

L'attività di ricerca condotta durante il dottorato ha riguardato gli aspetti di sostenibilità della stampa 3D collegati alla responsabilità per danno da prodotto secondo la direttiva CEE 85/374. La stampa 3D è diventata oramai uno strumento di produzione alla portata degli utilizzatori di massa. La scadenza dei primi brevetti, la relativa riduzione dei costi e la semplice gestione delle stampanti 3D ha permesso che questo strumento di produzione non restasse relegato solamente all'ambito industriale, ma un comune cittadino può acquistare produrre componenti, gadget e oggetti singoli, che possono essere venduti o regalati.

Tuttavia, a differenza delle grandi aziende, che hanno l'esperienza e i mezzi per produrre componenti che rispettino le *legittime aspettative di sicurezza*, un comune cittadino che non ha le dovute competenze ed esperienza può produrre dei componenti che potrebbero essere difettosi e causare potenzialmente danni per l'utilizzatore finale. In sintesi, la stampa 3D permette oggi a qualunque consumatore di divenire un produttore e distribuire i propri manufatti che, senza le adeguate cautele, possono essere mal progettati o prodotti con difetti.

La responsabilità per danni causati da prodotti difettosi nell'ambito di un'attività commerciale è trattata nella direttiva CEE 85/374. La filosofia con la quale tale direttiva è stata emanata è sia quella di prevenire l'immissione nel mercato comune europeo di prodotti difettosi che causino danno, sia di non falsare il gioco della concorrenza all'interno del mercato comune. Il costo finale di un componente è infatti determinato, oltre che dal costo delle materie prime, anche dai costi di progettazione, produzione, collaudo e controllo. Un prodotto meno costoso è un prodotto potenzialmente più appetibile in un mercato in cui un consumatore tende a ricercare il prodotto al prezzo più basso. Ad un prezzo inferiore di vendita solitamente è associato un costo minore per il produttore, che potrebbe essere determinato da un risparmio su collaudi, controlli di qualità o all'adattamento del componente agli standard strettamente necessari. Nella libera produzione di massa mediante stampa 3D, i prodotti immessi sul mercato senza le opportune verifiche potrebbero essere difettosi e generare un rischio per l'utente finale.

Nella stampa 3D, generalmente il processo di produzione richiede la disponibilità del modello matematico digitale del componente, comunemente denominato file CAD. Tale modello digitale contiene tutte le informazioni riguardanti la geometria del componente. Il file CAD può essere acquisito, scaricato dal web o progettato e definito dall'utente mediante l'uso di software di modellazione 3D o Computer Aided Drawing (CAD). Successivamente, il modello matematico viene convertito nel formato STL (*Standard Triangulation Language o anche Solid To Layer*), cioè trasformato in una geometria discreta nella quale le superfici sono approssimate con una mesh ad elementi triangolari. Infine, il file STL viene importato nel software di slicing dove, in base alle impostazioni della stampante 3D, dell'orientazione del pezzo nel volume di lavoro e dei parametri inseriti dall'utente, si genera il file .gcode contenente il percorso di stampa e le istruzioni di stampa per il controllo numerico della macchina. Il processo termina con il trasferimento di questo file alla stampante e la successiva produzione per strati del componente.

Nelle stampanti open source, l'utente ha la possibilità di programmare il percorso di stampa manualmente, conoscendo la sintassi del codice G-code e inserendo le relative istruzioni per il controllo numerico. A partire da tale codice, basato su uno standard ISO, le macchine possono richiamare funzioni specifiche in maniera differente. Per la corretta gestione del controllo numerico è dunque necessario conoscere come la sintassi del codice G-code viene interpretata dalla specifica stampante 3D. A parte quest'ultimo caso di scrittura o modifica diretta del G-code, il processo di stampa 3D è relativamente semplice da gestire ma occorre conoscere l'influenza dei parametri di processo sul risultato finale.

I software di slicing permettono all'utente di impostare tali parametri e successivamente generare il file G-code in maniera automatica. La percentuale di riempimento è un parametro di processo che influenza direttamente la quantità di materiale depositato nel singolo strato e la densità del prodotto. Una percentuale di riempimento non idonea può essere causa di rotture del componente, causando eventuali danni. Una temperatura di estrusione troppo bassa, a causa della maggior viscosità del materiale, può causare una sotto

estrusione, ovvero un minor volume di materiale depositato rispetto a quello atteso. Tale mancanza di materiale, se non correttamente rilevata, può costituire una potenziale causa di rottura del componente.

La direttiva CEE 85/374 delinea i concetti di produttore e prodotto: produttore è che lui che materialmente produce il prodotto o una sua parte componente e prodotto è qualsiasi bene mobile, anche incorporato in beni immobili. Produttore, ai sensi della direttiva, è anche il produttore delle materie prime o l'importatore nel caso di prodotti fabbricati all'esterno dell'Unione Europea. La direttiva adduce una responsabilità di tipo oggettivo sul produttore del componente essendo colui che meglio dovrebbe conoscere il prodotto. Trattandosi di una responsabilità di tipo oggettivo, essa prescinde dall'eventuale buona fede del produttore quindi egli è responsabile per i danni causati da difetti dei suoi prodotti. Tuttavia, il produttore finale oggi, non è l'unico soggetto all'interno del ciclo di vita di un prodotto, ma ci sono altri attori come il produttore delle materie prime o di una parte componente. La direttiva inserisce alcune clausole di esonero della responsabilità per il produttore finale, per il produttore della materia prima o per il produttore di una componente. Ad esempio, il produttore di una componente potrebbe essere esente da responsabilità nel caso in cui dimostra di aver prodotto la parte secondo le richieste del produttore (o assemblatore) finale oppure il produttore finale potrebbe essere esente da responsabilità se il prodotto è stato fabbricato secondo normative obbligatorie imposte dagli organi preposti.

Trattandosi di una responsabilità oggettiva, la direttiva non definisce direttamente delle categorie di difetto. Tuttavia, per una migliore assegnazione della responsabilità è possibile fare riferimento a tre categorie di difetto: *difetto di progettazione*, *difetto di produzione* e *difetto di avvertenza o informazione*. Alla prima categoria afferiscono tutti i prodotti di una serie. Nella seconda categoria rientrano solo alcuni prodotti, per esempio solo quelli per i quali è stato impiegato un macchinario di produzione difettoso. Infine, il difetto di avvertenza o informazione non è un difetto vero e proprio associato al componente, ma consiste nella mancanza delle istruzioni necessarie affinché il prodotto sia utilizzato in sicurezza.

I difetti che si possono riscontrare nella produzione di componenti mediante stampa 3D possono rientrare nelle tre categorie. Ad esempio, l'errato dimensionamento di una parte componente o di un prodotto è un difetto di progettazione che potrebbe comportare delle rotture e la responsabilità va attribuita a colui che ha curato la progettazione. Oltre alla percentuale di riempimento già citata, anche la strategia di riempimento nella deposizione del materiale nei singoli strati potrebbe influenzare le caratteristiche del componente e/o generare difetti. In questo caso il responsabile di una rottura del prodotto potrebbe essere l'utente che non ha inserito una tipologia di riempimento idonea a soddisfare i requisiti di resistenza del componente. Una errata deposizione della quantità di materiale da parte della stampante 3D potrebbe causare un difetto di produzione la cui responsabilità potrebbe essere attribuita al produttore della macchina. Conoscere quali sono le criticità dei processi di stampa 3D è importante per capire quali possono essere i difetti, come si può categorizzarli e quindi allocare correttamente le dovute responsabilità in caso di danno a terzi.

L'attività di ricerca del Dottorato si è concentrata sull'analisi del processo di stampa 3D di Acido Polilattico (PLA), materiale molto utilizzato perché sostenibile, economico e non tossico. Il PLA è un materiale che si può reperire ed acquistare come pellet o come filamento. A partire dai pellet è possibile produrre anche il filamento con estrusori industriali o da banco.

Nel capitolo 6 della tesi, viene presentato uno studio volto a valutare l'effetto di due parametri di processo, quali la percentuale di riempimento e lo spessore di strato, sulla resistenza a trazione di alcuni provini prodotti in PLA con la stampante Makerbot Replicator. I risultati di questo lavoro suggeriscono che la percentuale di riempimento, così come il tempo trascorso tra la produzione e il testing dei provini, è meno influente dello spessore di strato.

Nel capitolo 7, viene presentato uno studio su alcuni provini prodotti in PLA con una stampante Prusa i3 Plus modificata con un estrusore a pellet Mahor XYZ. Innanzitutto, è stata valutata la reologia dei pellet al fine di valutare la temperatura di estrusione ottimale dell'estrusore. Successivamente, il parametro relativo

all'estrusione di materiale è stato calibrato nel software di slicing per la stampa a partire dai pellet. Per la calibrazione sono stati prodotti alcuni cubi di prova di cui è stata valutata la precisione dimensionale in funzione del materiale effettivamente estruso. Successivamente la precisione dimensionale è stata valutata anche per geometrie complesse, come i pezzi degli scacchi, e sono stati prodotti campioni per le prove di trazione. I provini di trazione sono stati prodotti considerando due set di parametri di stampa, uno a bassa velocità e l'altro ad alta velocità. Sia i pezzi degli scacchi che i provini di trazione sono stati sottoposti a scansioni tomografiche al fine di indagare le porosità presenti. Inoltre, sono stati raccolti i dati di consumo energetico della stampante a pellet. Da questo studio emerge che maggiore è la velocità di stampa, migliore è l'efficienza energetica rapportata alla resistenza meccanica del materiale. Inoltre, minore è la percentuale di riempimento, minore è la percentuale di porosità.

Nel capitolo 9, vengono analizzate le prestazioni meccaniche di componenti prodotti con due differenti sistemi a estrusione di filamento utilizzando del filamento autoprodotta con un estrusore da banco 3devo Precision 350. Il filamento è stato prodotto con i pellet di PLA forniti da Mahor. Successivamente è stata valutata la precisione dimensionale sul diametro del filo estruso da 1.75 mm, al fine di stabilire la qualità per la stampa con le stampanti Ender 3-Pro e Makerbot Replicator. I risultati hanno evidenziato come i provini prodotti con la Makerbot avessero prestazioni meccaniche migliori. Inoltre, rispetto alla Ender, la stampante Makerbot è risultata avere anche migliori prestazioni in termini di consumo energetico.

Dalle attività condotte durante la tesi si può evidenziare come la conoscenza dell'influenza dei parametri di processo sulla qualità e prestazioni del componente possano essere fondamentali sulla sicurezza dei prodotti stampati 3D. Tuttavia, per addurre una responsabilità di tipo oggettivo ai sensi della direttiva, occorre che l'attività di distribuzione dei propri prodotti sia di tipo commerciale. Un utente che produce gadget per i propri amici o familiari senza compenso non sarebbe responsabile ai fini della direttiva. Tuttavia, dal momento che è comunque presente un rischio per l'incolumità altrui nell'utilizzo di questi manufatti, risulta importante che i prodotti circolanti siano sicuri e anche i prodotti stampati 3D e distribuiti al di fuori di un'attività commerciale dovrebbero rispettare determinati criteri di sicurezza. Questo aspetto richiede una profonda conoscenza del processo ed esperienza, ma anche metodi di indagine, analisi e collaudo che non sono economici e alla portata degli utilizzatori di massa delle stampanti 3D a basso costo.