ$ rispetto all'asse rettangolare lungo (Figura 5). Tale architettura appare nei baccelli e nelle macromolecole autoassemblate ed è nota per generare strutture elicoidali [25]. Contrariamente all'orientamento cilindrico, ora le transizioni di forma erano caratterizzate dal raggio e dal passo della struttura deformata. Gli oggetti a doppio strato di legno stretti obbediscono alla curvatura di riferimento (a forma di sella) e quindi si deformano in una struttura contorta con un raggio di fuga. All'altro limite, per evitare allungamenti, oggetti larghi vengono deformati in strutture elicoidali tagliate da un cilindro, che segue il più possibile una delle curvature principali prescritte, senza sviluppare alcuna curvatura gaussiana.

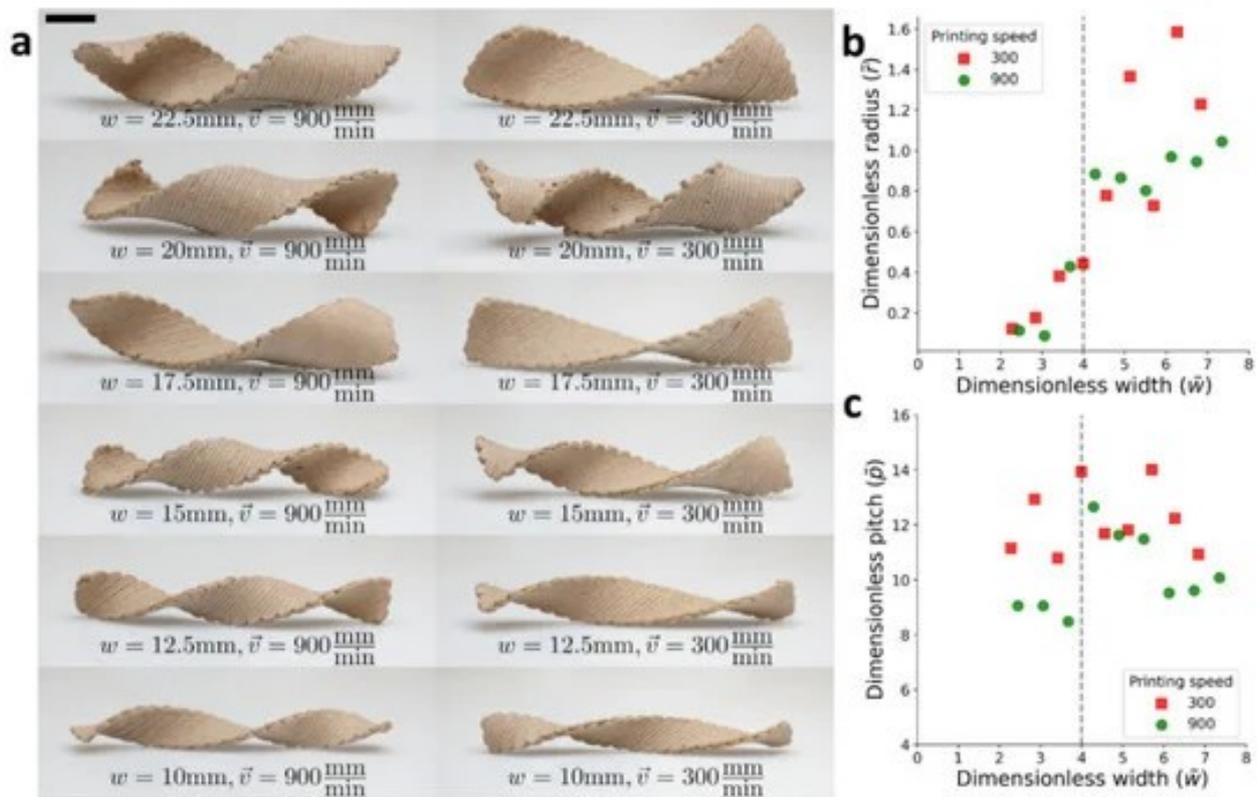


Figura 5. Doppio strato orientato a 45°. (a) Oggetti elicoidali essiccati e deformati in 3D a diverse velocità e larghezze, la barra della scala indica 10 mm. (b) Raggio adimensionale rispetto alla larghezza adimensionale. (c) Passo adimensionale con larghezza rispetto a quella adimensionale. La linea tratteggiata verticale rappresenta la soglia della transizione di forma.

Sono stati stampati oggetti di larghezza variabile (10–30 mm), alle due velocità, 300 e 900 mm/min. Anche in questo caso, i campioni bagnati erano rettangolari ($L = 900$ mm) e piatti, ma dopo l'essiccazione hanno adottato configurazioni elicoidali sorprendenti, che sono state convertite da configurazioni contorte a elicoidali (Figura 5a). Ogni oggetto deformato è stato fotografato e sono stati misurati il raggio e il passo. Come previsto, campioni con le stesse dimensioni laterali stampati a velocità diverse hanno adottato configurazioni diverse. Nel regime ampio (W), il raggio delle strutture elicoidali dovrebbe essere $rW \approx 1/k_0$, che corrisponde a curvatures di 0,14 e 0,1 mm^{-1} rispettivamente per le velocità superiori e inferiori (Figura 5b). Questi valori sono simili a quanto trovato negli esperimenti di calibrazione. Il passo in questo limite è dato da $pW \approx 2\pi/k_0$, che per i nostri valori calibrati dovrebbe essere circa 50 e 40 mm rispettivamente per le velocità superiori e inferiori (Figura 5c). I valori che abbiamo misurato erano leggermente inferiori. Studi precedenti hanno rilevato che la transizione è di circa $w_c \approx 4t_k \sqrt{\nu} \approx 15$ mm, dove i campioni si convertono da strutture elicoidali a strutture contorte [24]. Vicino

alla transizione, il raggio diminuisce rapidamente e il tono aumenta. Infine, al regime stretto (N), il raggio svanisce come previsto e il passo previsto è di nuovo $pN \approx 2\pi/\kappa_0$.

Nel complesso, i risultati sperimentali corrispondevano qualitativamente al comportamento previsto. Inoltre, abbiamo trovato un buon accordo quantitativo per l'ampiezza critica della transizione e il comportamento del campione stampato ad alta velocità. Come affermato in precedenza, i campioni stampati a una velocità inferiore sembravano essere più sensibili alla gravità, il che può impedire loro di attorcigliarsi nella giusta forma durante il processo di essiccazione.

Una volta stabilita la possibilità di controllare la forma fino a strutture elicoidali, adattando l'orientamento e l'allineamento, questo semplice concetto a due manopole può fungere da nuovo kit di strumenti per creare oggetti in legno con molte strutture complesse. Introducendo diverse combinazioni delle due manopole, potremmo creare strutture simili a baccelli stampate in 3D, come mostrato nella Figura 6, che è un ottimo punto di partenza per la fabbricazione di oggetti più complicati.



Figura 6. Bacello in legno deformato stampato in 3D. Questi sono stati realizzati stampando su nastri elicoidali di chiralità opposta con un angolo relativo di 45°.

4. Conclusioni

In questo lavoro, abbiamo **presentato come l'utilizzo di inchiostro per legno con una polvere di legno polidispersa industriale grezza con un sistema di stampa 3D attentamente controllato può provocare la trasformazione degli oggetti in legno.** Abbiamo stampato nastri allungati composti da due strati perpendicolari di due famiglie di strutture:

- **cilindri**, in cui la direzione di stampa corrispondeva agli assi del nastro;
- **eliche**, in cui la direzione di stampa era ruotata di $\pm 45^\circ$ rispetto a questi assi.

Le strutture cilindriche sono state utilizzate per stimare la curvatura indotta e per misurare l'entità degli effetti gravitazionali sulla forma. Le eliche mostravano una transizione di forma da una struttura contorta a un'elica piatta. Si è riscontrato che l'ampiezza critica, associata a questa transizione, concorda con la previsione teorica.

Diversamente dai rapporti precedenti, non solo abbiamo preprogettato il percorso di stampa 3D, ma **abbiamo anche controllato la portata dell'inchiostro, consentendo così l'orientamento e il grado di allineamento.** Questi risultati **convalidano la nostra ipotesi che le particelle CNC influenzino l'allineamento di taglio indotto dal processo di estrusione.** Qui, per semplicità, abbiamo stampato solo lungo linee rette. ma l'introduzione di linee curve [26], zigzag [27] e modelli frattali di Hilbert [28] estenderà notevolmente i possibili risultati. Inoltre, **l'approccio presentato può essere implementato in altri sistemi, come gli idrogel,** e alterando attentamente le caratteristiche dell'inchiostro, è possibile migliorare l'effetto della velocità di stampa sull'orientamento indotto.

In conclusione, le strutture in legno stampate in 3D sono state progettate e fabbricate con successo per evolversi nel tempo in una **geometria deformata programmata,** controllando sia la direzione tramite il percorso di stampa predefinito sia l'anisotropia regolando la portata di stampa. Abbiamo scoperto che la curvatura gaussiana può essere indotta per superfici in legno continue, consentendo così il **controllo completamente biomimico degli oggetti,** adattando sia la composizione dei materiali che i processi di essiccazione del legno. Questo apre **nuove possibilità verso la stampa 4D del legno.**

RIFERIMENTI

MDPI and ACS Style, Kam, D.; Levin, I.; Kutner, Y.; Lanciano, O.; Sharon, E.; Shoseyov, O.; Magdassi, S. *Wood Warping Composite by 3D Printing*. *Polymers* 2022, 14, 733.
<https://doi.org/10.3390/polym14040733>

TRADUZIONE IN ITALIANO

La.So.Le Est Spa – Percoto (UD) – Italy, traduzione dell'articolo in italiano secondo la MDPI Open Access Information and Policy, 23 Marzo 2022.

<https://www.lasole.it/news/wood-warping-deformazione-legno-stampante-3d.html>