



Modu

Scenari di modularità per il
footwear in fabbricazione additiva

Candidato
Giovanni Tabacchi

Relatore
Claudio Germak

Correlatore
Stefano Gabbatore



**Politecnico
di Torino**

Modu

Scenari di modularità per il footwear
in fabbricazione additiva

Politecnico di Torino
DAD - Dipartimento di Architettura e Design
Design e Comunicazione
A.A. 2025/2026

Sessione di Laurea Luglio 2026

Candidato
Giovanni Tabacchi

Relatore
Claudio Germak

Correlatore
Stefano Gabbatore

INDICE

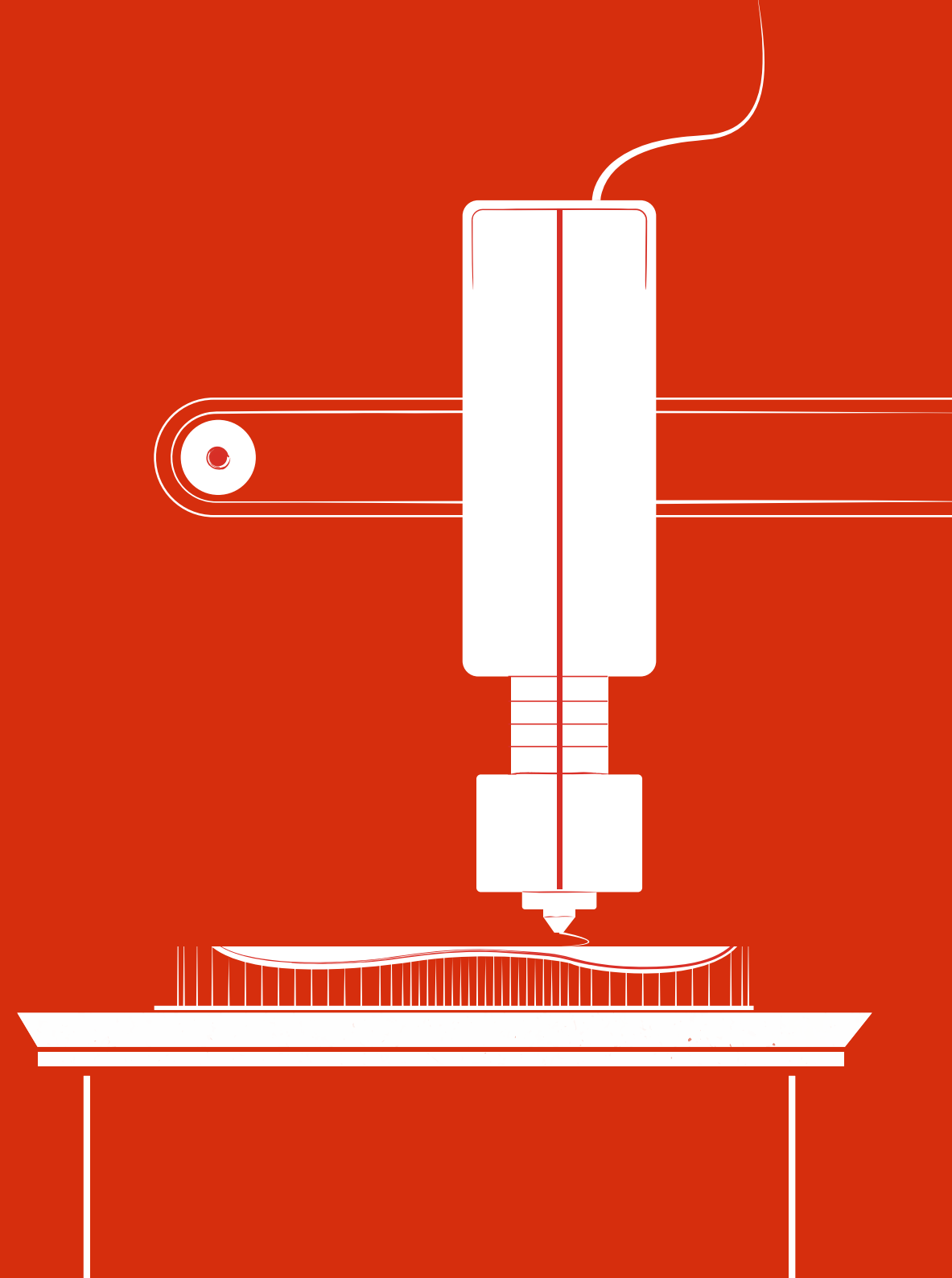
01	Introduzione 1.1 Contesto ed obiettivi 1.2 Metodologia di lavoro 1.3 Additive manufacturing in contesti industriali	6 8 10 14
02	Il consumo di calzature 2.1 Alcuni dati 2.2 L'early disposal	16 18 24
03	Anatomia di una calzatura 3.1 Anatomia del piede 3.2 I componenti della calzatura 3.3 Analisi della camminata	36 38 40 44
04	La fabbricazione additiva di scarpe 4.1 Storia dell'AM nel footwear 4.2 Diffusione nel mercato 4.3 Vantaggi e limiti 4.4 I campi applicativi 4.5 Tecnologie di stampa utilizzabili 4.6 Materiali impiegabili 4.7 La tipologia di riempimento 4.8 Altri parametri rilevanti	50 52 60 62 69 94 102 109 116
05	Footwear modulare 5.1 Il concetto di modularità 5.2 Vantaggi e limiti della modularità 5.3 Tipologie di collegamento	118 120 122 126
06	Sperimentazione progettuale 6.1 Definizione del concept 6.2 Definizione del target 6.3 User personas 6.4 La scelta tipologica 6.5 Selezione dei moduli	140 142 143 146 150 152
07	Presentazione del concept 7.1 Tecnologie di collegamento 7.2 La tomaia 7.3 L'intersuola 7.4 Le suole intercambiabili 7.5 La definizione della forma 7.6 I prototipi 7.7 Storyboard di utilizzo 7.8 Ipotesi produttive 7.9 Modello di business 7.10 Scenario di consumo	154 158 168 170 173 186 199 206 208 212 214
08	Sfide future e conclusioni 8.1 Verso la monomatericità 8.2 Il fine vita 8.3 Educazione alla sostenibilità 8.4 Sintesi dei risultati	220 222 224 225 226
09	Bibliografia	230

INTRODUZIONE

*“... il lavoro di ricerca è tutto e il singolo
oggetto o prodotto ne è una tappa,
un momentaneo stop, più che
una conclusione.”*

Achille Castiglioni [1]

01



1.1 Contesto ed obiettivi della ricerca

La progettazione di calzature è un ambito ampiamente affrontato nel design di prodotto ma che, al netto della definizione di determinati archetipi formali ed espressivi, continua a rinnovarsi attraverso la sperimentazione. Ciò è dovuto alla duplice natura della scarpa: da un lato prodotto funzionale ed essenziale per la vita quotidiana, dall'altro oggetto di moda e strumento di affermazione individuale.

Oltre a ciò, la sua complessità la rende un oggetto particolarmente sfidante dal punto di vista della sostenibilità ambientale, aspetto verso il quale negli ultimi anni vari *stakeholder* della filiera produttiva hanno orientato la propria ricerca. Si tratta, inoltre, di un sistema complesso dal punto di vista biomeccanico, che offre molteplici spunti legati all'ergonomia e al *comfort* nel movimento in relazione alla rigidità e flessibilità dei componenti, alle prestazioni sotto sollecitazione e alla distribuzione del peso.

La tesi si propone di indagare una delle principali sfide che questa categoria merceologica dovrà affrontare nel medio periodo, quella dell'impatto ambientale, esplorando nuove possibilità progettuali tramite un approccio olistico.

A differenza di quanto già proposto in ambito di ricerca e sul mercato, è stato posto particolare rilievo sul mantenimento dei canoni espressivi consolidati, con l'obiettivo di sviluppare una scarpa meno aliena agli occhi dei consumatori e potenzialmente rivolta a un bacino di utenza ampio.

Il risultato dell'esplorazione, a seguito dell'indagine condotta, non ha l'obiettivo di configurarsi come un prodotto pronto per l'introduzione sul mercato, quanto piuttosto come una proposta progettuale che abbia già affrontato in modo critico le principali problematiche legate allo sviluppo di una calzatura modulare con sistema di collegamento ad interfacce interbloccanti, lasciando spazio a futuri perfezionamenti e a possibili sviluppi industriali.

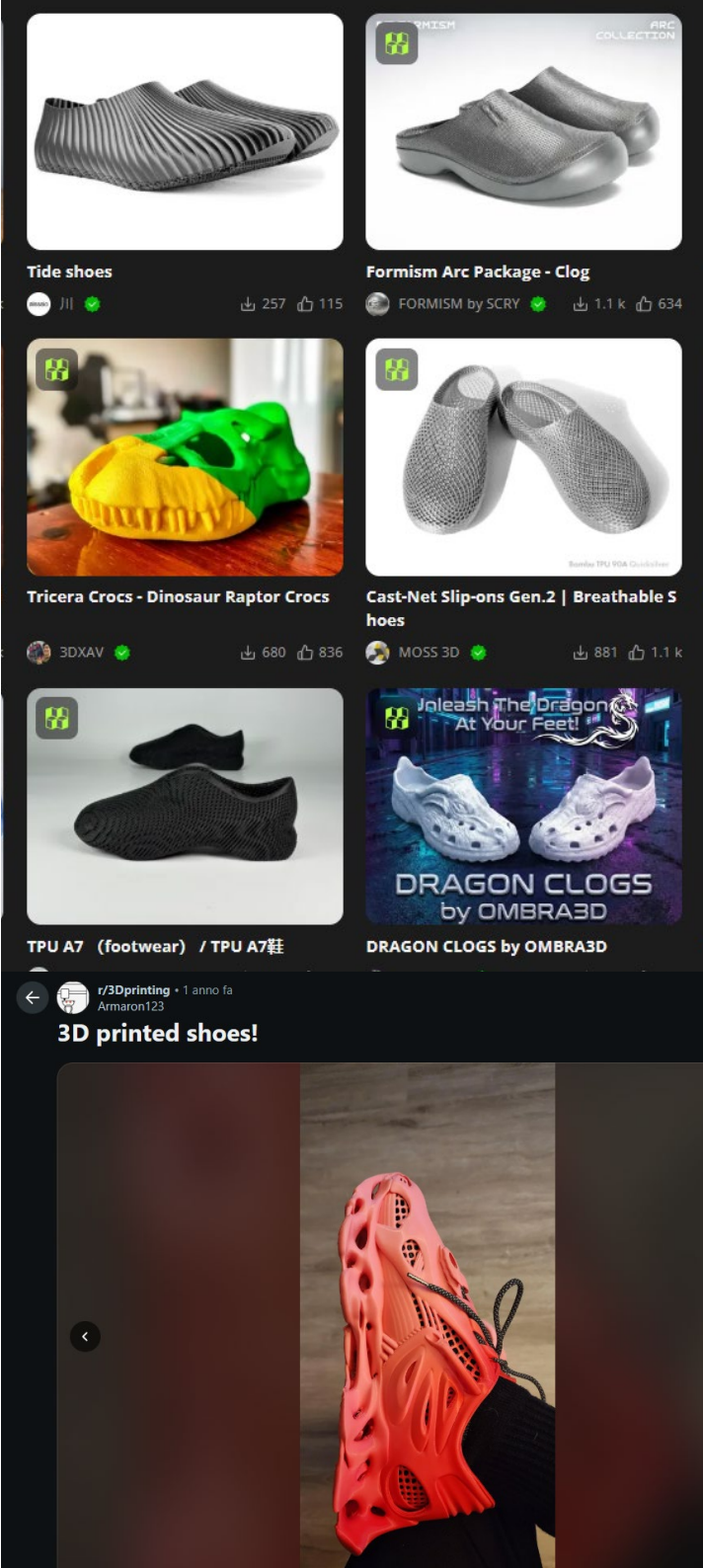
Le problematiche affrontate fanno riferimento primariamente alla sfera funzionale, affiancata dalla considerazione di aspetti espressivi ed emotivi in grado di incentivare l'utilizzo del prodotto, secondo una logica di continue valutazioni e *trade-off* tipici del product design.

Figura 1.1
Alcune delle comunità online consultate per ottenere informazioni aggiornate e verificate empiricamente (nello specifico Makerworld e Reddit) [2-3].

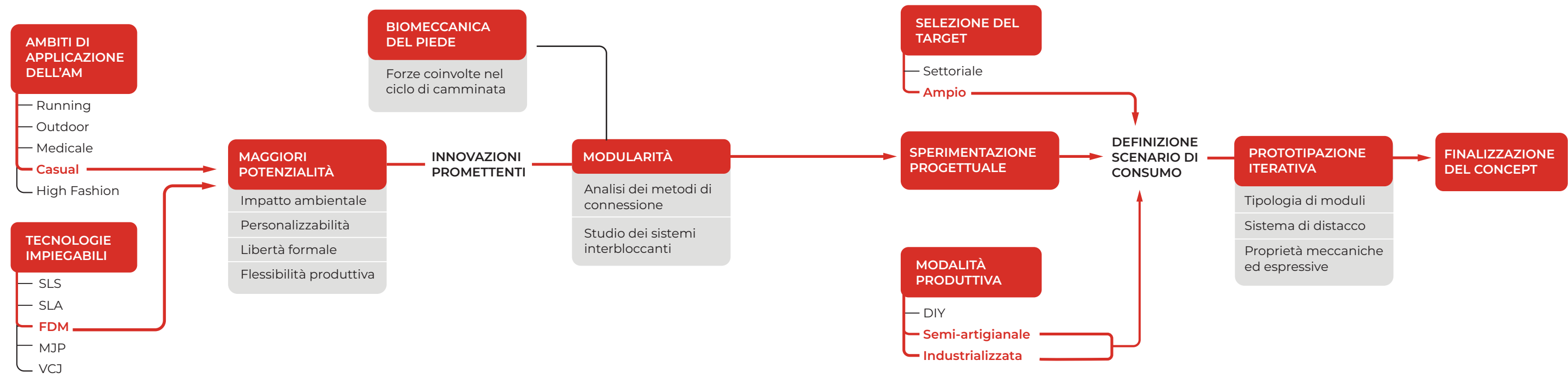
Questo approccio ha orientato gli sforzi progettuali verso lo sviluppo di soluzioni di usabilità prima che di espressività: definito un sistema di collegamento efficace e intuitivo, sarà possibile intervenire successivamente sullo sviluppo estetico e sullo *styling* del prodotto, aprendo il progetto anche al contributo di altre figure professionali.

Parallelamente allo sviluppo del prodotto, la tesi ha rappresentato un campo di esplorazione del potenziale della prototipazione rapida e dell'*additive manufacturing* con polimeri flessibili nel settore calzaturiero. Come si osserva da alcuni sviluppi recenti, tali tecnologie possono contribuire significativamente all'ottimizzazione delle calzature dal punto di vista della sostenibilità. In questo contesto, è stato possibile verificare empiricamente come sia possibile ottenere risultati rilevanti anche in ambito domestico, tramite l'utilizzo di macchinari accessibili.

Data la limitata disponibilità di letteratura scientifica relativa alle specifiche problematiche affrontate, la tesi integra una significativa componente sperimentale, basata su test empirici di materiali, parametri di processo ed accortezze formali, affiancata dalla conoscenza condivisa all'interno di comunità online e progetti *open source* legati alla stampa 3D [fig. 1.1].



1.2 Metodologia di lavoro



Il percorso di tesi ha avuto inizio con l'intento di esplorare l'ambito delle calzature in *additive manufacturing*, valutando, nei diversi settori (*outdoor*, *casual*, *antinfortunistico*, *formale*), il *Technology Readiness Level* e il livello di diffusione della tecnologia. Tale analisi ha permesso di distinguere tra applicazioni consolidate e ambiti ancora sperimentali, orientando il progetto verso contesti con maggior potenziale di innovazione. Sono state inoltre considerate sia possibilità di produzione seriale sia scenari di auto-produzione, in relazione ai materiali disponibili e alle proprietà richieste [fig. 1.2].

Successivamente, è stato necessario individuare il contesto in cui un intervento progettuale potesse generare maggior valore. A seguito dell'analisi di vari ambiti e della definizione degli obiettivi di personalizzazione, libertà formale e sostenibilità, è stato introdotto un approccio di tipo modulare, inteso come strategia progettuale in grado di rispondere a esigenze di adattabilità, estensione del ciclo di vita e compatibilità con modelli produttivi distribuiti.

L'analisi sistematica delle calzature modulari esistenti, sia a livello di *concept* sia di prodotti prototipati o commercializzati, ha evidenziato alcune aree meno esplorate, in particolare per quanto riguarda alcuni sistemi di connessione tra moduli, individuando in questo aspetto una concreta opportunità di sperimentazione.

Parallelamente, sono stati raccolti dati per acquisire una conoscenza sufficiente del ciclo di camminata, delle forze coinvolte all'interno della calzatura e dei requisiti funzionali richiesti, integrando tali informazioni come vincoli attivi nella

progettazione e guidando la definizione delle geometrie, delle aree di flessione e delle interfacce tra moduli.

Figura 1.2
Schematizzazione del percorso progettuale adottato, suddiviso in una prima fase analitica ed in una ideativa.

Definito un target ampio, è stato possibile avviare la fase progettuale vera e propria.

La tesi ha adottato un approccio fortemente iterativo: ogni scelta progettuale è stata validata e riconsiderata attraverso la realizzazione di prototipi destinati al testing con utenti reali, compatibilmente con i limiti di risorse e tecnologie disponibili [Fig 1.3-1.4]. In questo contesto, il prototipo ha assunto un ruolo centrale come strumento decisionale e non esclusivamente di verifica finale. In particolare, l'utilizzo di prototipi realizzati con materiali flessibili si è rivelato fondamentale per valutare in modo attendibile il comportamento dei sistemi di connessione, il *comfort* complessivo e la risposta a flessione dei componenti.

Alcuni moduli hanno richiesto approfondimenti specifici tramite prototipi parziali di singole sezioni. Sono stati condotti test di usabilità e di prestazioni meccaniche che, pur non essendo comparabili in termini quantitativi a quelli industriali, hanno permesso di individuare criticità e apportare correzioni significative. I test presentano limiti in termini di controllo sperimentale e replicabilità, ma risultano comunque rilevanti come strumento qualitativo di orientamento progettuale.



Il percorso metodologico descritto ha consentito di sviluppare una proposta in cui la definizione del sistema modulare emerge da un continuo confronto tra requisiti funzionali, vincoli tecnologici e possibilità offerte dall'*additive manufacturing*. L'integrazione tra analisi, sperimentazione e prototipazione ha permesso di affrontare in modo critico le principali problematiche legate alla modularità nel *footwear*, restituendo un progetto che, pur non essendo finalizzato all'immediata industrializzazione, può costituire una base per futuri sviluppi e approfondimenti.

Figura 1.3 e 1.4

La tesi ha interessato la stampa con filamenti elastomerici, realizzando tredici prototipi impiegati per verificare e correggere le proposte progettuali [4].



1.3 Additive manufacturing in contesti industriali

La tesi ha inoltre fornito l'occasione di indagare il rapporto tra *additive manufacturing* e realtà industriali, valutando le possibilità di integrazione sia dal punto di vista produttivo sia nelle fasi più strettamente ideative. Questa tecnologia, infatti, può essere approcciata secondo modalità differenti, volte alla valorizzazione delle sue unicità [fig 1.5]:

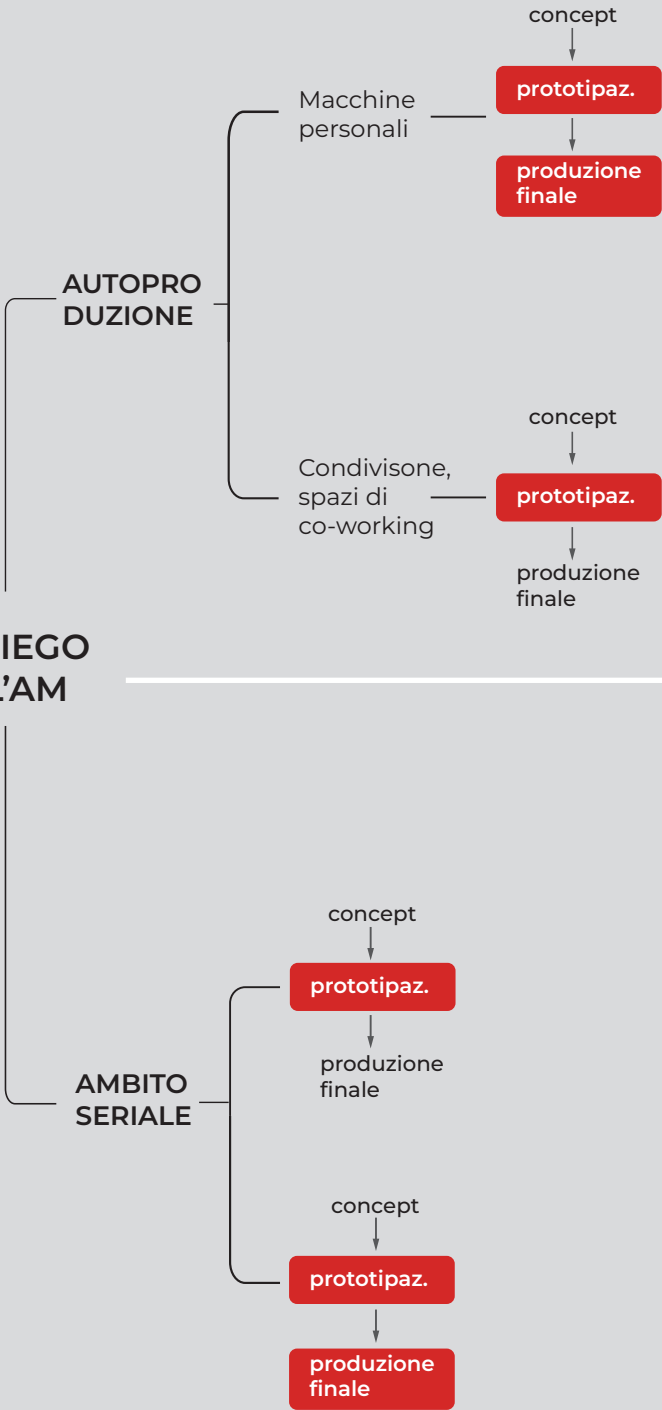
■ **In ambito progettuale:** la stampa 3D risulta una tecnologia accessibile con cui sviluppare prototipi capaci di avvicinarsi con un buon grado di approssimazione al prodotto finale, garantendo generalmente elevata corrispondenza con il modello digitale e riducendo i tempi di realizzazione. Oltre a ciò, è possibile variare in modo puntuale le proprietà del prototipo, ottenendo comportamenti fisici e meccanici desiderati (es: realizzazione di meta-materiali, *compliant mechanisms* ecc...).

Non è tuttavia necessario che il prodotto finale sia realizzato con i materiali e processi propri della stampa 3D; in molti casi questa tecnologia interviene in una fase intermedia di sviluppo, precedente al passaggio a logiche produttive industriali più tradizionali, con il conseguente aumento degli investimenti economici.

■ **In ambito produttivo:** l'AM presenta vantaggi per la produzione di oggetti ad alta complessità geometrica, difficilmente riproducibili (o con costi molto elevati) tramite tecnologie tradizionali. Inoltre, per ridurre gli iniziali costi di investimento richiesti da molti macchinari convenzionali di lavorazione (es: per stampaggio ad iniezione, termoformatura ecc...) si può ricorrere a tecnologie di stampa 3D, disponibili in un'ampia varietà di fasce di prezzo.

Tuttavia, i tempi di produzione più dilatati rendono meno vantaggioso ed efficiente questo approccio per grandi volumi di produzione. Per questo motivo, ad oggi, la diffusione nelle produzioni ad ampia tiratura è ancora limitata, mentre si osserva la presenza in realtà aziendali medio-piccole, che sfruttano questa tecnologia per produzioni *on-demand* e *tailor-made*, anche semi-artigianali [5].

IMPIEGO DEL'AM



Il percorso di tesi ha interessato entrambi gli aspetti. Come già evidenziato, pressoché ogni scelta progettuale è stata validata tramite modelli fisici; la sperimentazione è dunque analoga alle fasi di sviluppo precedenti all'eventuale passaggio a processi produttivi seriali tradizionali; sarebbe infatti possibile realizzare la calzatura anche con tecnologie convenzionali per ampi volumi.

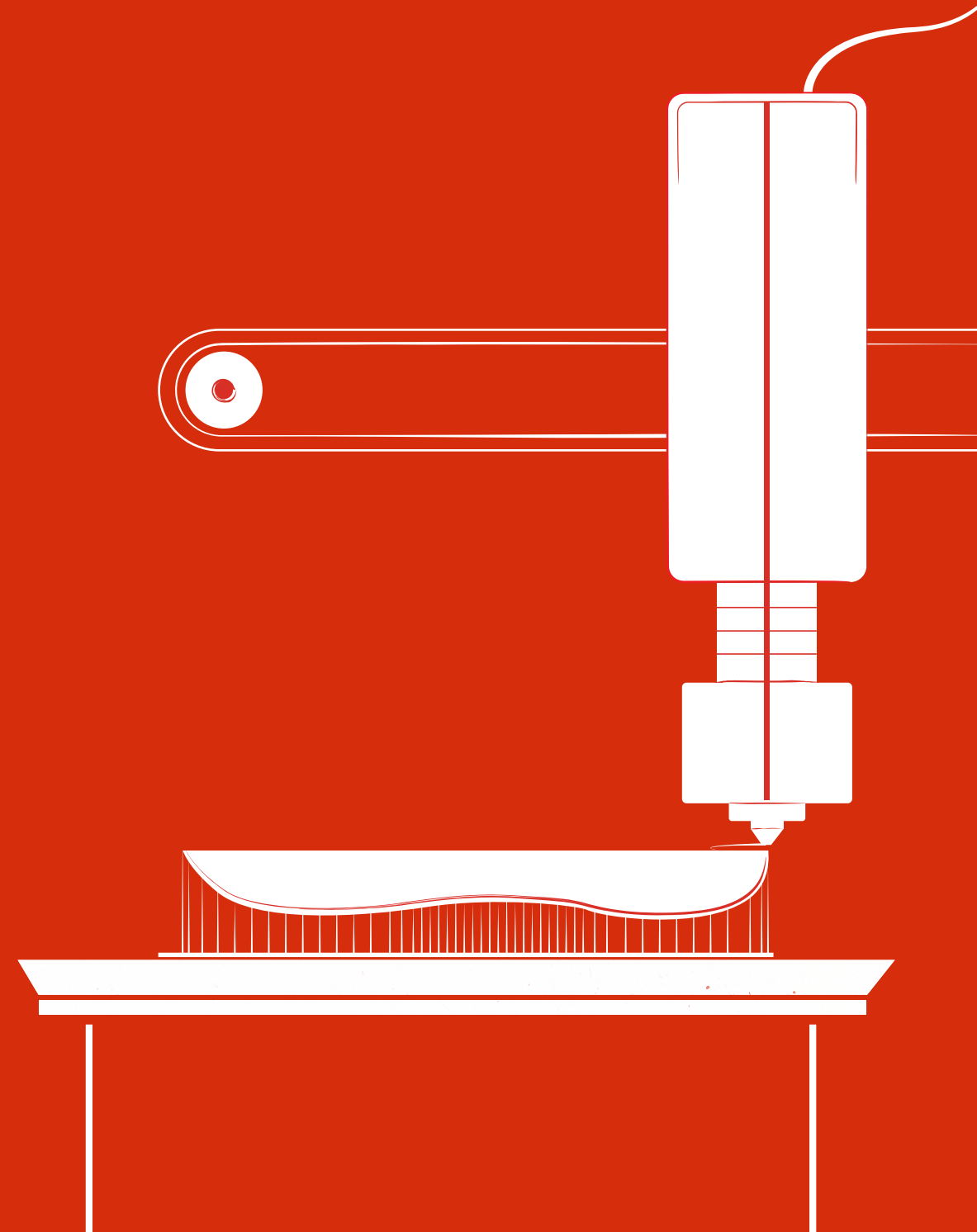
Tuttavia, come riportato negli ultimi capitoli, l'AM potrebbe essere impiegata anche come processo produttivo di molti dei componenti finali, sulla base di quanto dimostrato da diversi *player* nel mercato negli ultimi quindici anni, adottando una logica produttiva che sfrutti le sue peculiarità (tra cui ridotto spreco di materiale, varietà di proprietà nel singolo componente e libertà formale), pur a fronte dei limiti legati all'efficienza produttiva.

Figura 1.5
Schema riassuntivo degli utilizzi delle tecnologie di AM nel panorama progettuale e produttivo contemporaneo; in rosso sono evidenziate le aree di impiego.

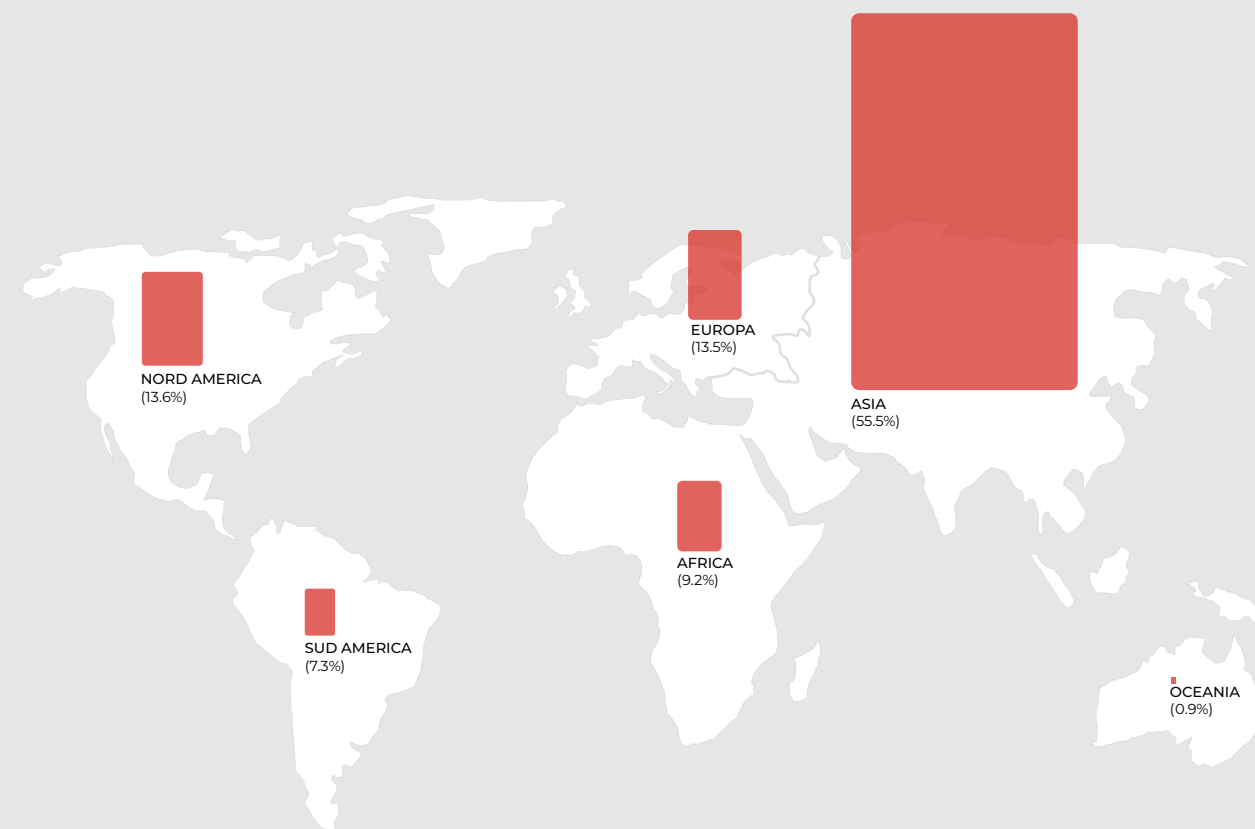
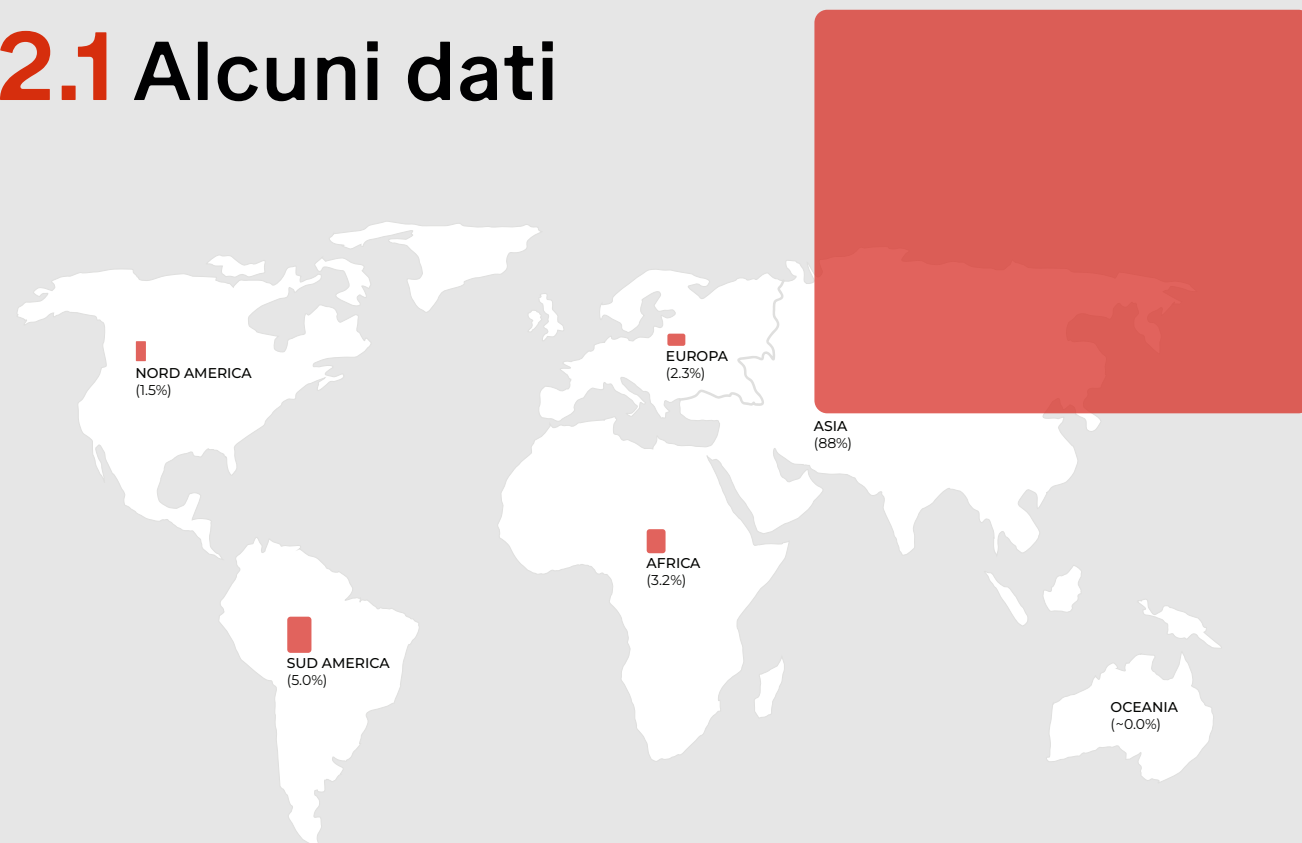
IL CONSUMO DI CALZATURE

L'analisi principia dalla definizione di un quadro delle dinamiche globali di produzione e consumo delle calzature, con l'obiettivo di individuare le principali criticità ambientali e sistemiche del settore. Tale inquadramento consente di delineare lo scenario entro cui si colloca l'intervento progettuale, evidenziando le sfide legate alla sostenibilità e le opportunità di innovazione.

02



2.1 Alcuni dati



LA PRODUZIONE

All'interno del settore dell'abbigliamento, il *foot-wear* è una delle sezioni a maggior impatto ambientale. È stimato, infatti, che annualmente produca oltre 700 milioni di tonnellate di CO₂ eq, pari a circa un quinto delle emissioni dell'industria della moda ed all' 1,4% di tutte le emissioni globali [6-7].

In termini produttivi, il numero di calzature rilasciate annualmente nel mercato è dell'ordine dei 22-23 miliardi, con fluttuazioni di circa 1,6 miliardi [8-6]. L'Asia domina la produzione, realizzando l'87-89% del totale, mentre all'Europa è attribuito il 2,3%. Il mercato europeo risulta in buona crescita, con una valutazione nel 2025 di 11.5 miliardi di dollari ed una proiezione, ad un CAGR del 11.3%, che porterebbe nel 2033 ad una a raggiungere i 21,57 miliardi [9].

I dati legati alla produzione non sono però indicativi delle quantità acquistate: l'UE è infatti responsabile del consumo del 13,9% dei prodotti totali [fig. 2.1] [6].

Figura 2.1
Quantità di calzature rispettivamente prodotte e consumate nel mondo ogni anno [8].

700 milioni di ton. di CO₂ eq. prodotta all'anno dal settore calzaturiero mondiale.

IL CONSUMO

Conformemente ad altre categorie merceologiche, il consumo di questi prodotti è fortemente disomogeneo nel mondo, essendo influenzato da vari fattori tra cui disponibilità economica, costo della vita, abitudini d’acquisto nonché componenti sociali, culturali e di costume .

Nonostante, ad esempio, India e Cina siano tra i leader nella produzione, il consumo di calzature annuale *pro capite* si attesta, rispettivamente, a 0.6 e 2.2 scarpe. Invece, Europa e Nord America primeggiano in questo parametro, con un consumo di 5 e 5.9 unità pro capite all’anno [10,11] [fig. 2.2].

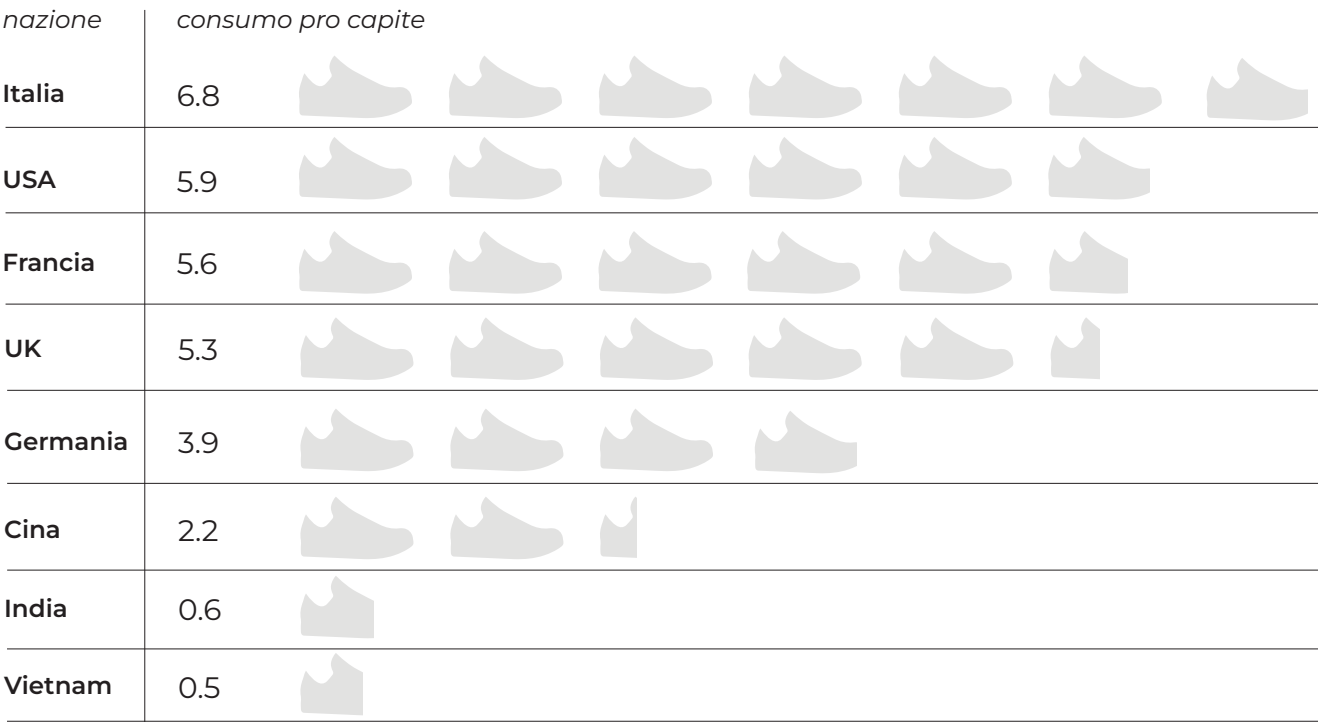


Figura 2.2
Consumo annuale *pro capite* di scarpe in 8 paesi del mondo [10].

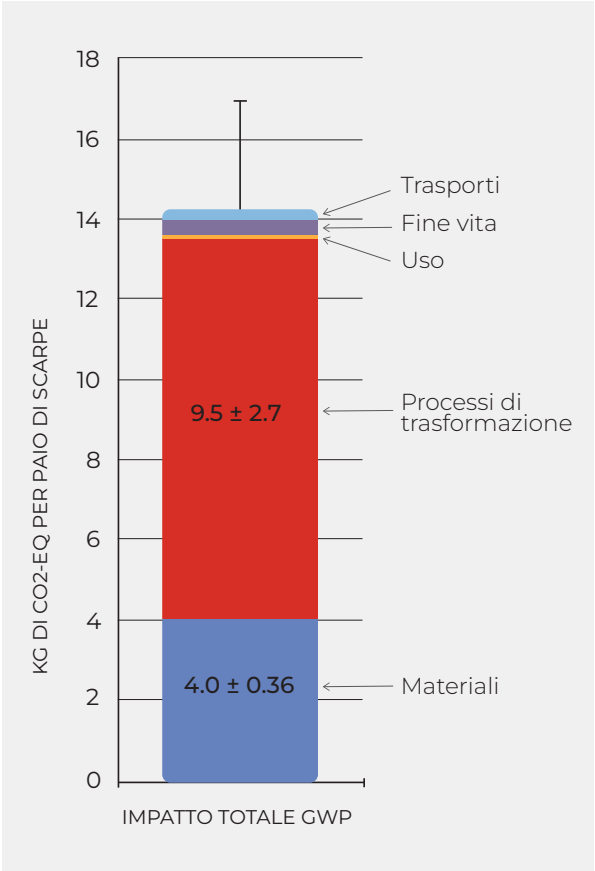
LO SMALTIMENTO

Tra le maggiori problematiche legate alle calzature, infatti, può essere annoverato il fine vita: dei circa 20 miliardi di paia di scarpe dismesse annualmente nel mondo, solo il 5% è sottoposto ai corretti processi di riciclo, mentre la maggior parte viene conferita in discarica [12].

Questa tendenza porta ad una mancata ri-valorizzazione delle materie prime impiegate, la cui produzione è responsabile del maggior impatto ambientale dell’intero ciclo di vita del prodotto [fig. 2.3] [13].

Una calzatura è infatti, tipicamente, un prodotto multimateriale complesso, la cui composizione varia dai 12 fino ai 40 materiali. La natura di questi ultimi dipende fortemente dalle caratteristiche espressive e funzionali della scarpa: si può passare da materiali naturali, come cuoio, sughero e cotone fino a fibre e schiume sintetiche ad alte prestazioni (come nel caso delle scarpe da *running*). Solitamente, i componenti sono uniti da incollaggi che rendono estremamente difficile la separazione senza danneggiamenti [5, 14, 15].

Figura 2.3
Stima del *Global Warning Potential* di una calzatura da running, espresso in kg di CO² equivalente [16].



I processi di riciclo tipicamente prevedono dei cicli di triturazione volti a separare i materiali ed ad uniformare la granulometria, con un reimpiego dei materiali della suola che può passare dalla pavimentazione al riutilizzo in nuove intersole e solette, in mescola insieme a materiale vergine (per non subire peggioramenti delle proprietà) [fig. 2.4]. Sono state definite linee di lavoro che consentono di attuare un riciclo con un dispendio economico contenuto, ma solitamente si ottiene una separazione dei principali costituenti delle calzature in schiume, cuoio, tessuti e metallo, con gradi di purezza dei materiali bassi, che permettono principalmente utilizzi in *downcycling* [fig. 2.5] [12].

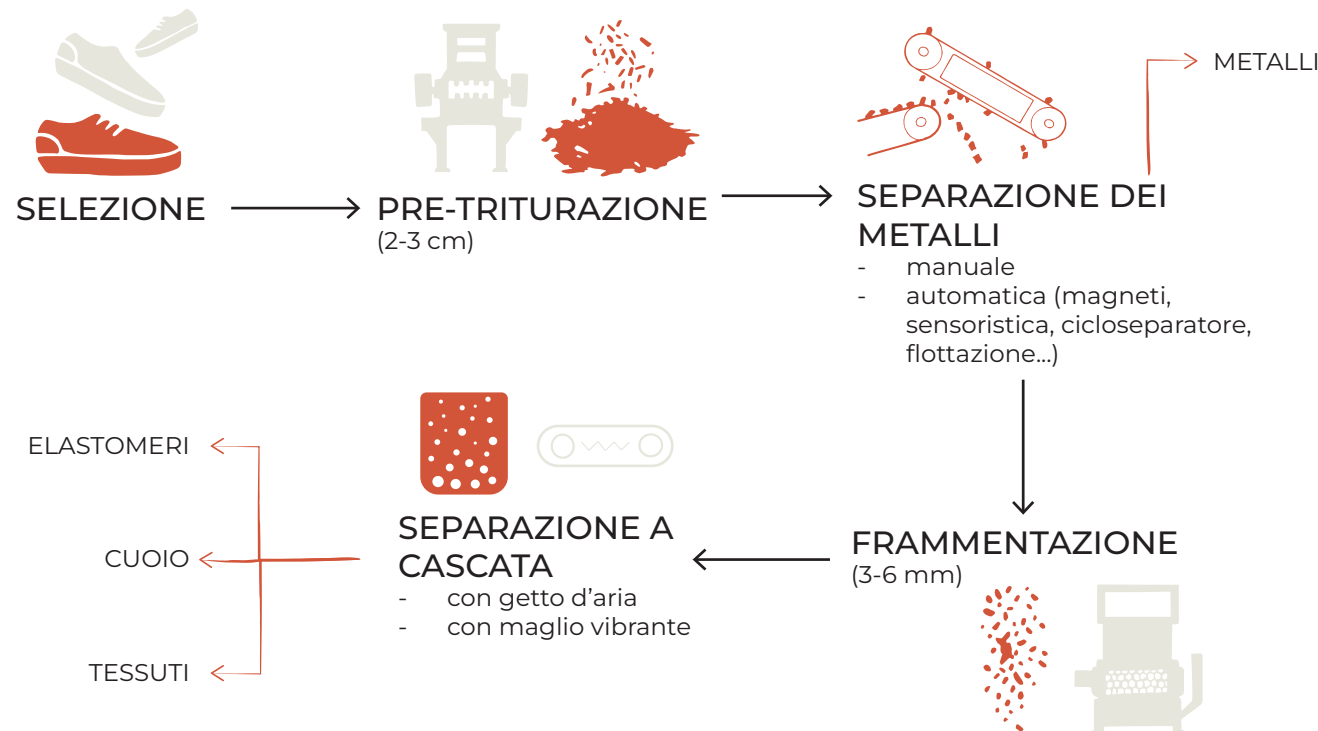


Figura 2.4
Schematizzazione di un tipico processo di riciclo per calzature [12].



Figura 2.5
I processi di recupero materico attualmente più diffusi permettono un reimpiego in nuove soles e solette di scarpe, tappeti antiurto, arredi urbani o come carica inerte in ambito edilizio [17-19].

2.2 L'early disposal

LA DURATA DI VITA DI UNA CALZATURA

Relativamente al consumo di abbigliamento, le scarpe sono tra i prodotti che subiscono sostituzioni più frequentemente. Ciò è dovuto alla quantità di sollecitazioni a cui vengono sottoposte con un uso regolare, le quali mettono alla prova, ad esempio, la robustezza degli incollaggi e cuciture, la durezza superficiale, la resistenza a trazione, impatto, strappo, e *peel* dei materiali. Oltre alla qualità dei materiali e dei processi di assemblaggio, la frequenza di uso influenza fortemente la durata di vita utile di un paio di scarpe.

Difficilmente sono reperibili dati in letteratura scientifica che possano quantificare questo valore, ma si può affermare che, mediamente [fig. 2.6]:

■ Le **scarpe da running** tendono a essere sostituite ogni 500-700 km, ovvero ogni 8-12 mesi circa. Principalmente il deterioramento avviene nel consumo della suola, che progressivamente vede un'abrasione della tassellatura, inficiando sulle qualità di *grip* al terreno e nella perdita di *cushioning* dell'intersuola, ledendo sulla restituzione elastica dello sforzo esercitato dall'atleta per convertirlo in spinta.

■ Le **calzature casual** (in particolare quelle tipo-*sneakers*), se indossate regolarmente hanno una vita utile di 1-3 anni circa. I motivi del deterioramento sono più eterogenei e si estendono dalla foratura o strappo della tomaia (più frequente nelle scarpe in tela) allo scollamento parziale della suola. Inoltre materiali come la pelle e la schiuma EVA possono subire evidenti alterazioni a seguito di cicli di camminata elevati, in particolare nell'area di flessione del dorso del piede; questa modificazione prettamente estetica può incoraggiare l'utente ad uno smaltimento prematuro.

■ Le **scarpe formali** o **dress shoes** (ad esempio *derby* o *tacchi*), tipicamente con tomaia in cuoio, possono prolungare la propria vita utile di molti anni (anche oltre la decina); inoltre, se di buona qualità e assemblate con determinati metodi di cucitura (es: *Goodyear* o *Storm Welt*), risultano più semplici da risuolare. Su questa tipologia di scarpe sono reperibili facilmente molti prodotti di manutenzione, soprattutto per la tomaia. Sono una tipologia di scarpe su cui spesso l'utenza è disposta ad investire maggiori risorse, soprattutto perché attratti da processi artigianali o semi-artigianali che garantiscono durabilità o dal prestigio di *brand luxury*.

■ Le **calzature outdoor** (da trekking, trail running, arrampicata ecc...) hanno una vita utile media di 1-5 anni, essendo soggette a sollecitazioni elevate ma potendo contare su materiali ad alte *performance*. Anche in questo caso l'abrasione della suola, con conseguente perdita di *grip* e formazione di fori, è uno dei principali motivi di sostituzione [20-23].

Figura 2.6
Panoramica delle aree più soggette a deterioramento nelle tipologie di scarpa maggiormente diffuse.



CALZATURE DA RUNNING



CALZATURE CASUAL



CALZATURE ELEGANTI



CALZATURE OUTDOOR



IL CONCETTO DI EARLY DISPOSAL

“Lo smaltimento prematuro indica l’atto di gettare un prodotto prima della fine della sua potenziale durata funzionale, con conseguente perdita inutile di energia incorporata e valore materiale.

Questa pratica è spesso determinata dalla rapida obsolescenza tecnologica, dal cambiamento delle tendenze estetiche o da decisioni di progettazione deliberate che ostacolano la riparabilità. I prodotti soggetti a smaltimento prematuro comportano un onere eccessivo per i sistemi di gestione dei rifiuti e accelerano la necessità di estrarre risorse vergini.” [24]

Figura 2.7

Alcuni dei tipi di usura più comuni nelle calzature, tra cui deformazioni dell'intersuola, fori e strappi nella tomaia, consumo ed aperture nella suola [25-30].

Nel panorama dei prodotti con cui interagiamo più frequentemente nel quotidiano, le calzature risultano un esempio emblematico di smaltimento prematuro. Non è infatti raro che, a seguito dell’alterazione di un singolo componente, la totalità di un paio di scarpe venga ritenuta inutilizzabile, confinandola spesso tra i rifiuti indifferenziati, perdendo dunque tutta l’energia incorporata nel processo produttivo [fig. 2.7]. Le principali ragioni di questo comportamento sono da ricercarsi in:

■ PERCEZIONE DI ESSENZIALITÀ

Le scarpe di per sé rappresentano un bene di prima necessità; benché l’acquisto di una quantità eccessiva le qualifichi come prodotto voluttuario, la percezione da parte dell’utente può essere alterata;

■ VARIETÀ NEL MERCATO

Il mercato delle scarpe conferisce una quantità virtualmente infinita di possibilità al consumatore in termini di tipologia, caratteristiche espressive e funzionali della calzatura, ma anche di fasce di prezzo. La corrispondenza tra prezzo, qualità dei materiali e manifattura fa sì che i prodotti posizionati nelle fasce più basse siano quelli che più rapidamente necessitano di essere sostituiti [fig. 2.8];

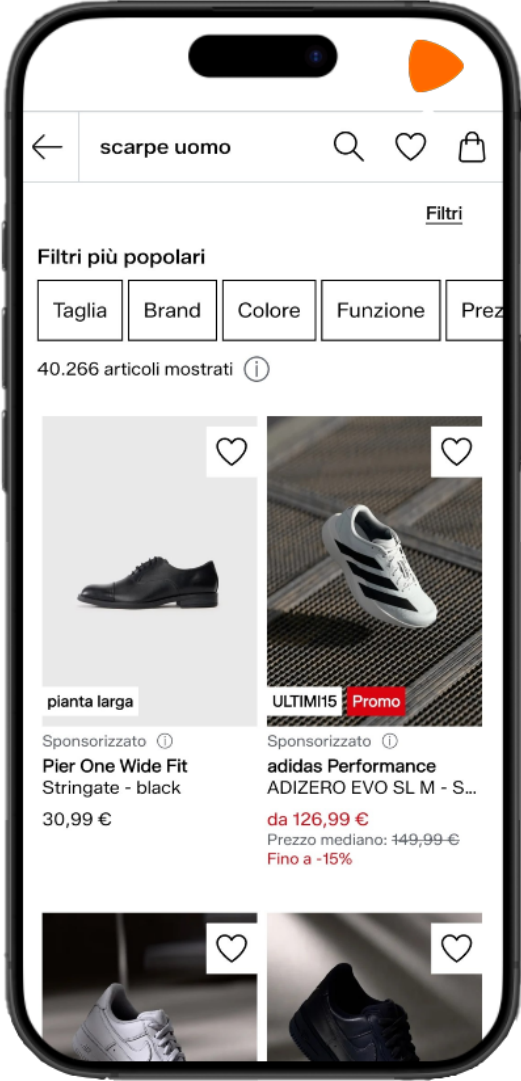


Figura 2.8
La diffusione di grandi piattaforme di e-commerce multimarca consente oggi di confrontare rapidamente migliaia di modelli di calzature, inclusi prodotti a costi estremamente contenuti [31].

■ CONFORMITÀ ALLE LOGICHE DEL FASHION

Ricadendo nel settore dell’abbigliamento, le scarpe sono spesso soggette alle stesse dinamiche che causano iperconsumo [fig. 2.9]; tra queste si possono citare l’aderenza a *trend* e *micro-trend*, la percezione di obsolescenza di un prodotto nell’arco di poche stagioni, il sacrificio, da parte di grandi *player* del settore, della qualità potendosi avvalere del prestigio percepito per il proprio *brand* o la suscettibilità dei consumatori al *digital marketing* (da diversi report emerge come il mercato occidentale delle calzature benefici fortemente delle conversioni da inserzioni su siti e *social network*) [32];

■ COLLEZIONISMO

La scarpa può essere acquistata per fini meramente collezionistici, anche senza prevederne l’utilizzo. Questo fenomeno è particolarmente evidente nel mercato delle *sneakers*, che negli ultimi 15 anni circa ha visto lievitare fenomeni speculativi e di rivendita di calzature, soprattutto quando rilasciate in edizioni limitate o alla luce di collaborazioni tra aziende, designer e artisti [fig. 2.10].

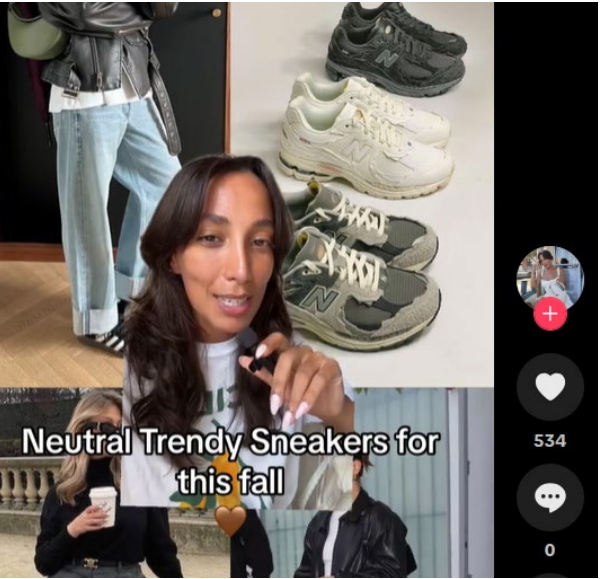
■ SCARSA CONSAPEVOLEZZA

L’utenza è mediamente poco abituata all’auto-riparazione delle proprie scarpe, ove possibile, e spesso il basso prezzo di acquisto rende poco conveniente la riparazione presso calzolai. Servizi di risuolatura o restauro della tomaia sono eseguiti principalmente su scarpe formali o scarponi da *outdoor* di alta qualità.



Figura 2.10
Nate da una collaborazione tra Nike e un affermato artista americano, le Travis Scott x Nike SB Dunk Low, con un prezzo al lancio di 150 \$, attualmente nel mercato dei privati raggiungono cifre pari a 1500-3000\$ [33].

Figura 2.9
Per la Gen Z, TikTok è divenuto uno dei principali motori di ricerca di nuovi prodotti e ispirazioni per l’acquisto di abbigliamento [34].



PROPOSTE POLITICHE

All'interno dei propri piani di incentivo alla progettazione ed al consumo sostenibile, da luglio 2024 il Consiglio Europeo ha formalizzato il concetto di “*right to repair*” in un piano che, da luglio 2027, diverrà pienamente attivo in molti stati dell'Unione. I piani si fondano su sovvenzioni e sullo sviluppo di una piattaforma per la riparazione di determinate categorie merceologiche; l'obiettivo è quello di garantire ai consumatori la possibilità di riparazione dei prodotti in tempi e costi ragionevoli (se non gratuitamente), per opporsi alla tendenza di sostituire un prodotto rispetto a ripristinarlo. Attualmente sono presi in considerazione per il piano i potenziali RAEE, contenenti terre rare e componenti elettronici di valore, tra i quali *smartphone*, lavatrici o aspirapolveri [fig. 2.11]. Resta in dubbio la possibilità che queste disposizioni vengano ampliate anche ad altre tipologie di prodotti [35].

Nell'ambito della sovrapproduzione, è stata recentemente definita una misura (febbraio 2026), appartenente all' *Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)* che vieta la distruzione di tessuti e calzature invendute da parte delle aziende. Le stime riportate affermano che questi rappresentano circa il 4-9% della produzione totale, generando circa 5.6 milioni di tonnellate di emissioni di CO². Questa disposizione sarà applicata, da luglio 2026, alle grandi imprese, per poi passare anche ad aziende di minori dimensioni [37].



Figura 2.11
Ad oggi i progetti comunitari di riparazione e recupero materico si concentrano su grandi e piccoli elettrodomestici ed elettronica di consumo, dato il contenuto materiali ad alto valore [36].



I PROBLEMI DELL'AUTORIPARAZIONE

L'autoriparazione delle proprie scarpe è una pratica che viene più o meno frequentemente adottata dai consumatori a seconda del componente che ha subito il deterioramento, della complessità dell'operazione e delle possibilità di ottenere un risultato funzionale e pulito.

- 1. consumo del plantare interno:** può essere risolto acquistando un'altra soletta e l'operazione di sostituzione è tipicamente ad un livello di complessità basso.
- 2. scollamenti della suola:** se di piccola entità possono essere riparati con adesivi (spesso poliuretanici) o *contact cement* economici.
- 3. danneggiamenti della tomaia:** difficilmente vengono affrontati da un utente comune, data la difficoltà nel reperimento dei materiali e nell'ottenere un effetto *seamless* [fig. 2.12]. Perciò, spesso portano allo smaltimento della scarpa.
- 4. danneggiamenti alle cuciture:** soprattutto se strutturali, sono difficilmente riparabili in mancanza di appositi macchinari (si pensi alle cuciture *Goodyear* per assemblare suola e tomaia, ad esempio).
- 5. deformazione o chipping della suola e intersuola:** spesso sono irreversibili, e possono essere contrastate, benché con risultati evidenti sul prodotto finale, con sigillanti rapidi (es: *Shoe-goo*) [fig. 2.13].



Figura 2.12
Le toppe sono utilizzate per la loro economicità e rapidità di applicazione; tuttavia, presentano una durabilità limitata e raramente garantiscono continuità estetica con il design originale della scarpa [38].



LA PRESENZA DEI CALZOLAI

Un fattore fortemente legato alla tendenza all'*early disposal* delle calzature risulta essere la bassa disponibilità di calzolai sul territorio. Sarebbe difficile stabilire se la mancanza di questa risorsa sia la causa di comportamenti di iperconsumo nell'utente o un sintomo.

Dal punto di vista quantitativo, un'indagine del 2023 afferma che, in Italia, sono state identificate 2999 imprese che si occupano di riparazione artigianale di calzature (a fronte delle 7407 imprese artigianali totali, che includono anche quelle di produzione). Queste sono distribuite in modo disomogeneo nel territorio; in Veneto si può contare oltre il 10% delle attività, mentre la Sardegna si attesta a meno del 5%; in generale, il numero risulta in calo da oltre un decennio, sia in ambito produttivo che di riparazione o modifica [42, 43].

Come accennato in precedenza, la semplice reperibilità di calzature a basso costo, dovuta anche all'apertura ad un mercato globalizzato ed a logiche di produzione industriale, ha sicuramente influito sulla percezione di valore di un bene come le scarpe (con prezzi che mediamente variano tra i 30 ed i 200 €) incoraggiando una semplice sostituzione e danneggiando, quindi, l'industria calzaturiera artigianale [fig. 2.14] [44].

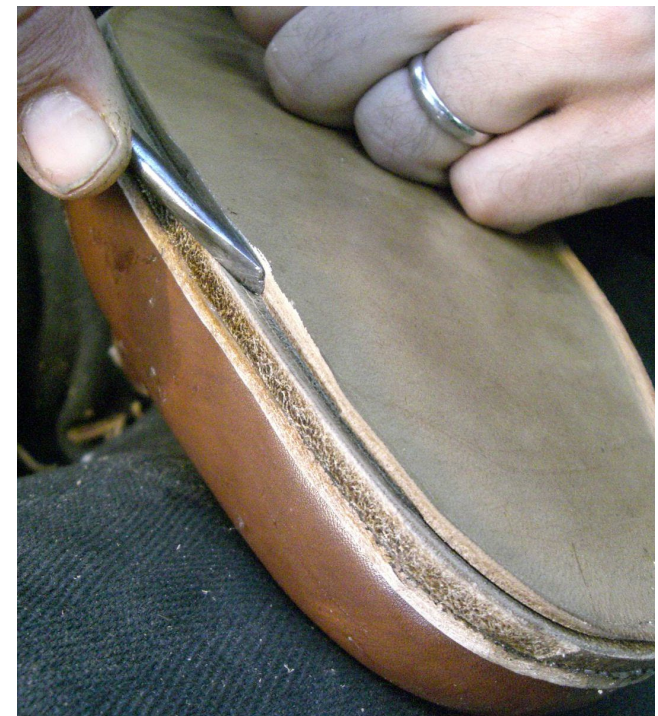
Figura 2.13

Per incollaggi duraturi si utilizzano spesso cementi a base neoprenica; sono però diffusi anche adesivi poliuretanici multiuso (es. Shoe Goo) per riparazioni rapide sia della tomaia che della suola [39-41].



Figura 2.14

Le calzature formali si prestano maggiormente alla riparazione poiché spesso è possibile sostituire integralmente la suola a partire da materiali come il cuoio, attraverso processi artigianali tradizionali [45].



La differenziazione stessa nell'architettura del prodotto è stato un altro elemento di ostacolo: come accennato, ad oggi sono riparate principalmente scarpe formali, da sera e tutt'al più scarponi da *trekking* (su cui gli utenti tendono ad investire maggiori risorse), mentre difficilmente si effettuano restauri sulle *sneakers*. Queste spesso presentano forme della suola non standardizzate, una preferenza di incollaggi in adesivi permanenti rispetto alle cuciture e un uso di materiali meno durevoli e difficili da lavorare (tessuti poliestere, simil-pelli, schiume...) in architetture multistrato [fig. 2.15-2.16].

Figura 2.16
Rispetto alle *sneakers*, molte calzature da montagna adottano suole con sagoma ed interfaccia standardizzate, facilitando la reperibilità dei componenti per i calzalai [47-48].



Figura 2.15
Tra gli esempi di suole con forme custom integrate alla tomaia, le Nike Air Max Plus includono anche camere d'aria nell'intersuola espansa [46].

INSIGHT RILEVANTI

Il quadro che si delinea vede perciò diverse problematiche, legate all'architettura del prodotto ed al modello di consumo associato:

1
Alla manutenzione è preferita la sostituzione

La riparazione è spesso ritenuta complessa, poco accessibile e non conveniente, data la reperibilità di nuove calzature anche a prezzi estremamente ridotti.

3
Il deterioramento localizzato ancora comporta uno scarto dell'intero prodotto

L'usura si concentra generalmente in aree specifiche della scarpa, ma la natura permanente degli assemblaggi impedisce la sostituzione dei soli elementi danneggiati, compromettendo il recupero del prodotto.

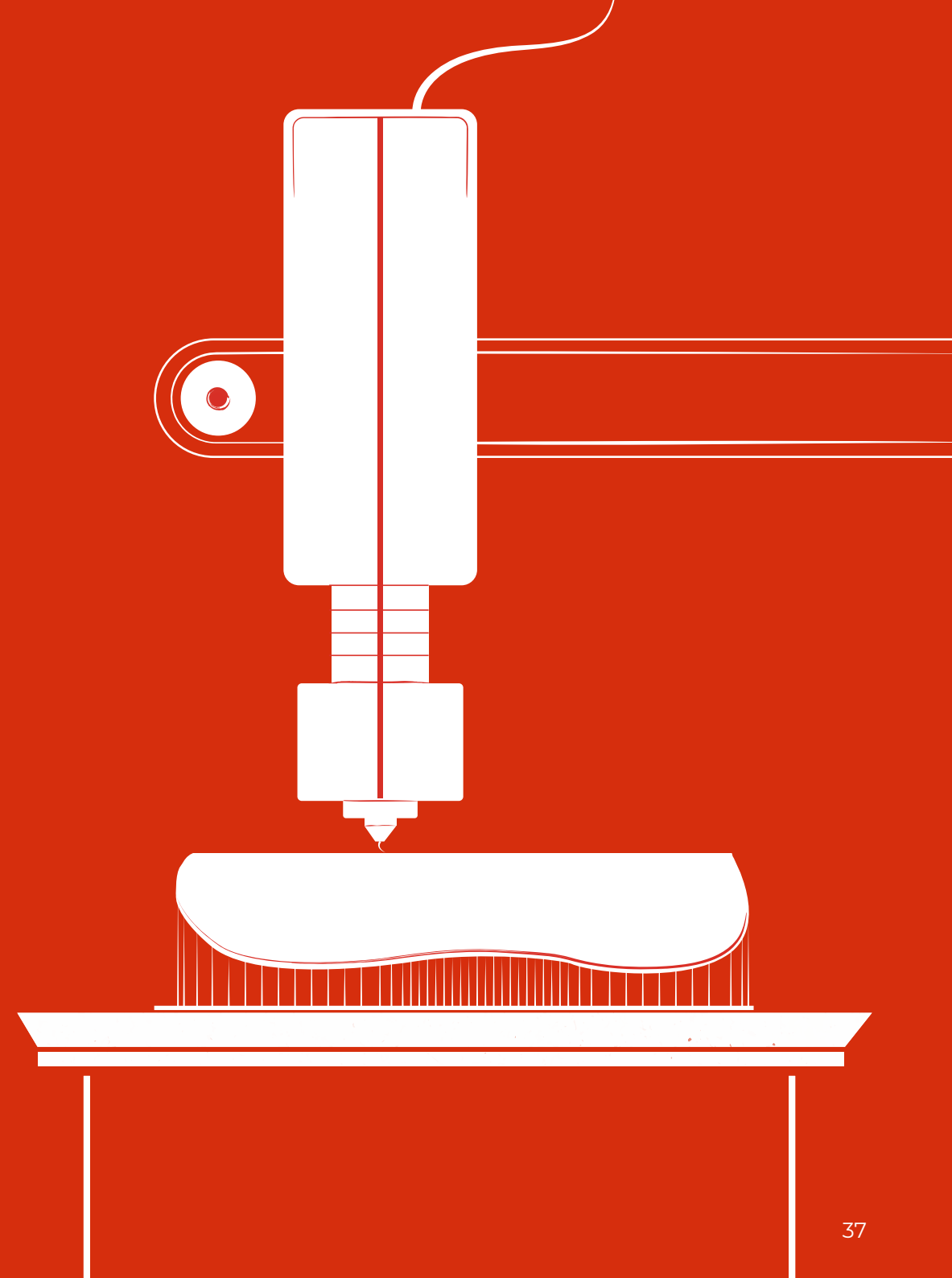
2
Si verifica un netto contrasto tra valore percepito e complessità costruttiva

Tipicamente non si ha consapevolezza della quantità e tipologia di materiali e processi coinvolti nella produzione di una scarpa; ciò rende più complesso per i produttori giustificare i prezzi determinati da metodi costruttivi più durevoli e sostenibili.

ANATOMIA DI UNA CALZATURA

Il piede umano è una struttura biomeccanica complessa, sottoposta durante la camminata a continue variazioni di carico, flessione e torsione. Di conseguenza, anche la calzatura costituisce un sistema articolato, nel quale componenti differenti devono collaborare per garantire comfort, stabilità e prestazioni adeguate.

03



3.1 Anatomia del piede



Nell'analisi successiva, il piede sarà suddiviso in tre macrosezioni, costituite da componenti rigidi (ossa) e flessibili (muscoli, tendini e legamenti) [fig 3.1, 3.2]:

- **retropiede:** deputato all'assorbimento dei carichi e dell'impatto iniziale del piede, principalmente rappresenta i costituenti dal tallone (es: calcagno e astragalo);
- **mesopiede:** include i costituenti dell'arco plantare e, insieme al retropiede, definisce il tarso. Ha funzioni di trasferimento dei carichi e di adattamento alla morfologia del suolo;
- **avampiede:** costituito da metatarsi e falangi, è la zona di maggior flessione (in particolare all'altezza delle teste metatarsali) avente funzioni di trasferimento di carichi e di spinta [49, 50].

Figura 3.1
Schematizzazione del piede umano e di una scarpa da corsa, evidenziando le tre aree funzionali [51].

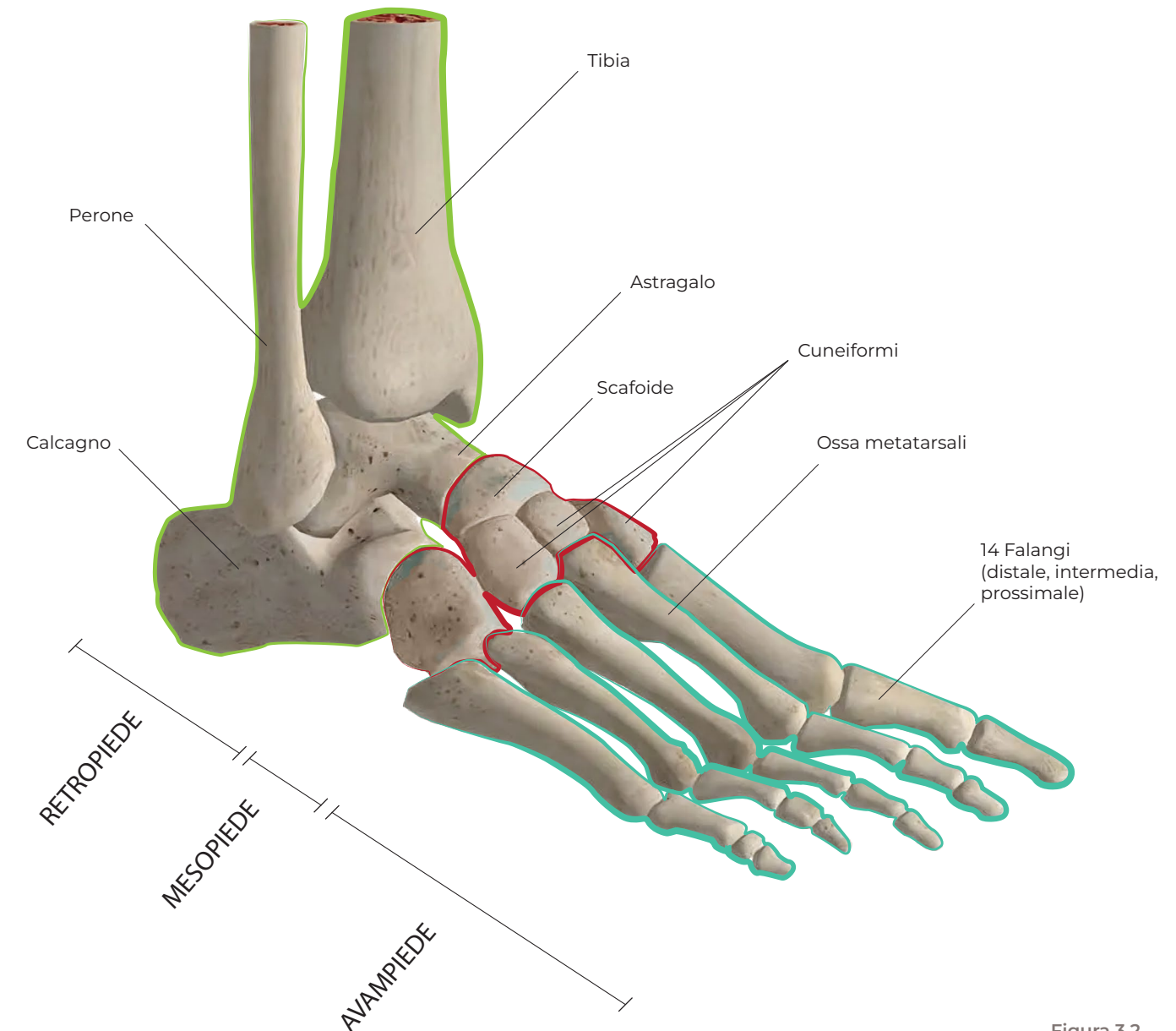


Figura 3.2
Rappresentazione del piede umano, con indicazioni delle ossa e delle sezioni prese in esame [52].

3.2 I componenti della calzatura

Per proseguire l'esplorazione del settore calzaturiero, è necessario indagare gli elementi costitutivi di un paio di scarpe [fig 3.3]. Naturalmente questi sono fortemente influenzati da fattori come la destinazione d'uso o i materiali impiegati, ma tra gli elementi comuni sono considerabili [53-55]:

TOMAIA

L'insieme strutturale, tipicamente in materiali tessili o pelle, che avvolge il piede per garantire aderenza della scarpa, contenimento e protezione superficiale.

■ **collare**: Sezione superiore della tomaia che circonda la caviglia, spesso imbottita per incrementare comfort e stabilità della calzatura;

■ **vamp**: Sezione anteriore della tomaia, in corrispondenza del dorso del piede e soggetta a flessione durante la deambulazione;

■ **quarter**: Pannelli laterali e posteriori, in funzione strutturale e di supporto del piede;

■ **occhielli (eyelet)**: Elementi forati destinati al passaggio dei lacci. Spesso sono rinforzati con anelli o boccole di metallo o plastica dura;

■ **puntale (toe cap)**: Rinforzo anteriore, posizionato sulla punta del piede. È principalmente finalizzato a mantenere la forma della punta ed a contenere le sollecitazioni esercitate dalle dita sulla tomaia. In determinati tipi di calzature (come quelle da antinfortunistica) garantisce anche la protezione dell'arto dalla caduta

di corpi pesanti; può quindi essere realizzato in alluminio, acciaio o plastiche composite rinforzate;

■ **contrafforte (counter)**: Sezione rigida posta in corrispondenza del tallone, deputata al contenimento ed alla stabilizzazione del retropiede;

■ **lingua (tongue)**: Linguetta posizionata al di sotto del sistema di chiusura della scarpa; ha la funzione di proteggere il dorso ed attenuare la pressione e l'attrito generati dai lacci;

SOLETTA

Elemento di contatto diretto con la pianta del piede. Può essere realizzato su misura per seguire al meglio il profilo dell'arto. Ha funzioni di supporto e distribuzione del carico esercitato dal corpo, evitando accumuli localizzati ed affaticamento; per questo, è realizzata in materiali adatti all'assorbimento di sollecitazioni, come schiume, gel, sughero frantumato o pelli morbide.

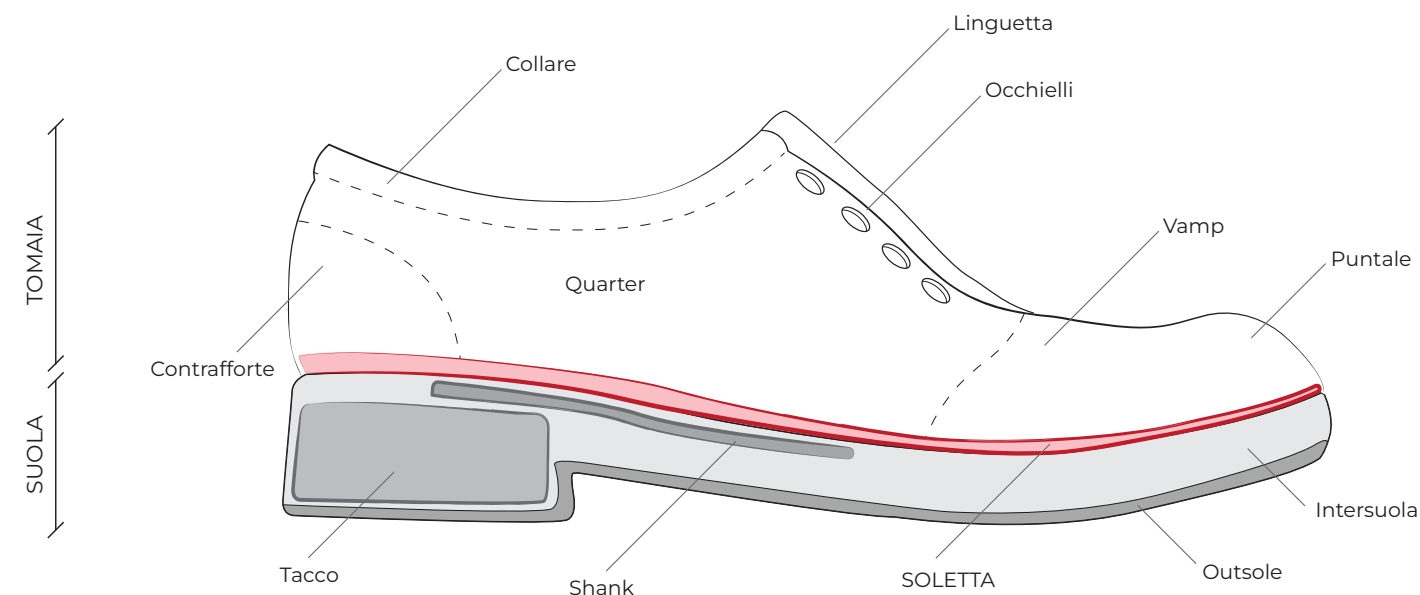


Figura 3.3
Rappresentazione schematica di una scarpa *casual*, sezione di uno stivale in cuoio [56].



SUOLA

Sistema costituito dalle componenti sottostanti la soletta, destinate alla gestione del contatto con il suolo.

■ **tacco (heel):** Sezione anteriore rialzata, volta a posizionare il piede in una condizione confortevole ed ad assorbire l'impatto iniziale del ciclo di camminata, migliorando la stabilità. Non essendo un'area soggetta a flessione, spesso è realizzata in materiali rigidi, in particolare per tacchi alti, nei quali la stabilità del retropiede è essenziale.

■ **Intersuola:** Strato intermedio di funzione ammortizzante, finalizzato alla dissipazione delle sollecitazioni meccaniche. A seconda della geometria, dello spessore e dei materiali impiegati, può restituire parte della forza esercitata dall'utente sotto forma di ritorno elastico, per supportare il piede in fase di spinta (una funzione particolarmente ricercata nelle scarpe da corsa). Ad oggi, sono impiegate principalmente schiume polimeriche o architetture multistrato.

■ **shank:** Elemento strutturale, spesso in metallo, posizionato tra suola ed intersuola, di cui segue il profilo. Ha la funzione di incrementare la rigidità torsionale e il supporto all'arco plantare, per evitare deformazioni della suola nel tempo. È presente nelle calzature che richiedono maggior stabilità formale, come scarpe con tacco, stivaletti, stivali da *trekking* o alcune scarpe classiche (*Oxford, Derby...*).

■ **outsole ("battistrada"):** Superficie esterna di contatto con il terreno, progettata per garantire aderenza e resistenza all'usura. Spesso in materiale elastomerico o cuoio, può presentare scanalature di flessione, per diminuire la rigidità del sistema, o tassellature volte ad aumentare il grip anche su terreni lisci o scivolosi.

ALTRI ELEMENTI

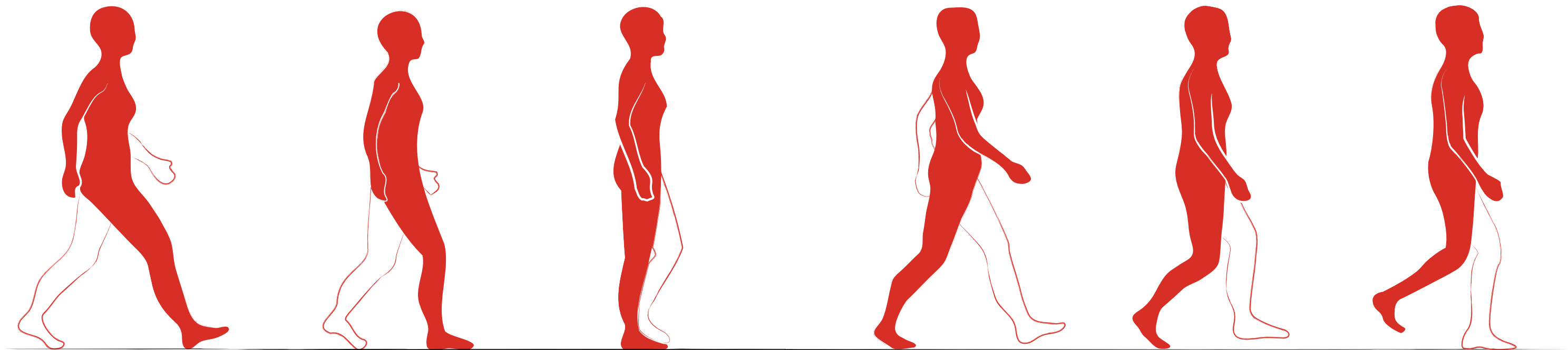
Infine, due elementi da tenere in considerazione per la progettazione di una calzatura sono:

■ **ROCKER**
Identifica la curvatura longitudinale della suola nelle zone del retropiede e dell'avampiede. La sua configurazione può migliorare il processo di rullata durante il passo, accompagnandolo, rendendolo più efficiente e diminuendo la flessione dell'articolazione [57].

■ **DROP**
Indica la differenza di altezza tra tallone e punta del piede, espressa in millimetri. Questa grandezza è fortemente considerata nella progettazione di scarpe da *trekking* o da corsa, data la sua influenza nella biomeccanica del passo: valori elevati (10-12 mm) definiscono un maggiore appoggio sul tallone, mentre valori ridotti (1-5 mm) generano un appoggio più simile a quello naturale. Nelle scarpe *barefoot*, ad esempio, si predilige un *drop* nullo, per non fornire alcun tipo di supporto al piede [fig. 3.4] [58].



Figura 3.4
Identificazione del *rocker* e di due valori di *drop* (rispettivamente nullo e molto elevato) su tre calzature [59,60].



3.3 Analisi della camminata

Rimane poi necessario analizzare il ciclo di camminata di un utente per comprendere le forze coinvolte nel movimento del piede. Questo può essere suddiviso in sei fasi [fig. 3.5] [61-66]:

Figura 3.5
Rappresentazione delle sei fasi
del ciclo di camminata

1) contatto del piede (*heel strike*)

Momento di contatto del tallone con il suolo, con inizio della pronazione per assorbire lo *shock*. In risposta all'impatto, viene percepita un'elevata forza di reazione vincolare da parte del suolo, perciò la scarpa deve garantire sufficienti ammortizzamento e stabilizzazione, in particolare nell'area postero-laterale del tallone.

2) carico iniziale (*loading response*)

Fase di avanzamento della gamba, nella quale il peso corporeo inizia ad essere trasferito sul piede appoggiato. La concentrazione della pressione avviene tra il tallone ed il mesopiede, con un incremento anche all'altezza dei metatarsi. Si verificano una flessione dell'arco plantare ed una pronazione controllata.

3) appoggio intermedio (*midstance*)

Momento di massimo trasferimento del peso corporeo sul piede in avanzamento, che determina un appoggio su tutta la pianta, in particolare su mesopiede ed in corrispondenza dei metatarsi. In questa fase è critico il contenimento di potenziali forze torsionali che si potrebbero generare.

4) fase di spinta (*terminal stance*)

Avanzamento del corpo oltre il piede in appoggio, con uno spostamento del carico all'altezza dell'avampiede e delle teste metatarsali, dei quali si verifica una dorsoflessione. In questo momento si osserva un accumulo di energia elastica, restituita come spinta da parte del piede.

5) momento di distacco (*toe off*)

Concentrazione della pressione sull'alluce e nell'area mediale dell'avampiede, in vista del distacco del piede dal suolo.

6) fase di oscillazione (*swing phase*)

Il piede si è sollevato da terra, dunque non subisce concentrazioni di sollecitazione e compie una leggera dorsoflessione per evitare il contatto con il suolo. Gli sforzi sono esercitati dal resto dell'arto inferiore.

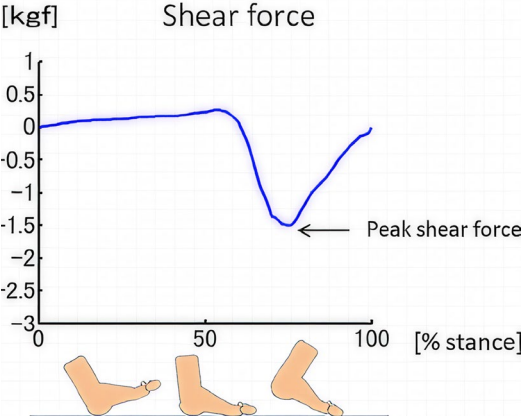
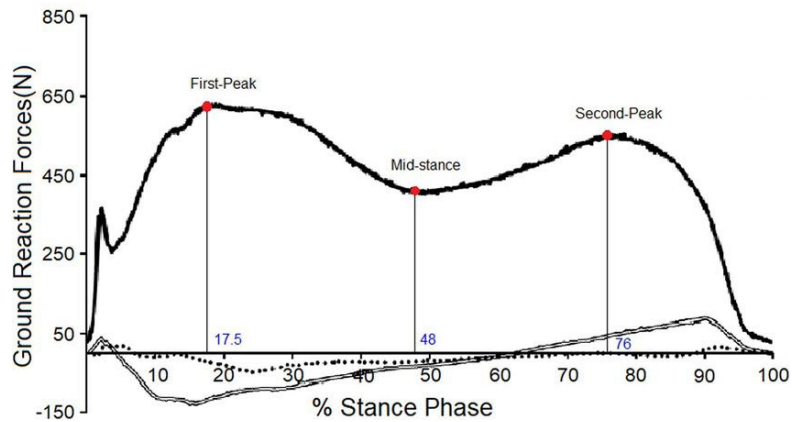
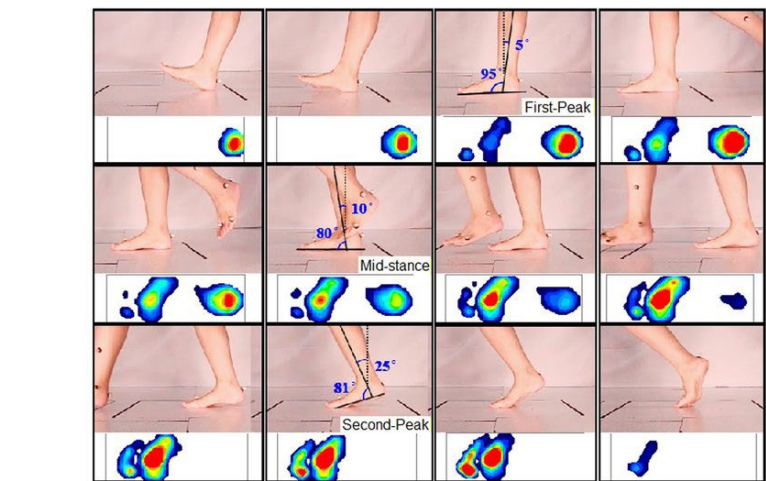
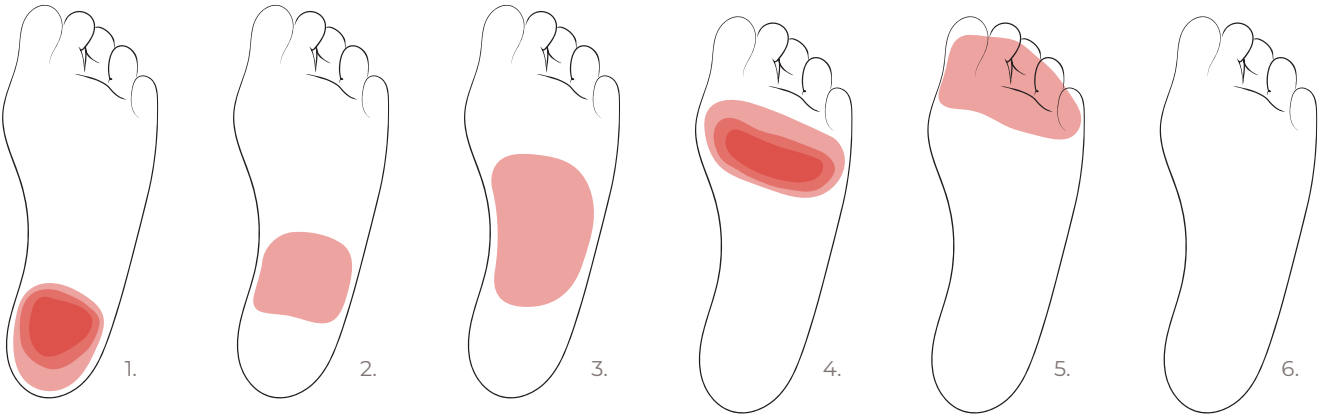


Figura 3.6
Rappresentazione delle aree di maggior concentrazione di pressione sul piede durante il passo;

Misurazione delle reazioni vincolari del suolo durante il ciclo di camminata [67];

Misurazione delle forze di taglio agenti sulla pianta del piede (in chilogrammi-forza) nel ciclo di camminata [68].

LE FORZE AGENTI SULLA SCARPA

a) forza peso e forze di reazione vincolare

La suola deve fornire sufficiente ammortizzamento per non affaticare le aree di accumulo della pressione. Queste forze si esplicano nelle fasi di appoggio in forza di impatto nell'area tarsale e del tallone e, nel resto del ciclo di camminata, sotto forma di pressione plantare [fig. 3.6].

A causa di piccoli movimenti torsionali e delle abitudini del piede, il carico non è necessariamente esercitato simmetricamente sulla suola, ma si possono verificare concentrazioni laterali. Inoltre, in particolare nelle scarpe da *running*, la suola può rendere il passo più efficiente, aumentando il ritorno elastico della forza esercitata dal corpo sotto forma di spinta [fig. 3.7].

b) forze di taglio interne ed esterne

In particolare nelle fasi di contatto del piede (1) e spinta (4) si può verificare uno scorrimento del piede all'interno della scarpa, inficiando sulla stabilità ed efficienza del passo e sul posizionamento di possibili componenti interni. Il corretto *fitting* della scarpa serve a minimizzare questi fenomeni.

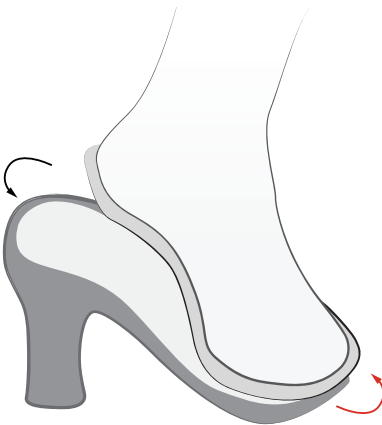
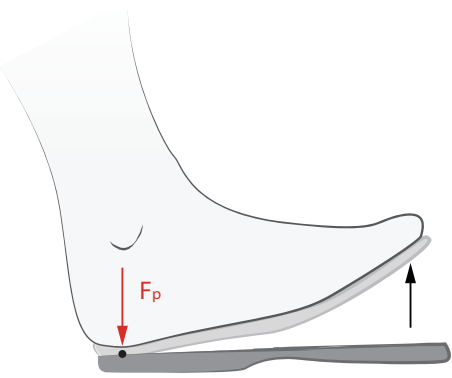
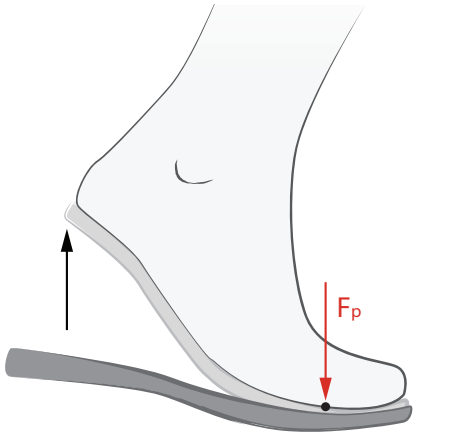


Figura 3.7
La concentrazione della forza peso in corrispondenza del tallone o della punta del piede può generare una coppia di forze che tende a separare il plantare dal resto della scarpa. Allo stesso modo, anche movimenti rotazionali su calzature con tacco alto possono mettere alla prova il collegamento tra i componenti.

c) forze di contenimento (locking forces)

Rientrano in questa categoria le forze di resistenza a strappo, compressione e trazione esercitate dalla tomaia per mantenere il piede nella corretta posizione, stabilizzando le fasi dinamiche ed impedendo disallineamenti rispetto alla suola. Queste sono influenzate dalla natura dei materiali impiegati, dalla presenza di rinforzi, dalla geometria stessa e dalla qualità di cuciture ed incollaggi.

d) forze di flessione del piede

Specialmente nelle fasi dinamiche (2 e 4), la scarpa deve assecondare i movimenti di dorsoflessione esercitati dal piede, primariamente all'altezza delle teste metatarsali e, secondariamente, nel mesopiede. Questi determinano una flessione di tutto il sistema, scaricando le sollecitazioni generate soprattutto sulla suola e sull'intersuola.

Ciò comporta l'impiego di geometrie e materiali adatti ad un elevato numero di cicli di *bending*, per realizzare componenti in grado di mantenere la propria memoria di forma; spesso si impiegano schiume espanse che, in fase di flessione, possono "collassare" localmente comprimendo temporaneamente le proprie celle.

e) forze torsionali

Oltre alle forze in direzione trasversale e longitudinale, durante un ciclo di camminata il piede compie anche piccoli movimenti rotativi, che generano forze torsionali: queste, a seconda del punto di applicazione, possono generare momenti più o meno elevati in base ai bracci presi in esame e inficiare sulla stabilità del passo.

Le principali sono:

-pronazione: una rotazione verso l'interno attorno al tallone, che si verifica in fase di appoggio;

-supinazione: una rotazione verso l'esterno attorno all'avampiede, generata in fase di spinta. Questa è evidente nelle scarpe con tacco alto, dato il profilo della scarpa, che porta a maggior concentrazione del peso in avanti [fig. 3.8] [68].

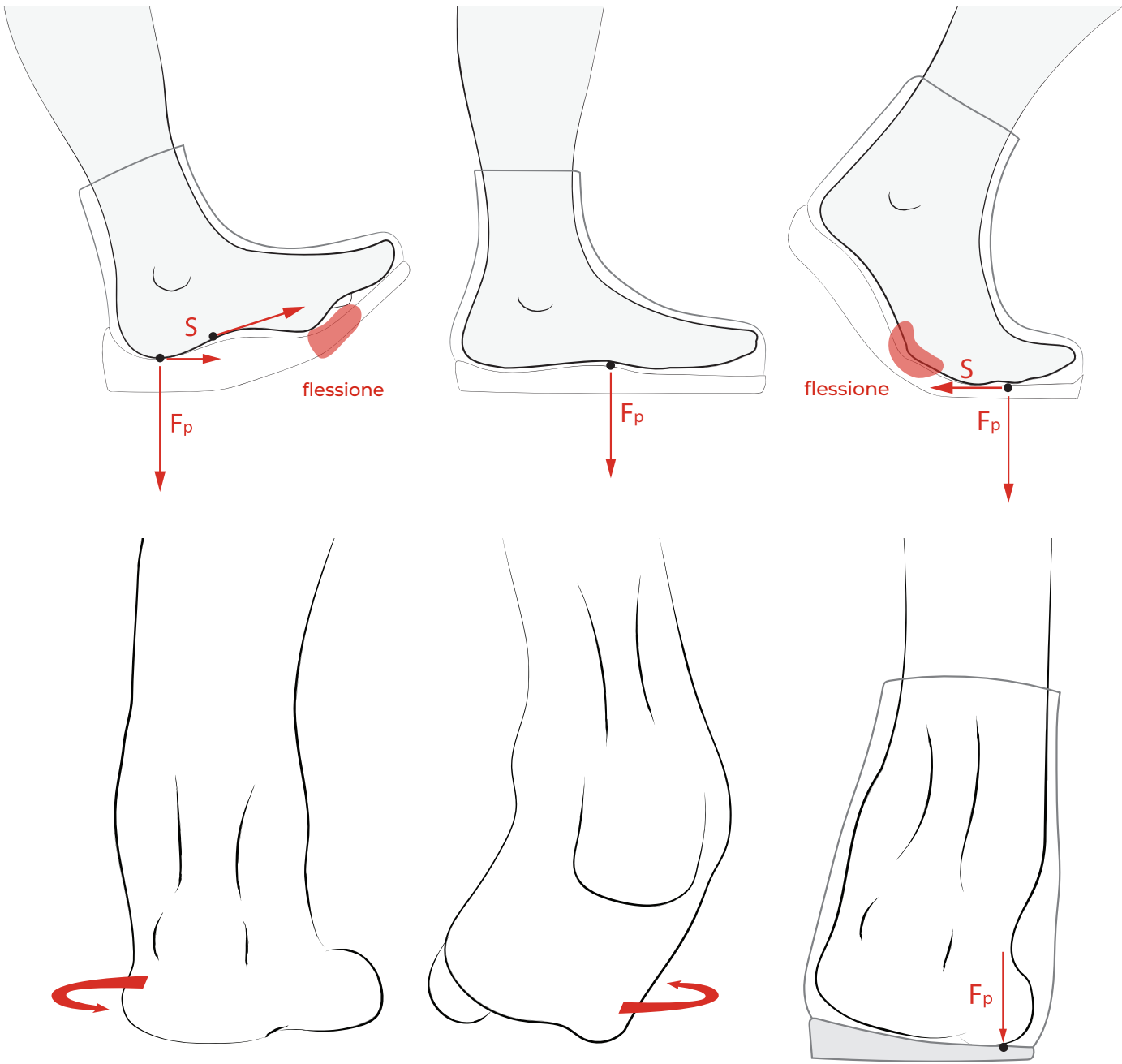


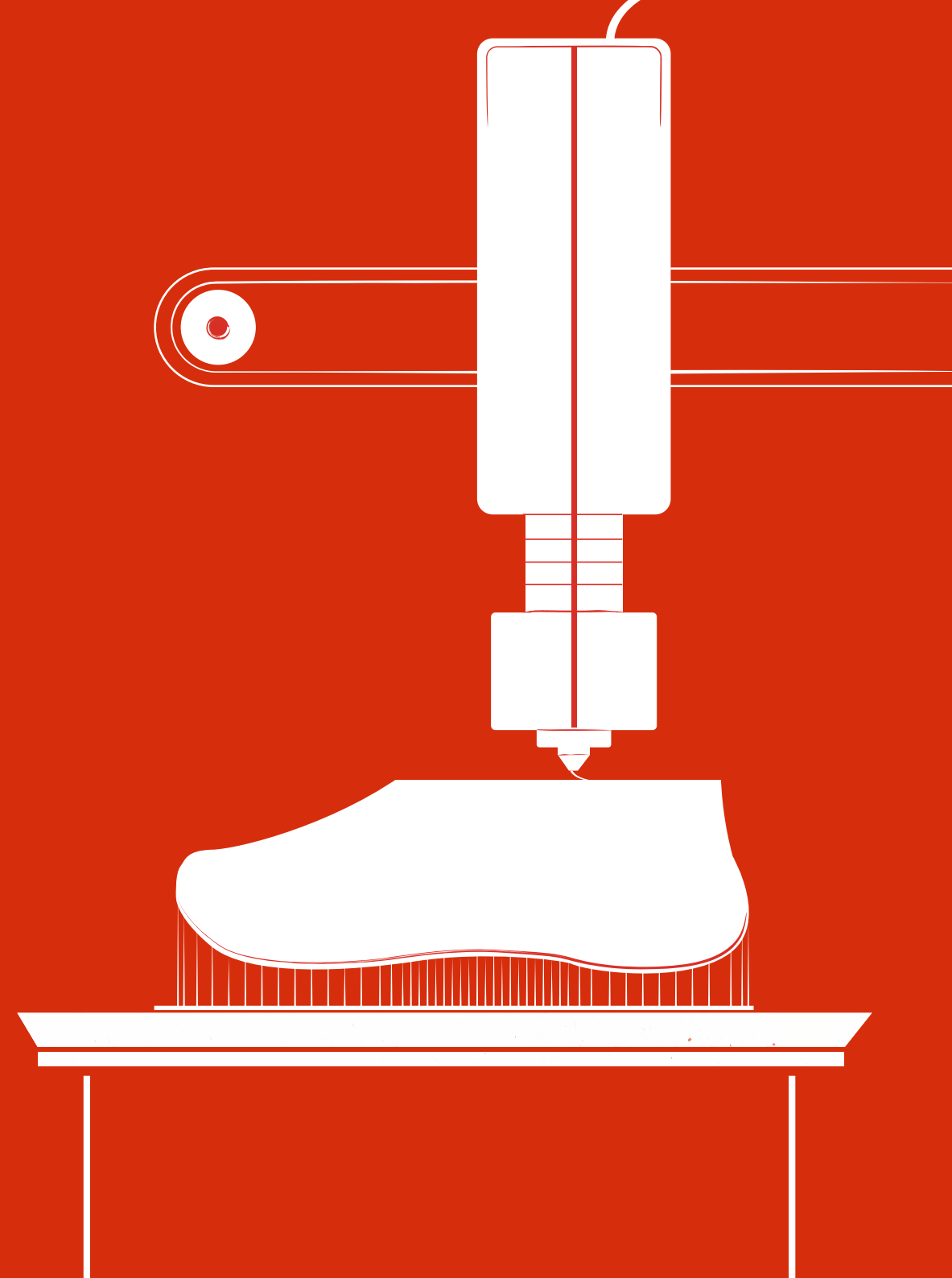
Figura 3.8
Nel ciclo di camminata , le varie posizioni del piede determinano una diversa distribuzione della forza peso (F_p), delle forze di taglio (S) e generano flessioni della calzatura.

Rappresentazione del processo di pronazione, di supinazione e dell'applicazione di un carico asimmetrico da parte dell'utente

LA FABBRICAZIONE ADDITIVA DI SCARPE

Negli ultimi anni, la diffusione su larga scala di resine, polveri e filamenti flessibili ha esteso progressivamente i campi applicativi dell'*additive manufacturing* nel settore calzaturiero, passando dalla prototipazione sperimentale a utilizzi sempre più strutturati in ambito produttivo e commerciale. Più che essere finalizzati all'imitazione delle scarpe tradizionali, gli impieghi mirano a valorizzare le caratteristiche peculiari di queste tecnologie, aprendo nuove possibilità che generino vantaggi funzionali, produttivi, ambientali o espressivi.

04

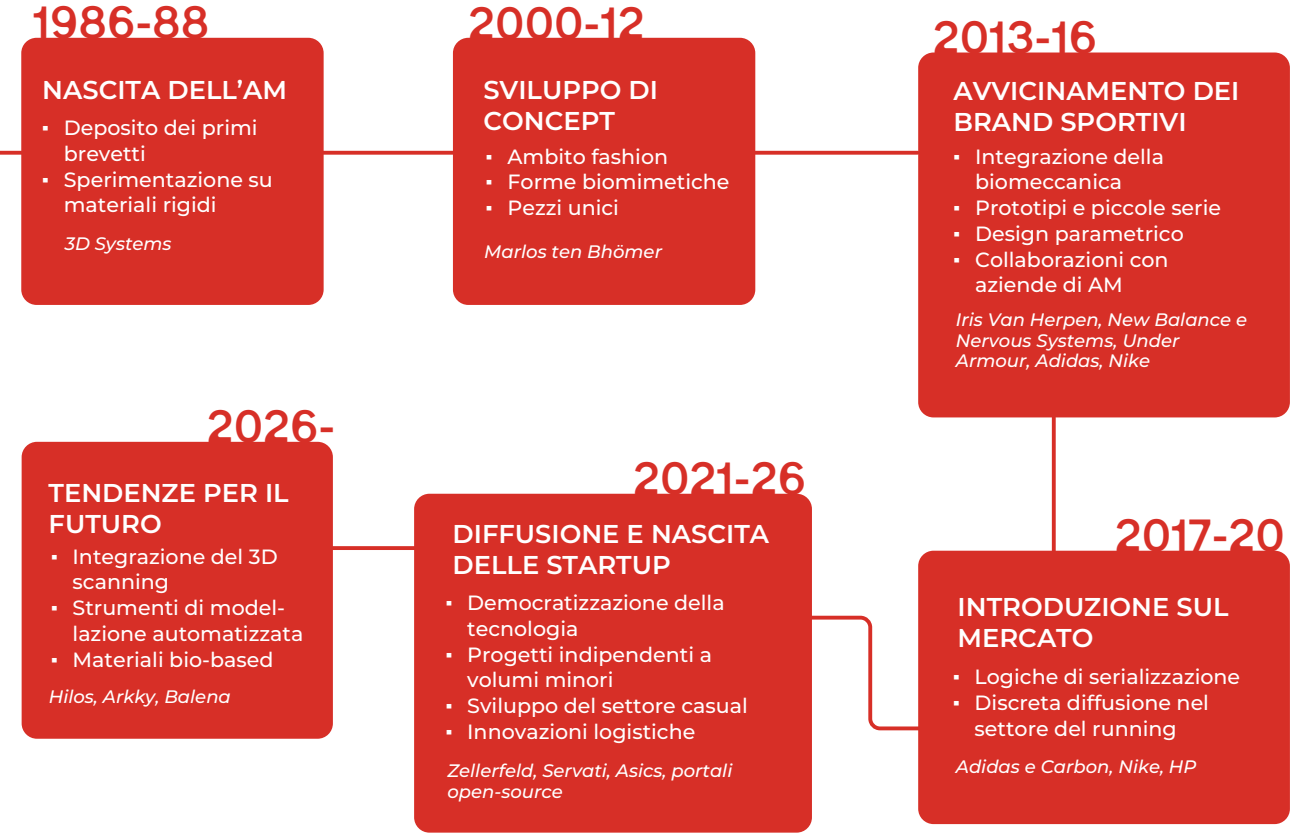


4.1 Storia dell'AM nel footwear

Data la diffusione che il *rapid prototyping* e l'*additive manufacturing* hanno subito nel corso dell'ultimo decennio sia in ambito progettuale che nella letteratura scientifica, all'interno della tesi sarà omessa l'illustrazione di queste tecnologie in termini generali, concentrandosi invece sulla loro applicazione e sui risvolti nel settore calzaturiero.

È possibile suddividere la storia dell'AM nel footwear in cinque fasi [fig. 4.1], caratterizzate diversi livelli di maturità tecnologica e gradi di integrazione in logiche produttive di tipo seriale:

Figura 4.1
Panoramica sulla storia della fabbricazione additiva applicata alla produzione di calzature.



1986-88

Figura 4.2
La prima macchina SLA, sviluppata da Chuck Hull e commercializzata dal 1986 con l'azienda 3D Systems [75].

NASCITA DELL'AM

La nascita della stampa 3D è datata agli anni Ottanta, con la commercializzazione della stereolitografia da parte di Charles 'Chuck' Hull (1986) [fig. 4.2]. Due anni più tardi, Scott Crump brevettò per Stratasys la *Fused Deposition Modelling* (FDM), la tecnologia più diffusa nei contesti di auto-produzione e DIY; sempre nel 1988 Carl Deckard, studente alla University of Texas, sviluppò la *Selective Laser Sintering* (SLS) [70,71].

In questa fase, la tecnologia permette l'uso di polimeri rigidi, rispettivamente resine fotopolimerizzanti per SLA e termoplastici per la FDM. L'introduzione di materiali flessibili, in particolare degli elastomeri termoplastici (TPE), avverrà a metà degli anni duemila, con una diffusione più ampia raggiunta solamente intorno al 2014 (benché le catene polimeriche di questo tipo di materiali fossero sintetizzate sin dalla fine degli anni '50, con utilizzi in processi produttivi tradizionali) [72,74].



2000-2012

Figura 4.3

Nel 2010 Marlos ten Bhömer presenta un paio di scarpe stampate in 3D con componenti sostituibili per la mostra *Mechanical Couture - Fashioning a New Order* [76].

LO SVILUPPO DI CONCEPT

In questa fase, la stampa 3D viene adottata per lo sviluppo di *concept* delle calzature, apprezzandone, come in altri settori, la libertà formale ottenibile e la rapidità del processo. I pionieri di questo approccio si ritrovano principalmente in realtà artistiche, di alta moda in accademie di *fashion design* o in ambito strettamente accademico.

Vengono realizzati concept fortemente espressivi ma non pensati per una replicabilità in serie, quanto piuttosto per validare modelli difficilmente ottenibili con tecniche tradizionali; queste ultime sono però ancora deputate per la realizzazione dei prodotti finali.

Gli unici casi in cui la stampa 3D è applicata per la realizzazione del prodotto finale si hanno per scarpe da utilizzare nelle sfilate, nelle quali è necessaria l'ottimale aderenza al profilo del piede dei modelli. Si tratta principalmente di scarpe con tacco alto in materiali rigidi, come l'ABS [77] [fig. 4.3].



Figura 4.5

La collaborazione tra New Balance e Nervous Systems per la stampa di intersuole *lattice*, 2015 [79].

2013-2016

Figura 4.4

Un paio di scarpe con tacco realizzate da Iris Van Herpen e Rem Koohlas per una sfilata, ispirate dalle radici di un albero, 2013 [78].



AVVICINAMENTO DEI GRANDI BRAND SPORTIVI

Con l'aumento della ricerca inerente ai filamenti flessibili, insieme a nuove possibilità di progettazione spaziale parametrica che rende possibile la modellazione di strutture *lattice* e reticolari complesse e meccanicamente efficienti, questi anni vedono l'avvicinamento delle grandi aziende sportive, in particolare del *running*, all'uso della stampa 3D per le calzature.

Inizialmente sono sviluppati singoli componenti, specialmente con tecnologie che impiegano resine fotopolimerizzate e polveri (SLA, SLS, Multijet e simili); in particolare, si hanno le prime sperimentazioni con la prototipazione di intersuole dall'elevato ritorno elastico, capaci di fornire una buona quantità dell'energia esercitata dal piede dell'atleta sotto forma di spinta per la propulsione.

Nel 2013 Nike lancia la scarpa da calcio Vapor Laser Talon, la cui piastra dei tacchetti in SLS consente una considerevole diminuzione del peso (la scarpa raggiunge i 159 g) [80].

Nel 2014 Reebok, New Balance ed Under Armour entrano in questo settore, spesso coinvolgendo studi di design specializzati [fig. 4.5].

Benché contemporaneamente continuino le sperimentazioni di tipo espressivo ed artistico [fig. 4.4], è questo il momento in cui sul mercato accresce la consapevolezza che l'uso della stampa 3D possa apportare vantaggi in termini di *performance*, oltre che una grande libertà estetica, realizzando componenti le cui funzionalità non sarebbero ottenibili tramite processi produttivi tradizionali.

INTRODUZIONE SUL MERCATO

Una fase successiva vede il passaggio, da parte delle maggiori aziende sportive, da uno stadio prototipale o di piccole serie dimostrative all'integrazione in logiche di produzione seriale su larga scala.

Adidas è il principale *stakeholder* a guidare questo sviluppo, collaborando con diverse realtà produttive della Silicon Valley, tra cui Carbon; questo tipo di interazione porta al perfezionamento di processi di AM adatti ad alti volumi, introducendo nuovi materiali e tecnologie, tra cui *Digital light synthesis* (DLS), adatta a strutture *lattice* complesse producibili in tempi relativamente rapidi.

Il 2017 è segnato dal rilascio della collezione Futurecraft, che includeva intersuole stampate in 3D caratterizzate da diversi gradi di morbidezza e *cushioning* nelle varie zone del piede. L'anno seguente la serie arriverà a 100.000 unità prodotte [fig. 4.6].

Poco dopo, altre aziende intraprenderanno esperienze simili, come Nike con Zoom Vaporfly Elite Flyprint, New Balance o Under Armour, contribuendo al passaggio di questa tecnologia da una *black technology* ad un prodotto che si avvale di una nicchia nel mercato, in particolare tra le scarpe sportive ad alte performance.

2017-2020



Figura 4.6
La tecnologia di stampa DLS, brevettata da Carbon ed utilizzata in collaborazione con Adidas, per la linea Futurecraft [81,82].



Figura 4.7
Le calzature sviluppate da Zellerfeld in collaborazione con Louis Vuitton e Hugo Boss [83-84].



DIFFUSIONE E NASCITA DELLE STARTUP

Gli ultimi 5 anni sono caratterizzati dalla diffusione di decine di *startup* che, avvantaggiate dagli investimenti iniziali minori rispetto a linee produttive tradizionali, propongono i loro modelli di calzature interamente o parzialmente prodotte in AM, aprendosi anche nel contesto casual, formale, sportivo, biomedicale ecc...

Tra le varie, Zellerfeld risulta una delle più interessanti: nata ad Amburgo nel 2019 [74], l'azienda produce scarpe monomateriche utilizzando macchine FDM e un filamento proprietario (ZellerFoam, a base di TPU) [fig. 4.8].

2021-2026



Figura 4.8
La progettazione di una macchina di stampa specializzata nelle scarpe ha consentito uno *scale up* di produzione seriale, incrementando l'efficienza generale [85].

Il modello di *business* prevede una produzione interamente *on-demand* che include, per l'utente, la possibilità di scansionare i propri piedi con un'app su *smartphone*, ridimensionando la scarpa sulla base delle sue misure.

Si tratta di una logica che permette di limitare i costi dell'inventario e lo spreco di unità invendute tipici del settore tradizionale. Inoltre, l'azienda fa da vetrina e produttore di modelli progettati da terzi (designer indipendenti o aziende affermate, tra cui Rains e Louis Vuitton) [fig. 4.7].

2026-

TENDENZE PER IL FUTURO

Gli sviluppi futuri più significativi per il settore afferiscono alle sfere della personalizzabilità su larga scala, dell'ottimizzazione prestazionale e della sostenibilità ambientale.

Per il primo aspetto, lo sviluppo si concentra sulla generazione di un ecosistema integrato per il prodotto, abituando l'utente ad usare tecnologie di *3D scanning* tramite smartphone in fase di acquisto. Parallelamente, l'impiego della progettazione parametrica e algoritmica consente di modificare rapidamente geometrie, vestibilità e proprietà meccaniche del prodotto, rendendo compatibile un elevato grado di customizzazione con logiche produttive seriali [fig. 4.9].

Sul piano prestazionale, lo sviluppo di nuovi materiali flessibili mira a conferire alle calzature in AM qualità sempre più comparabili a quelle delle scarpe convenzionali, oltre che ad espandere le espressività ottenibili da forme prettamente sportive, organiche e futuristiche ad archetipi più classici e trasversali.

Inoltre, lo sviluppo di macchinari progettati ed ottimizzati specificamente per la produzione di calzature in polimeri flessibili (anche con tecnologie proprietarie delle singole aziende) renderà sensibilmente più efficienti i processi di realizzazione. Infine, una parte consistente della ricerca è rivolta all'introduzione di materiali *bio-based*, riciclabili o compostabili, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dai polimeri di origine fossile e migliorare il bilancio ambientale complessivo del prodotto [fig. 4.10].



Figura 4.9
L'azienda americana ARKKY sta sperimentando con l'integrazione di algoritmi di AI finalizzati a generare una suola *lattice* ottimizzata sui dati biomeccanici del singolo utente, automatizzando il processo ed efficientando la produzione [86].



Figura 4.10
Tra i materiali più interessanti sul mercato, il filamento flessibile Bio-CirFlex dell'azienda israeliana Bale-na è biodegradabile e deriva da fonti rinnovabili come semi di ricino, oli naturali e polisaccaridi [87].

4.2 Diffusione nel mercato

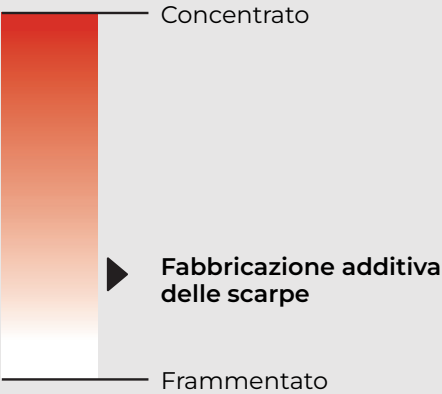
Solo negli ultimi 2-3 anni sono stati prodotti report che forniscono insight di natura economica inerenti alle calzature stampate in 3D [fig. 4.11].

Ad oggi il segmento non atletico costituisce circa il 78% del mercato, che presenta una dimensione complessiva di 1.6 miliardi di \$ (rispetto ai 438.622 miliardi di dollari dell'intero settore, con ricavi che costituiscono circa lo 0.3% dei profitti totali). A differenziare questa nicchia dal settore calzaturiero tradizionale è un tasso di crescita stimato significativamente più elevato, con un CAGR 2024-30 del 18.1% (rispetto al 5.52% dell'industria calzaturiera globale).

Il mercato più profittevole è quello statunitense, mentre l'area Asia-Pacifico (principalmente Cina, Giappone, Corea del Sud) si distingue in termini di velocità di crescita [88-90].

Figura 4.11
Il mercato delle calzature stampate in 3D risulta in crescita, con una percentuale maggiore relativa alla produzione di scarpe casual, nello specifico in taglie femminili.

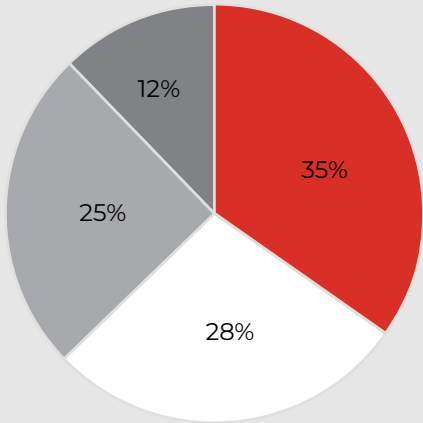
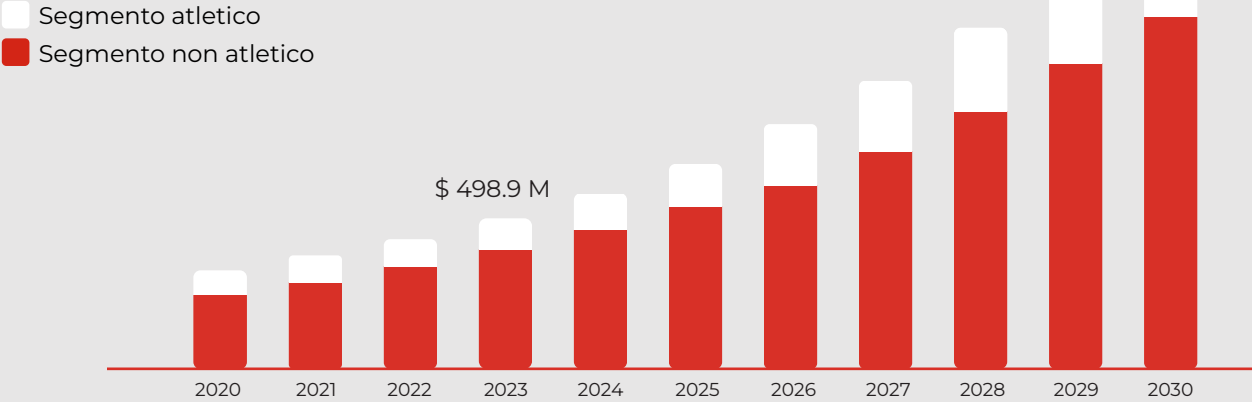
CONCENTRAZIONE DEL MERCATO



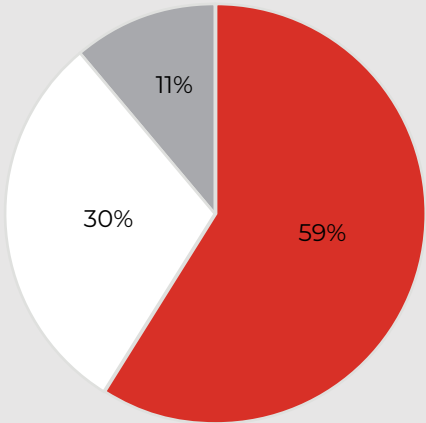
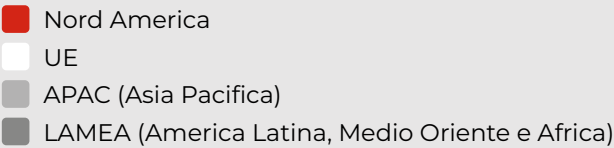
CAGR 2024-30: 18.1%.

SEGMENTO NON ATLETICO: 78% del mercato

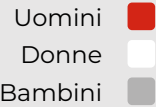
MERCATO STATUNITENSE DELLE CALZATURE IN AM (2020-2030)



DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DEL MERCATO



TARGET DI DESTINAZIONE



4.3 Vantaggi e limiti

Al pari di ogni processo produttivo, l'AM presenta determinate specificità, vantaggi e vincoli. Tra i vari si possono considerare [tab. 4.12] [90,5]:

Tabella 4.12
Sintesi dei vantaggi e dei limiti della fabbricazione additiva applicata al footwear.

VANTAGGI	LIMITI
• IMPATTO AMBIENTALE: efficienza materica, uso di materiali <i>bio-based</i> e biodegradabili, produzione decentralizzata, componenti monomaterici; • PERSONALIZZABILITÀ: design parametrico <i>taylor-made</i>, flessibilità produttiva; • LIBERTÀ FORMALE: strutture <i>lattice</i>, geometrie complesse, sottosquadri... • LAVABILITÀ: lavaggio in lavatrice; • INVESTIMENTO INIZIALE: varietà delle fasce di prezzo, scalabilità progressiva, versatilità dei macchinari;	• VARIETÀ DI MATERIALI: limitazione principalmente a termopoliuretani; • LIMITI PRODUTTIVI: tempi di ciclo maggiori, volumi di stampa limitati; • LIMITI ESPRESSIVI: prodotti elastomerici, spesso monocolori; • LIMITI FUNZIONALI: <i>grip</i> sul suolo, peso, proprietà meccaniche;

VANTAGGI

■ IMPATTO AMBIENTALE

Efficienza materica

In comparazione con i metodi di produzione sottrattiva tradizionali, l'AM permette una significativa riduzione dello spreco di materiale, prettamente limitato ai supporti ed a possibili fallimenti di stampa.

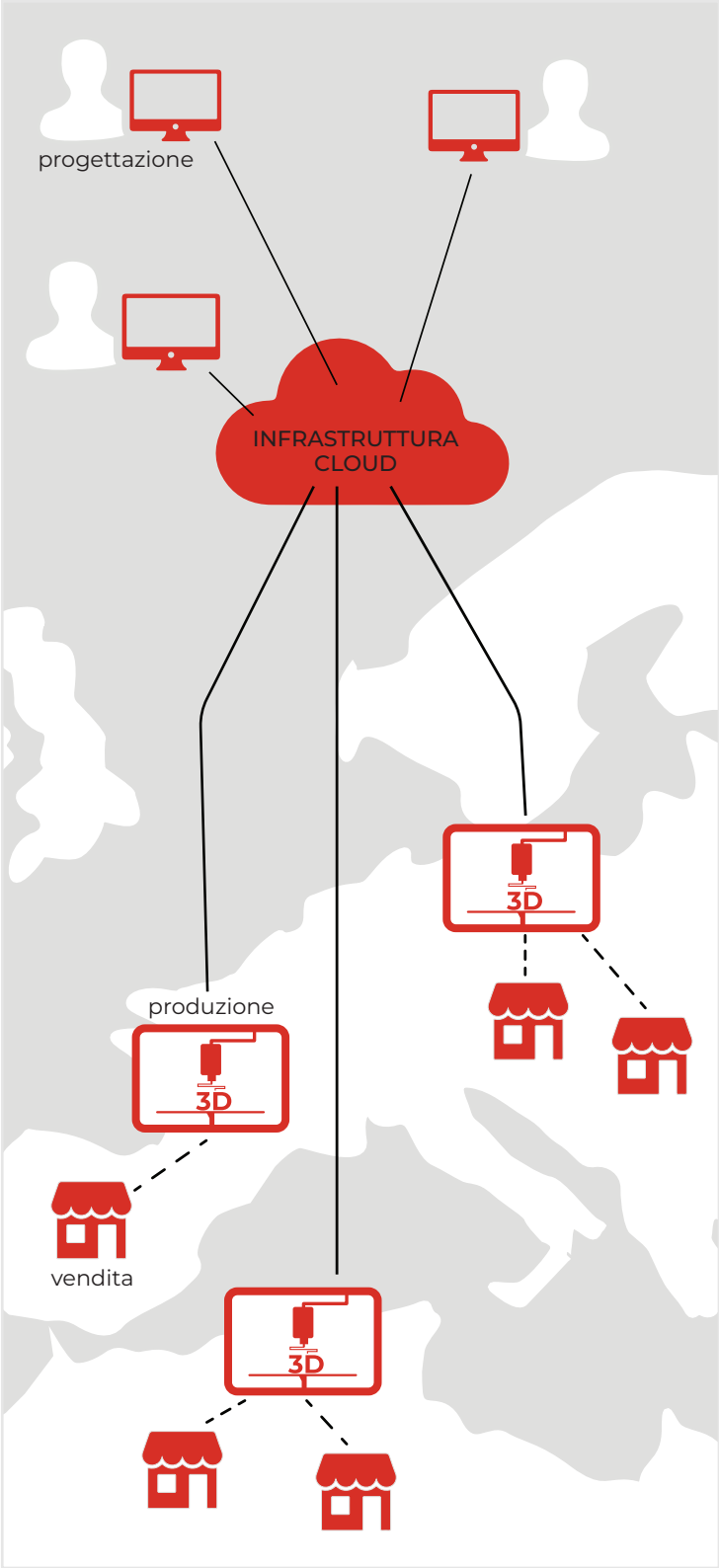
Innovazione nei materiali

Il mercato dei filamenti flessibili per la stampa FDM è ricco di progetti innovativi che includono materiali biodegradabili, biocompatibili o di origine vegetale. In generale, la stragrande maggioranza dei filamenti impiegati sono di natura termoplastica, dunque presentano proprietà di riciclo maggiori rispetto a materiali tradizionali come la gomma vulcanizzata o il poliuretano.

Vantaggi logistici

La flessibilità di produzione consente di limitare il numero di prodotti in magazzino e abilita una produzione de-centralizzata, in cui più centri possono realizzare componenti senza dipendere da un unico *hub* produttivo. Ciò permette un taglio dei costi e degli impatti legati al trasporto dei componenti o dei prodotti finiti [fig. 4.13].

Figura 4.13
Le tecnologie di AM permettono una produzione decentralizzata (*reshoring*), generando vantaggi in termini di scorta e di volumi di merce da trasportare.



Produzione monomaterica

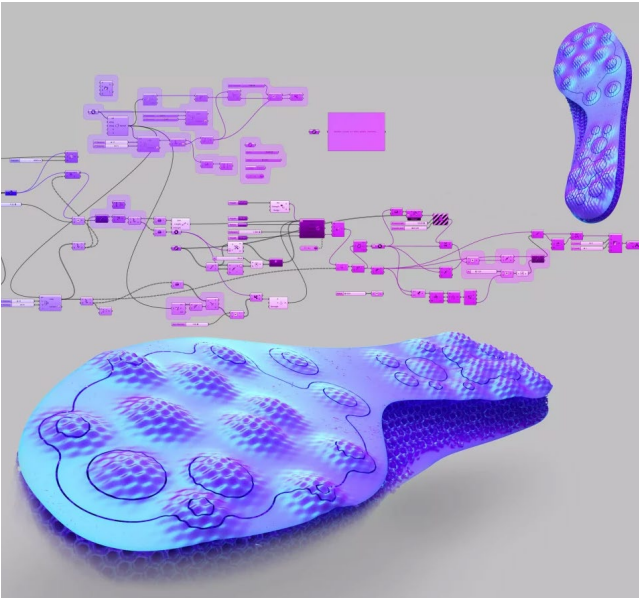
Come verrà affrontato successivamente (vd. cap 4.6), la libertà formale consentita dalle tecnologie di AM permette la variazione, all'interno dello stesso componente, delle proprietà meccaniche in diverse sue regioni. È possibile, ad esempio, produrre una suola con maggiore rigidezza nell'area del retro piede, definendo un tacco stabile pur garantendo flessibilità e peso minore sul resto del piede. Questa caratteristica è abilitata soprattutto dalla modellazione spaziale di *infill* con celle di densità, dimensioni e spessori variabili. Come comprovato da decine delle aziende presenti sul mercato, questa strategia consente di ottenere prestazioni differenziate senza ricorrere all'assemblaggio di materiali diversi.

■ **PERSONALIZZABILITÀ**

L'AM risulta una tecnologia libera dai vincoli determinati dalla produzione tradizionale, come la necessità di stampi *ad hoc* per ogni modello e dimensione di scarpa; questo aspetto, unito al fatto che spesso le calzature si basano su processi di modellazione spaziale parametrica (in cui quindi variazioni geometriche del componente risultano agevoli e rapide), rende l'AM una tecnologia adatta ad alta personalizzazione da parte dell'utente. Come accennato precedentemente, in questo approccio rientra il dimensionamento sulla base di scansioni del piede dell'utenza, la scalabilità del modello anche in taglie "non standard" [fig. 4.14]. Oltre a ciò, modifiche progettuali a seguito del rilevamento di difetti o criticità risultano molto più rapide e meno onerose dal punto di vista commerciale.



Figura 4.14
Il connubio tra modellazione parametrica e tecnologie di AM consente *design data-driven*, definendo ogni componente sulla base delle caratteristiche di peso, postura e conformazione anatomica del singolo utente [91-92].



■ **LIBERTÀ FORMALE**

Una delle principali caratteristiche dell'*additive manufacturing* è la possibilità di realizzare geometrie complesse non ottenibili tramite processi produttivi convenzionali. In ambito *footwear*, ciò si traduce, da una parte, nella progettazione di strutture reticolari (*lattice*) e superfici articolate che possono fornire al prodotto proprietà uniche e, dall'altra, in approcci all'espressività della scarpa molto liberi. Spesso, infatti, si riscontrano forme organiche curvate in più direzioni, la presenza di numerosi sottosquadri, superfici a sbalzo o elementi già interconnessi in fase di produzione, difficilmente ottenibili tramite tecnologie tradizionali [fig. 4.15].

■ **LAVABILITÀ**

La natura monomaterica e la continuità superficiale dei componenti prodotti tramite AM possono favorire la lavabilità del prodotto, semplificando le operazioni di pulizia rispetto a calzature tradizionali composte da più materiali e giunzioni, permettendo anche l'uso della lavatrice anziché un lavaggio manuale.

■ **INVESTIMENTO INIZIALE**

Rispetto ad altre categorie merceologiche, la linea produttiva di una calzatura tradizionale richiede processi che coinvolgono un numero elevato di materiali e tecnologie produttive, comportando un investimento iniziale significativo per un'impresa che vuole immettersi sul mercato. Stime definiscono un *range* ampio, compreso tra 50.000 e 2 milioni di dollari per il finanziamento di un'impresa calzaturiera di piccole dimensioni [94].

Figura 4.15
Ammonite di Fernando Romero (2014) presenta una struttura biomimetica ispirata ai celebri fossili, producibile solamente tramite le tecnologie di AM [93].



L'adozione di tecnologie di AM, in particolare per la produzione dei componenti elastomerici come le suole, intersuole o solette, può permettere un notevole risparmio legato alla sostituzione di macchine tradizionali e degli stampi stessi. Infatti, uno stampo per tecnologie di stampaggio o espansione può arrivare ad un costo di decine di migliaia di euro, a seconda della sua complessità formale (costo da moltiplicare sulla base delle taglie che si desidera produrre).

D'altro canto, un vantaggio delle macchine AM è l'alta varietà di fasce di prezzo disponibili all'acquisto: se macchinari da 300-2000 euro sono principalmente pensati per l'hobbistica ed una produzione *DIY*, già con macchinari da 20.000-30.000 euro si ottiene una qualità adeguata ad una produzione seriale; i modelli più performanti si attestano ad una fascia di prezzo di 100.000-500.000 euro. Questa scalabilità consente di adattare l'investimento al volume produttivo in modo fluido e più graduale rispetto alle tecnologie "classiche" di stampaggio ad iniezione, rotativo ecc..., che risultano economicamente sostenibili con volumi di centinaia di migliaia di pezzi [fig. 4.16].

Naturalmente, come sarà affrontato in seguito, le logiche di costi per l'azienda sono fortemente dipendenti dal numero di unità vendute e dai tempi richiesti alla produzione [96, 97].

Figura 4.16

Negli ultimi anni si sono diffuse le cosiddette "Print Farm", stabilimenti produttivi che integrano da alcune centinaia fino a migliaia di macchinari operativi simultaneamente, rendendo possibile una produzione seriale e continuativa [95].



LIMITI

■ VARIETÀ DI MATERIALI

Benché in costante aumento, attualmente la varietà di materiali utilizzabili in AM risulta limitata: sono impiegati principalmente ABS o PETG per componenti rigidi (es: tacchi alti), mentre per componenti morbidi sono disponibili principalmente *foamy* PLA o TPU di diverse durezze *Shore*. Tra i materiali non disponibili, le gomme (naturale, sintetica o TPR) risultano un materiale largamente impiegato per il battistrada, per via dell'elevato *grip* e della resistenza all'abrasione; per sopperire a questa mancanza sono necessarie accortezze progettuali legate al disegno della suola ed all'inserimento *texture* funzionali che rendano l'interfaccia di contatto con il suolo meno liscia.

■ LIMITI PRODUTTIVI

Indipendentemente dalla qualità della macchina utilizzata, i tempi di produzione non sono comparabili con i processi di stampaggio tradizionali (a iniezione, rotativo, con espansione ecc...). Ad oggi le stampanti meglio ottimizzate per la produzione seriale possono raggiungere tempi di stampa di 13-41 minuti per pezzo [5], mentre per i processi più consolidati i tempi sono nell'ordine dei secondi (chiaramente riferendosi alla produzione delle suole, a cui vanno aggiunti i tempi di produzione e assemblaggio degli altri componenti, se si svolge la comparazione con scarpe interamente stampate in 3D).

Inoltre l'AM richiede un controllo più rigoroso delle condizioni di lavoro, siccome anche piccoli disallineamenti tra *layer* generati possono compromettere la qualità complessiva del pezzo o portare al fallimento della stampa, con conseguente spreco di materiale. Alcuni materiali, poi, richiedono ambienti controllati, come camere chiuse, per mantenere temperature ottimali e per contenere i vapori nocivi emessi.

Infine, benché di solito sufficienti alla stampa di un paio di scarpe, anche le macchine industriali presentano limiti nel volume di stampa utilizzabile, che possono incidere sull'efficienza del processo.

La questione dei tempi di produzione fa sì che, nonostante i maggiori investimenti iniziali, i processi tradizionali possono risultare estremamente vantaggiosi su grandi serie, ammortizzando i costi su una quantità di unità prodotte maggiore. Questo è uno dei motivi per cui ad oggi la stampa 3D è impiegata soprattutto da realtà specializzate che lavorano con volumi di produzione medio-bassi. Tuttavia, vari esempi legati a grandi brand sportivi (vd. Adidas) vanno in controtendenza con queste logiche, ricorrendo all'AM per le qualità uniche dei componenti producibili.

LIMITI ESPRESSIVI

Prendendo in considerazione scarpe interamente stampate in 3D, la presenza esclusiva di un unico materiale elastomerico può rappresentare un limite rispetto agli archetipi consolidati. In particolare per alcune categorie di calzatura (es: quelle eleganti stile *Derby*), questa tecnologia risulta ancora in fase di accettazione. In generale, alcune fasce di utenza tendono ad associare queste scarpe a tipologie informali in TPU (es. ciabatte o modelli simili), con una conseguente riduzione della percezione di valore e versatilità del prodotto [fig. 4.17].

Data la dilatazione dei tempi comportata dalla stampa multimateriale, inoltre, spesso le scarpe in AM sono monocromatiche. Infine, il riempimento *lattice* che caratterizza le tomaie, volto a diminuire il peso e massimizzare la morbidezza, può risultare poco discreto dal punto di vista espressivo.

LIMITI FUNZIONALI

Nonostante il costante sviluppo da parte delle aziende nel settore (Recreus, Bambu Lab, Supapac, NinjaTek...), la varietà limitata di polimeri utilizzabili impone dei vincoli dal punto di vista del peso e delle prestazioni meccaniche, solitamente compensati tramite la modellazione geometrica.

Inoltre, benché funzionali alle *performance* dei componenti, i disegni in *lattice* reticolari esposti all'esterno possono aumentare la complessità di pulizia delle scarpe e possono influire negativamente sull'impermeabilità.



Figura 4.17
Solo gli ultimi anni hanno visto delle sperimentazioni rivolte alle calzature formali ed eleganti. In foto: FUSED Shado [98].

4.4 I campi applicativi

In seguito saranno analizzati i casi studio più rilevanti legati allo stato dell'AM nel *footwear* ad oggi [99-134] [fig. 4.18]:

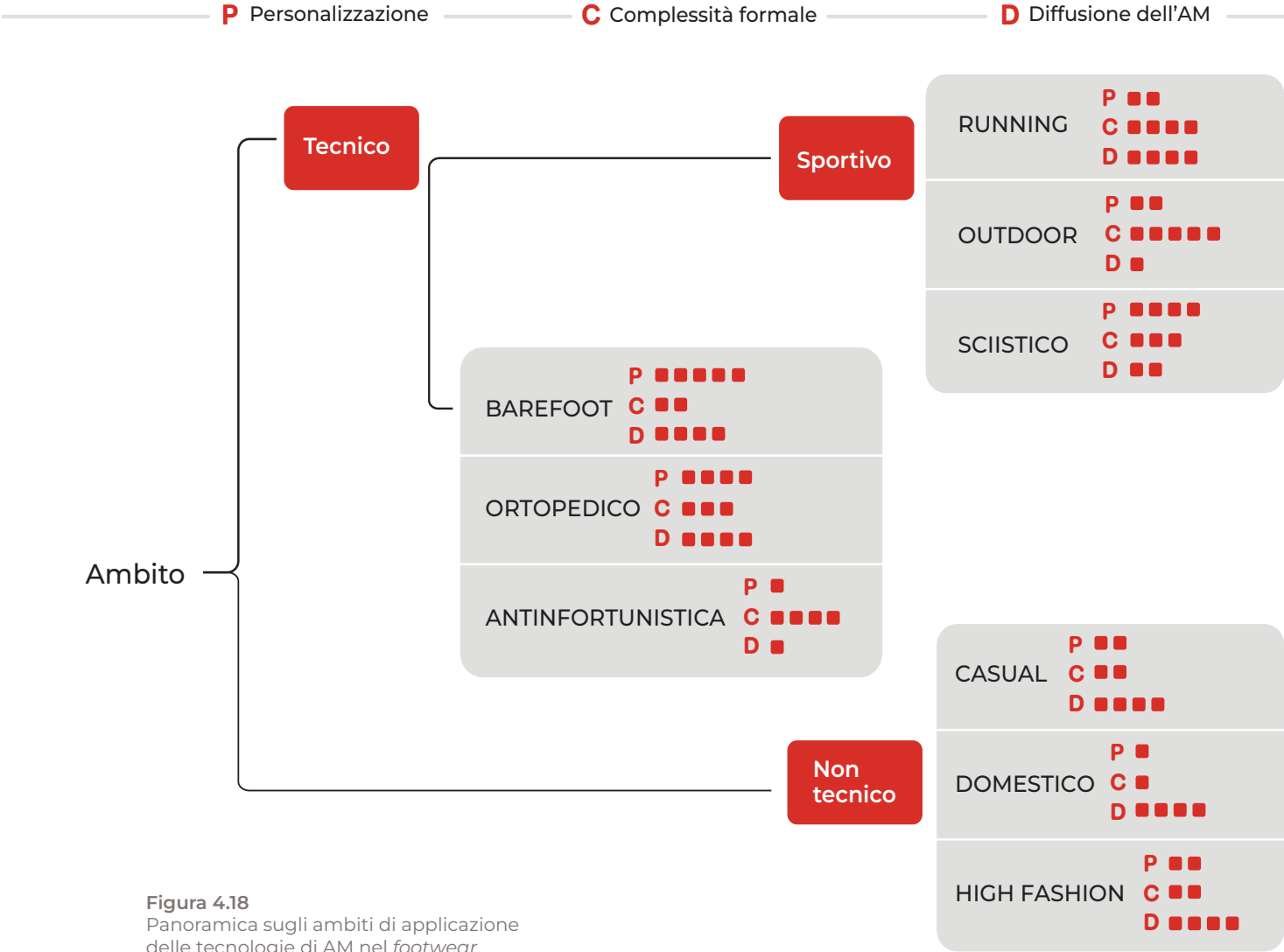


Figura 4.18
Panoramica sugli ambiti di applicazione delle tecnologie di AM nel *footwear*.

Running

Rappresentando uno dei primi settori ad aver mostrato interesse verso le tecnologie di AM, il *running* costituisce oggi uno degli ambiti con maggior impiego in specifiche nicchie ed applicazioni. Rispetto ad altri contesti, inoltre, si riscontra un maggior coinvolgimento di grandi *brand* sportivi, con produzioni ad alti volumi pienamente integrate in logiche di produzione industriale.

In particolare, si è diffusa la stampa di intersuole costituite da strutture *lattice* in TPU, apprezzate per la maggior durabilità e per la possibilità di controllo delle proprietà e della risposta elastica nelle diverse aree del piede, rispetto alle schiume tradizionali. Si tratta perciò di un contesto in cui le inefficienze produttive della stampa 3D sono compensate da un alto valore percepito e dai vantaggi funzionali derivanti dalla complessità geometrica dei componenti.

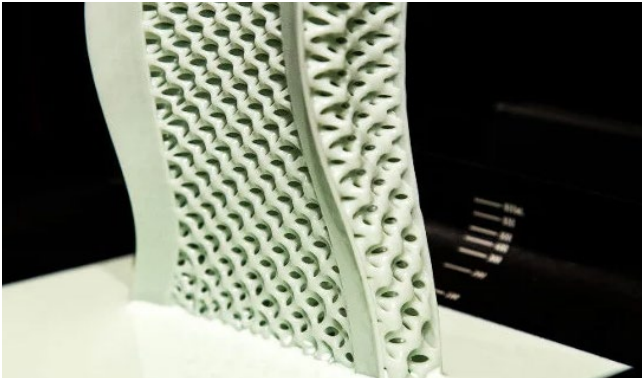


UNDER ARMOUR ARCHITECT

Azienda Under Armour
Anno 2017
Stato commercializzata
Processo di stampa SLA, SLS
Caratteristiche
■ Disegno della suola funzionale a migliorare la restituzione elastica della scarpa

ADIDAS FUTURECRAFT

Azienda Adidas
Anno 2018
Stato commercializzato
Processo di stampa SLA, SLS
Caratteristiche
■ Intersuola *lattice*, densità del disegno variabile
■ Minor densità nell'avampiede per facilitare la flessione



DECATHLON X HP X LONATI GROUP

Azienda Decathlon
Anno 2023
Stato prototipo aziendale
Processo di stampa MJP
Caratteristiche

- Sostituibilità e customizzazione dei componenti (maggior comfort e riparabilità)



Outdoor

Si tratta di un settore in cui le tecnologie di AM non hanno ancora consolidato una presenza significativa, a causa delle elevate prestazioni richieste alle calzature per risultare durevoli e sicure da utilizzare. Ciò nonostante, sono stati sviluppati alcuni prototipi destinati al *trekking* leggero e varie sperimentazioni nell’ambito dell’arrampicata, essendo necessarie calzature estremamente flessibili, aderenti al piede dell’utente e manutenibili in caso di usura.



PROGETTI DI AUTOPRODUZIONE

Nei portali di condivisione di progetti sono presenti vari supporti per ramponi o tasselli aggiuntivi per maggiore *grip* sul fango e ghiaccio, autoproducibili dagli utenti.



EARTH MOC

Designer Daniel Shirley
Anno 2024
Stato prototipo di designer
Processo di stampa SLS

- Caratteristiche
- Scarpa per escursioni leggera e da recupero
 - Fitta tassellatura sul battistrada
 - Disegno intrecciato non ottenibile con tecniche di produzione convenzionali



ATHOS CLIMBING SHOES

Azienda Athos e HP
Anno 2023
Stato prototipo aziendale
Processo di stampa MJP

- Caratteristiche
- Scarpa progettata sulla base di una scansione 3D del piede realizzata con lo *smartphone*
 - Integrazione di un app per configurare la calzatura
 - Il design modulare permette la sostituzione dei componenti più usurabili: la suola è sostituibile fino a 4 volte
 - Griglia forata per migliorare la traspirabilità



Sciistico

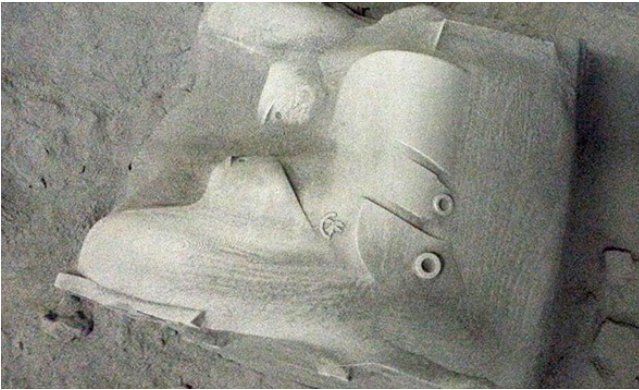
In questo caso si osservano principalmente esperienze sviluppate da *startup*, motivate dalla possibilità di realizzare componenti perfettamente corrispondenti alla morfologia del piede del consumatore. L'impiego di tecnologie di AM può riguardare l'imbottitura interna morbida ma anche lo scafo esterno, se impiegati polimeri tecnici ad alte prestazioni (principalmente a base nylon).

SCARPONE EASY STAND

Designer Franz Egger
Anno 2015
Stato prototipo aziendale
Processo di stampa SLS

Caratteristiche

- In Nylon rinforzato da carbonio (Windform SP)
- Stampate anche tre intersuole per un miglior adattamento al piede

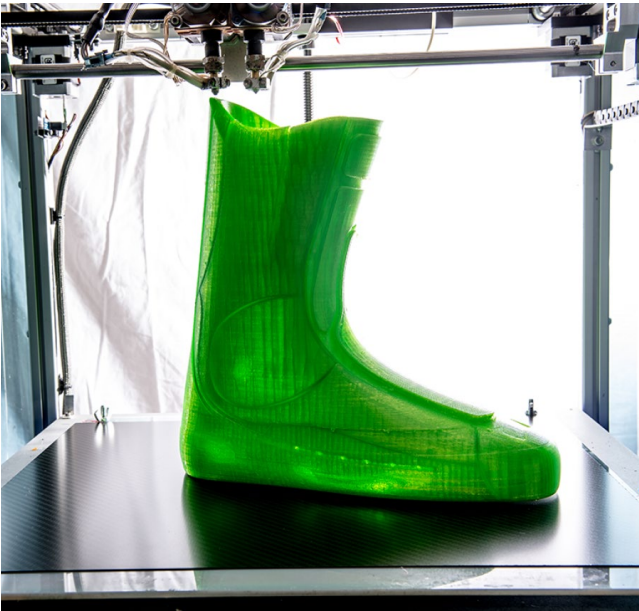


SKI BOOTS

Azienda Tailored Fits e Materialise
Anno 2017
Stato commercializzato
Processo di stampa FDM

Caratteristiche

- Prodotti imbottitura e scafo esterno
- L'imbottitura è modellata su una scansione 3D del piede degli utenti



Barefoot

Si tratta di uno dei settori più sviluppati, grazie a requisiti meccanici relativamente moderati e all'alto apprezzamento per scarpe leggere ed altamente flessibili. L'uso dell'AM consente uno spessore delle pareti del prodotto minimo (anche di 1.5-2 mm), oltre alla possibilità di inserire disegni di fori e nervature molto complessi, finalizzati a massimizzare la traspirabilità e diminuire il peso.

Inoltre, la possibilità di realizzare una calzatura sulla base delle scansioni 3D del piede rappresenta un vantaggio particolarmente rilevante per questo segmento.



G1 BAREFOOT

Designer Alessio Pagliai
Anno 2024
Stato open source e commercializzato
Processo di stampa FDM

Caratteristiche

- Tomaia a maglia con aperture per maggiore traspirabilità
- Spessore di suola e tomaia <5mm
- Suola piatta ed estremamente flessibile



VIVOBIOME

Azienda Vivobarefoot e Balena
Anno 2024
Stato commercializzato
Processo di stampa FDM

Caratteristiche

- In filamento di origine vegetale, biodegradabile
- Progettazione “made to measure”
- Disegno parametrico di fori e tasselli



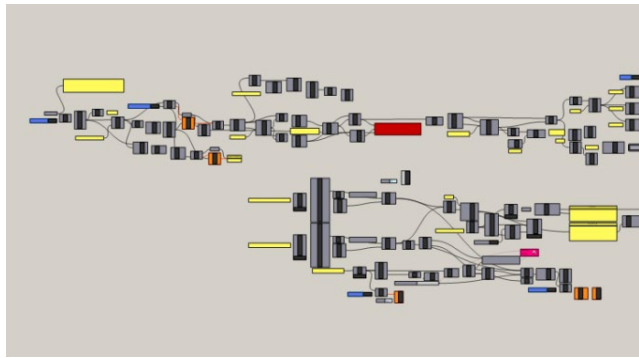
Ortopedico, medicale

Insieme al *running* rappresenta uno dei primi ambiti in cui le tecnologie di AM hanno trovato applicazione funzionalmente innovative, data la forte presenza di ricerca scientifica e l'apertura verso novità tecnologiche in grado di apportare benefici concreti ai pazienti.

ORTHOPEDIC SHOE

Designer Daniel Pectu
Anno 2024
Stato prototipo aziendale
Processo di stampa FDM
Caratteristiche

- Modellazione parametrica per definire la rigidezza dei vari componenti della scarpa
- Sperimentate anche soluzioni che integrano l'artigianato (suole stampate in 3D e tomaie in cuoio)
- Uso di TPU biocompatibile (Ultrafuse TPU 64D o 85A)



La stampa 3D ha ampliato e reso più accessibili le possibilità di realizzare componenti *tailor-made*, consentendo poi un controllo estremamente preciso della distribuzione del peso sul piede dell'utente. Numerose realtà hanno adottato i processi di AM per la produzione di plantari e solette; più recentemente si sono sperimentate le prime esperienze commerciali relative a suole ed intersuole.



USO PER FORME DA CALZOLAIO

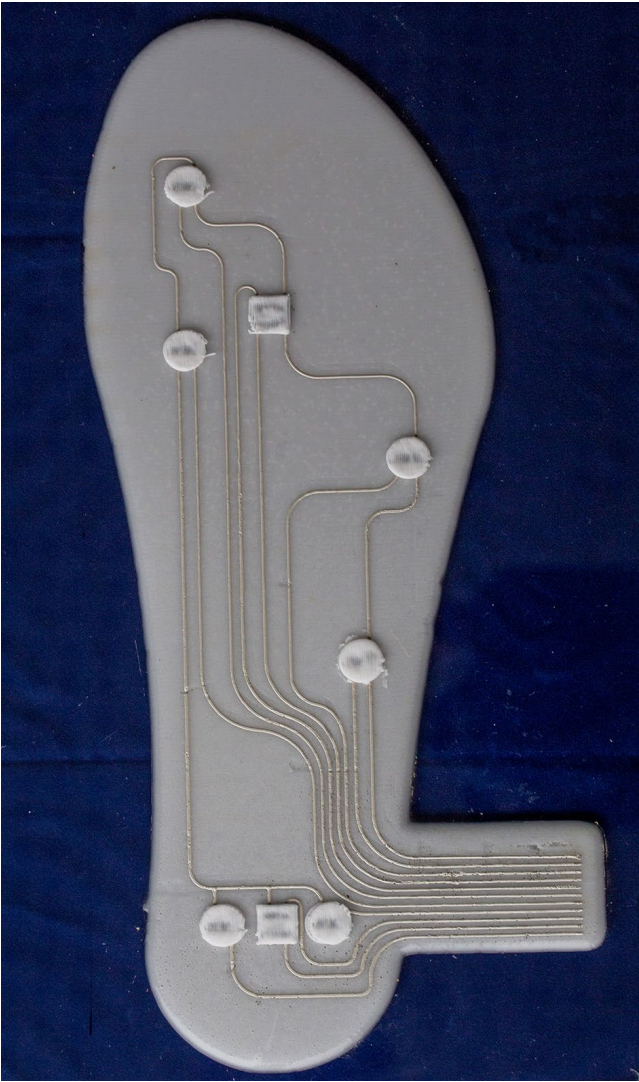
Sulla base delle scansioni della forma del piede del paziente, è efficiente produrre le forme su cui costruire la scarpa stampandole poi in 3D, rispetto ai processi tradizionali (es: lavorazioni del legno).



PLANTARI CON SENSORISTICA

Tra gli sviluppi più recenti rientrano anche applicazioni in ambito medicale e di monitoraggio. In particolare, in contesti di ricerca universitaria, sono stati sviluppati plantari stampati in 3D con sensori piezoelettrici integrati, in grado di rilevare le sollecitazioni meccaniche generate durante la deambulazione.

I dati raccolti consentono di analizzare postura e comportamento del passo, risultando utili per il monitoraggio e la diagnosi di patologie quali morbo di Parkinson, demenza, diabete o lesioni.



Sicurezza sul lavoro

Ad oggi i principali *player* del settore hanno dimostrato poco interesse riguardo ad applicazioni nell'antifortunistica, a causa della complessità dei materiali tradizionalmente impiegati per queste calzature e la necessità di aderire a standard di sicurezza estremamente rigidi; generalmente, non sono ancora stati apprezzati dei vantaggi effettivi derivanti dall'inclusione della stampa 3D.

Esistono tuttavia realtà medio-piccole orientate a professioni che prevedono turni prolungati quasi esclusivamente in posizione eretta, come infermieri o camerieri: in questi casi le calzature proposte riprendono molte delle qualità apprezzate nel settore ortopedico, per il controllo e l'assorbimento della forza peso degli utenti e per la diminuzione di picchi concentrati di pressione plantare.

EAGLE LL

Azienda	Jeep
Anno	2024
Stato	commercializzato
Processo di stampa	n.d
Caratteristiche	
■ Intersuola stampata in 3D, con disegno a celle voronoiche	



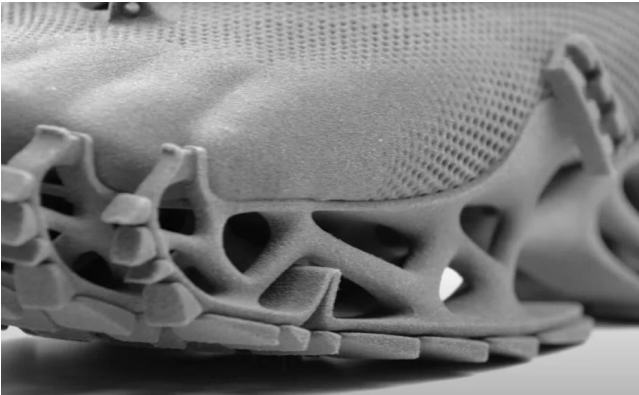
Casual

Si tratta del settore che mostra la maggior vivacità sia da parte di aziende strutturate che da *maker* e designer indipendenti, risultando il contesto in cui la relazione tra qualità funzionali ed espressive del prodotto vede il maggior compimento.

Diverse aziende di medie dimensioni stanno proponendo collezioni in collaborazione con brand affermati del *fashion system*, oltre a proporre modelli originali caratterizzati da forme futuristiche e organiche.

Parallelamente, nell'ambito dell'autoproduzione, vari produttori di stampanti 3D e filamenti flessibili, in collaborazione con designer, hanno distribuito gratuitamente sui portali di condivisione dei progetti collezioni di scarpe realizzabili dagli utenti, con impostazioni di stampa ottimizzate per macchine appartenenti a diverse fasce di prezzo.

Questa diffusione di progetti è favorita dalla relativa semplicità formale consentita da questo tipo di calzature e da requisiti funzionali e prestazionali meno stringenti rispetto ad altri settori.



CRYPTIDE SNEAKERS

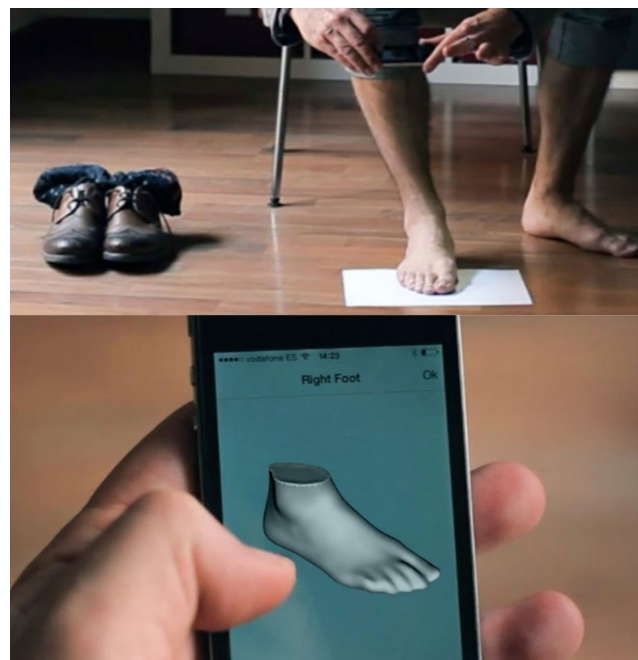
Designer	Stephan Henrich
Anno	2021
Stato	commercializzato
Processo di stampa	SLS
Caratteristiche	
■ Forma a calzino basata su scansione 3D	
■ Suola con reticolo studiato in base alle direzioni dei carichi esercitati sul piede	

ZELLERFELD

Compagnia nata ad Amburgo nel 2015 che produce scarpe monocomponente e mono-materiche con macchine FDM e filamenti proprietari (Zellerfoam TPU).

Caratteristiche

- Lavoro con volume di inventario minimo
- Servizio di raccolta delle scarpe usate per il riciclo.
- Dal 2023, possibilità per i consumatori di scansionare i propri piedi con app (Volumental) per ordinare una scarpa ridimensionata sul loro corpo. La piattaforma di scansione richiede solamente di posizionare i piedi su un foglio bianco e il processo richiede pochi minuti.
- Le differenti proprietà nelle regioni della scarpa sono ottenute con riempimenti *lattice* diversi, che determinano variazioni di proprietà meccaniche e traspirabilità.



SERVATI

Azienda milanese che dal 2024 commercializza scarpe che integrano *shell* in TPU stampati tramite FDM di medio livello.

Caratteristiche

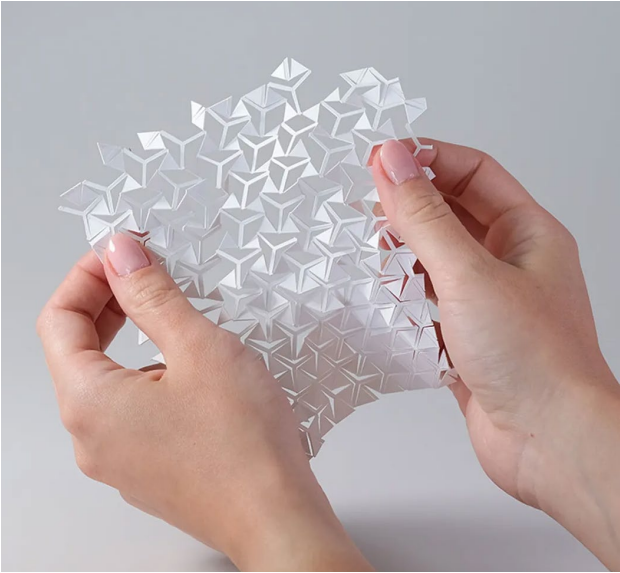
- Proposta un'economia a *loop*, in cui inviare le proprie scarpe usate riciclarne il materiale
- Integrati anche componenti in tessuto, di cui è facilitato il disassemblaggio tramite un'architettura brevettata.



AUXETIC WEAR

Designer Wertell Oberfell
Anno 2022
Stato prototipo di designer
Processo di stampa n.d
Caratteristiche

- Uso di tessuti auxetici per adattarsi alla forma del piede dell'utente
- Telaio stampato in 3D più robusto a cui è incollato il tessuto
- Integrazione di materiali in AM con componenti, incollaggi e cuciture tradizionali

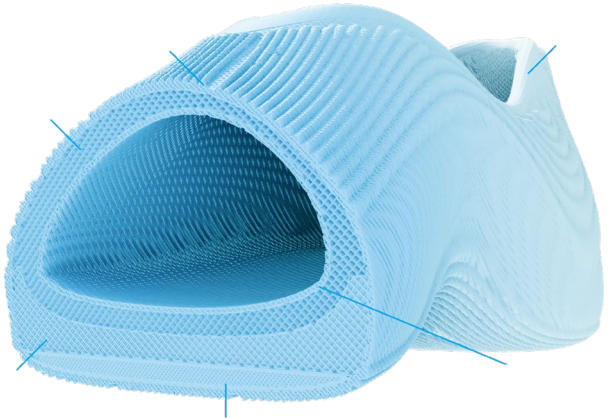


BUBBLEBERRY E WHALEBERRY

Azienda Cloudberry
Anno 2025
Stato open source
Processo di stampa FDM

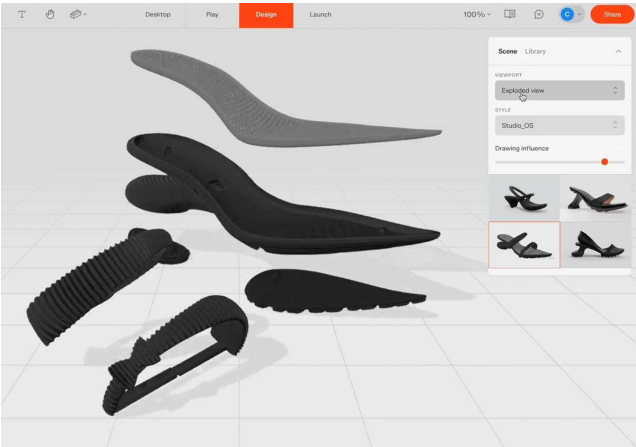
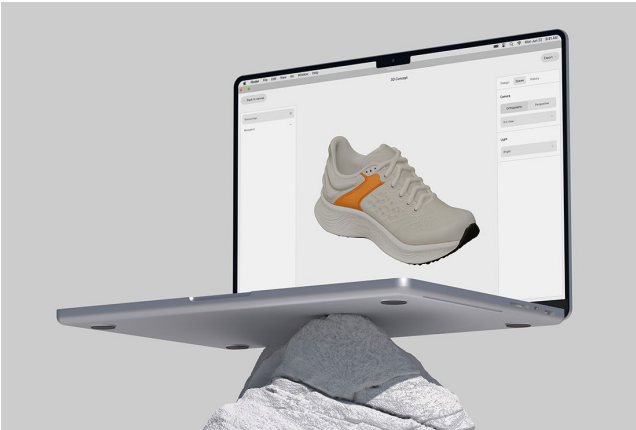
Caratteristiche

- TPU usato con effetto *mesh* nella tomaia, in sostituzione del tessuto
- Uso di diversi riempiimenti per ottenere regioni più simili al tessuto o alla gomma
- Disponibili per la stampa sul portale Makerworld



HILOS

Startup statunitense attiva dal 2021 nello sviluppo di una piattaforma (Hilos Intreplay) *AI powered* per generare, a partire da sketch, un progetto completo di una calzatura in modo automatico, senza ricorrere a CAD. I processi di stampa sono commissionati a terze parti.



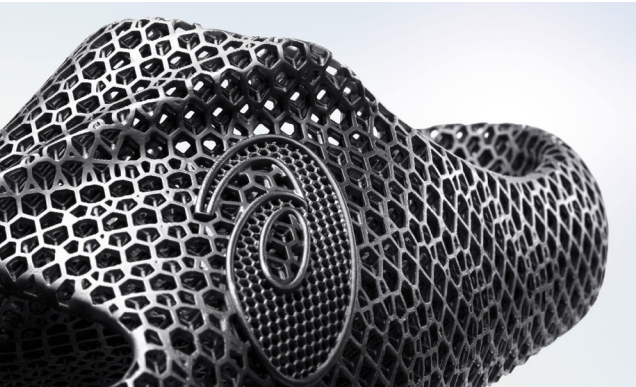
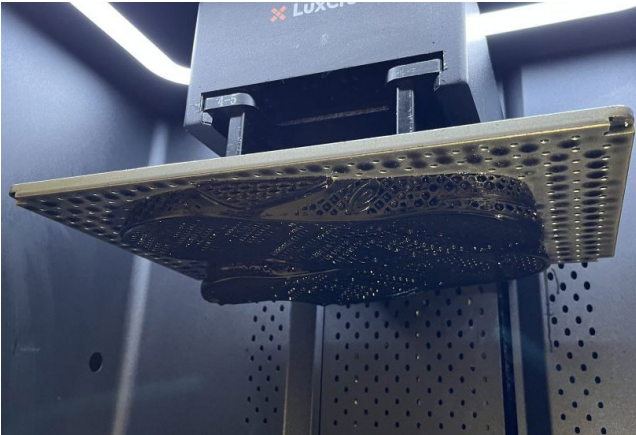
DOLCEVITA SANDAL

Azienda	Hilos e Dolcevita
Anno	2025
Stato	commercializzato
Processo di stampa	MJF

- Caratteristiche
- Assemblaggio con materiali tradizionali (pelle sintetica per il plantare)
 - Uso di un *lattice* di riempimento della tomaia per massimizzare la traspirabilità

Calzature domestiche

Analogamente al settore casual, si apprezza una grande varietà di progetti *open source*, oltre a diversi prodotti commercializzati tradizionalmente. Le conoscenze sviluppate nell'ambito ortopedico e del *running* sono state trasferite in prodotti destinati ad un'utenza ampia, proponendo calzature morbide, leggere e orientate al *comfort* prolungato.



ACTIBREEZE

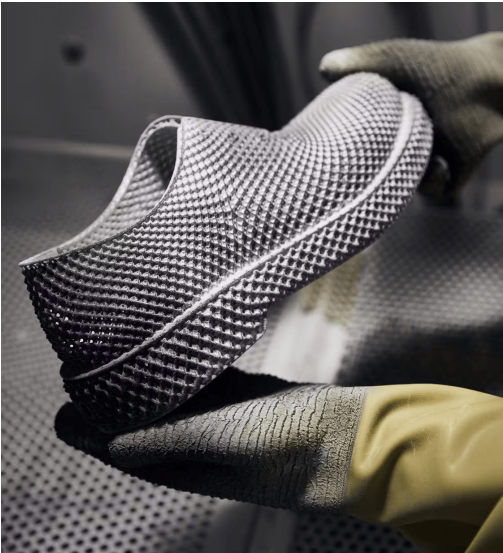
Azienda	Asics e Luxcreo
Anno	2022
Stato	commercializzato
Processo di stampa	SLS

- Caratteristiche
- Calzatura da recupero per *runner*, prima o dopo l'allenamento
 - Versione interamente stampata in 3D o solamente con plantare sostituibile stampato

High fashion

Se per oltre un decennio il settore dell'*high fashion* ha impiegato l'AM prevalentemente per scarpe da sfilata e prototipi concettuali, spesso integrando anche materiali rigidi (ABS, nylon ecc...), solo nell'ultimo periodo sono emerse proposte commerciali più strutturate.

In questo contesto, la stampa 3D viene apprezzata soprattutto per la libertà formale che consente, permettendo la realizzazione di geometrie complesse, superfici organiche e architetture difficilmente ottenibili tramite processi produttivi tradizionali.



DERBY CARLO

Azienda Dior
Anno 2023
Stato commercializzato
Processo di stampa SLS
Caratteristiche

- Ripresa la forma classica delle *derby* Dior
- Rispetto all'originale, peso ridotto



GRIPHORIA

Azienda Alexander Wang, Hilos, Carbon
Anno 2026
Stato commercializzato
Processo di stampa DLS
Caratteristiche

- Tra i primi esempi di stiletto in AM commercializzato
- Tomaia realizzata in TPU morbido, tacco in RTPU (formulazione più rigida)



CONTINUUM FASHION

Azienda Mary Huang
Anno 2012
Stato prototipo di designer
Processo di stampa FDM
Caratteristiche

- Collezione di scarpe con tacco alto stam-pate in poliammide

In sintesi, si osserva come i diversi settori presentino gradi di avanzamento ed introduzione del mercato differenti, integrando sia logiche di commercializzazione che di produzione *open source*:

- Uso consolidato per intersuole
- Produzione industriale di grandi brand

RUNNING

SICUREZZA SUL LAVORO

- Qualche proposta open source per l'antifortunistica
- Poche *startup* per zoccoli sanitari

ORTOPEDICO E MEDICALE

- Crescente diffusione per solette e plantari
- Vari prototipi di designer

- Prototipi interessanti nell'arrampicata
- Alcune esperienze di autoproduzione

OUTDOOR

CASUAL

- Molti prodotti in commercio e per l'*open source*
- Coinvolgimento di aziende di medio-grandi dimensioni

- Alcuni prototipi e proposte di startup
- Disponibili altre modalità di personalizzazione

SCIISTICO

CALZATURE DOMESTICHE

- Molte proposte su piattaforme *open source*
- Produzione seriale da parte di aziende di medio-grandi dimensioni

- Varie produzioni open source
- Alcune commercializzazioni di piccole compagnie
- Molto interesse scientifico

BAREFOOT

HIGH FASHION

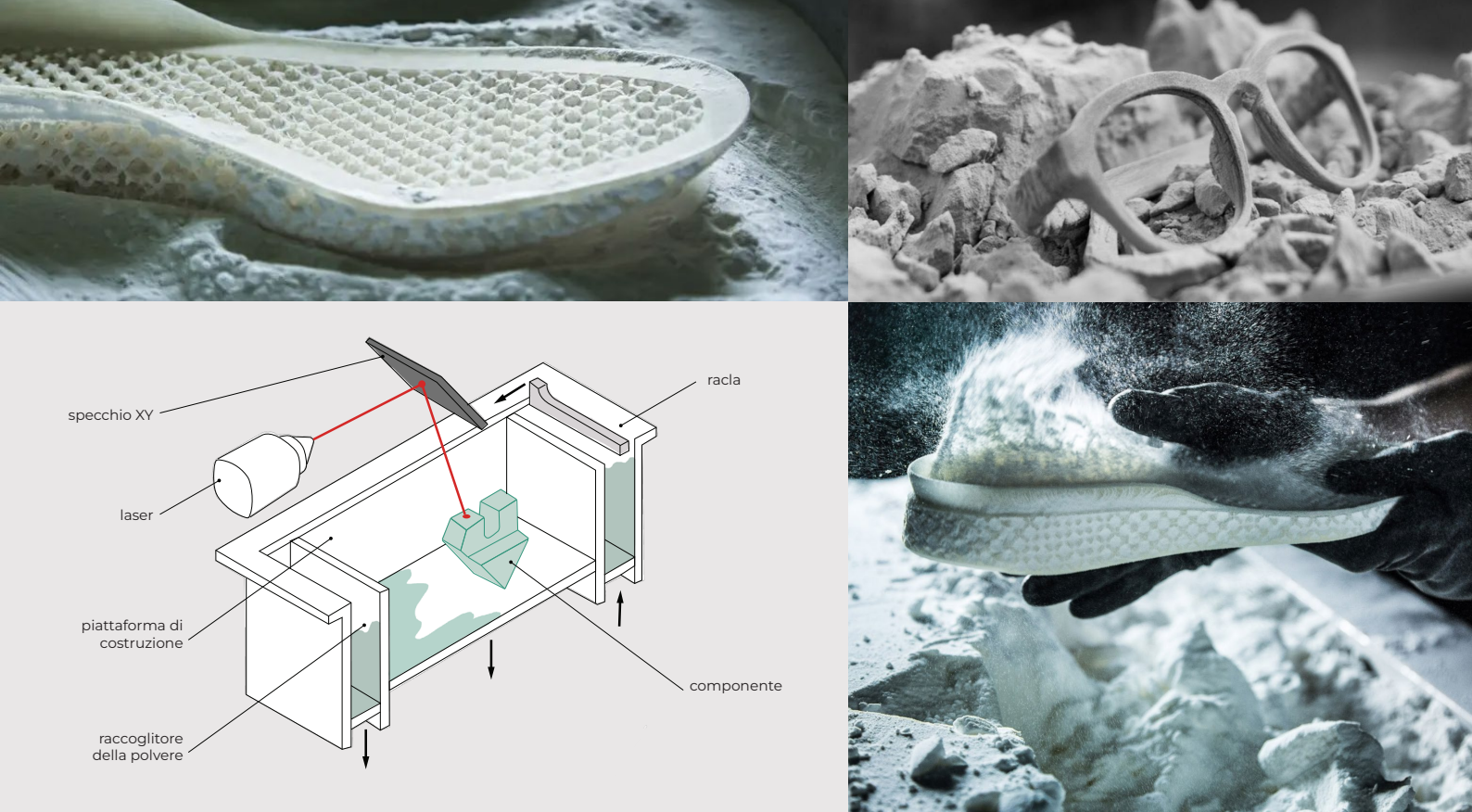
- Utilizzo consolidato per sfilate di brand medio-piccoli e designer indipendenti
- Prime proposte commerciali

4.5 Tecnologie di stampa utilizzabili

Rispetto a tutte le tecnologie di AM disponibili sul mercato, alcune sono più indicate per la lavorazione di materiali flessibili, in particolare per componenti di scarpe [tab. 4.19]:

Tabella 4.19
Panoramica delle tecnologie di AM più impiegate per il footwear.

TECNOLOGIA	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	VELOCITÀ PRODUTTIVA	QUALITÀ SUPERFICIALE	COSTI
SLS	Letto di polvere	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■
SLA	Resina fotopolimerizzata	■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■
MJP	Letto di polvere	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■
VCJ	Resina fotopolimerizzata	■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■
FDM	Estrusione termoplastica	■ ■	■ ■ ■	■

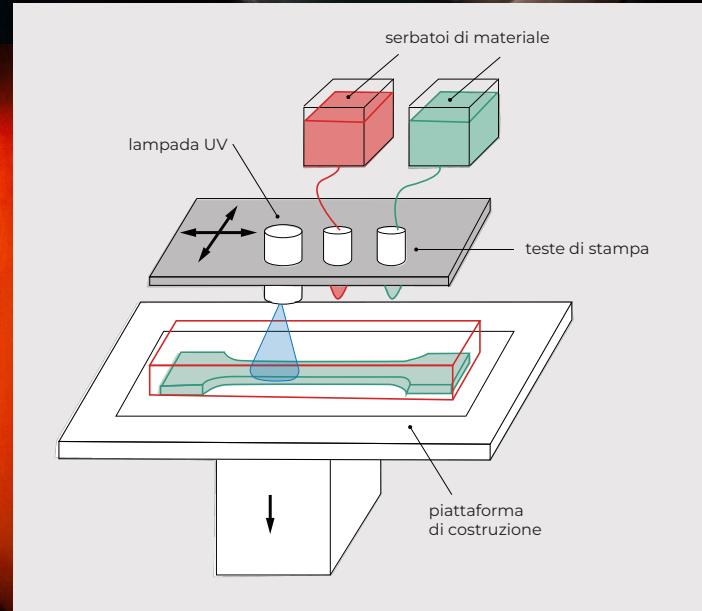
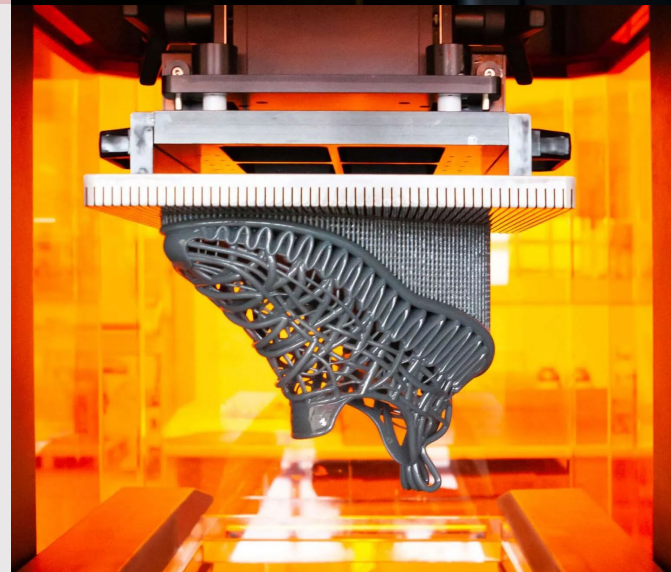
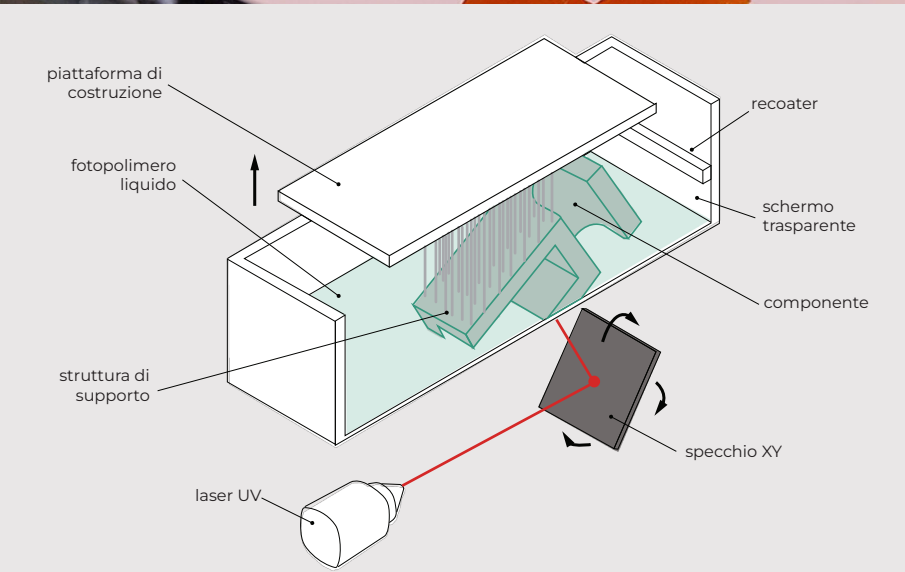
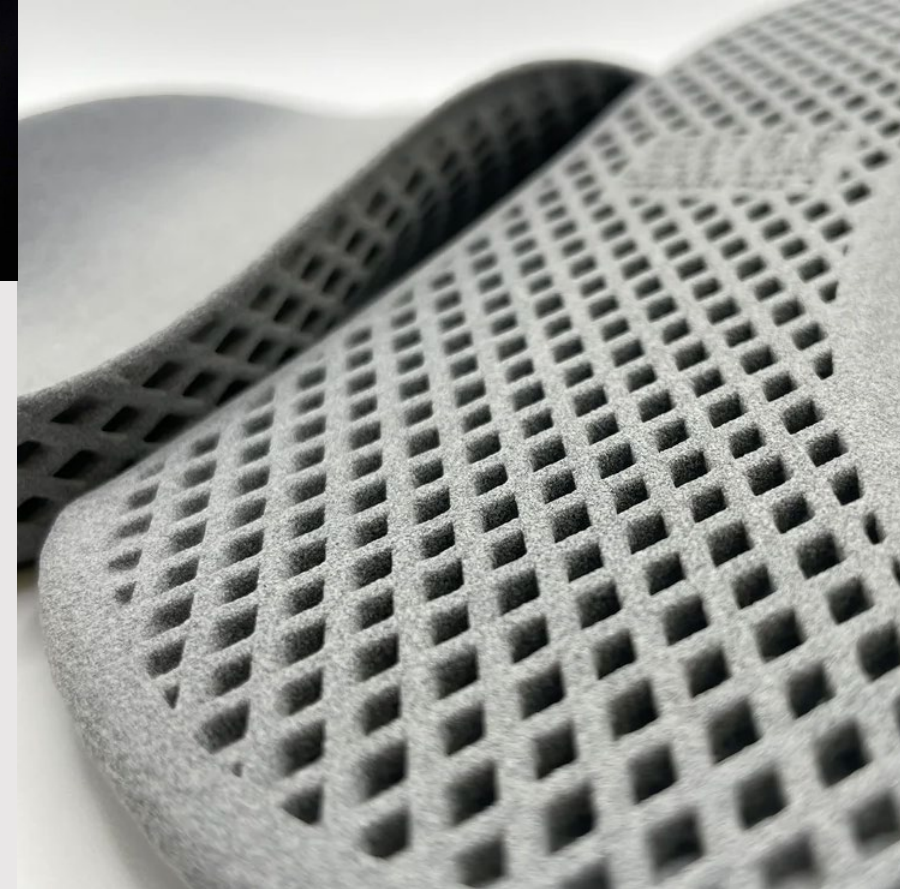
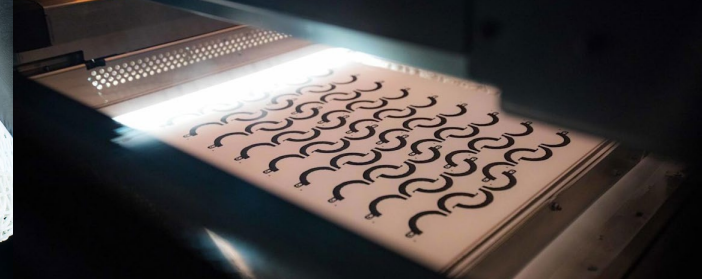
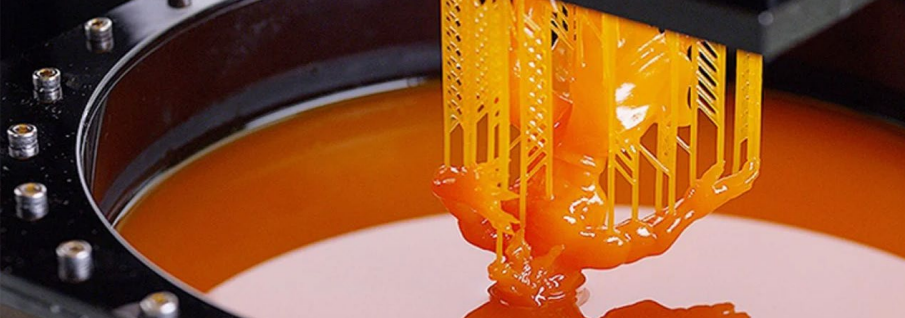


SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)

Nella categoria delle tecnologie a letto di polvere, il processo prevede la sinterizzazione selettiva del polimero posto in forma di particelle granulari tramite un laser ad alta potenza. Ogni strato comporta la deposizione di nuova polvere e la sinterizzazione consolida le particelle fuse con quelle dei layer sottostanti. Si ottengono prodotti dalle proprietà meccaniche eccellenti, caratterizzati da una finitura opaca leggermente granulosa [fig. 4.20].

Un ulteriore vantaggio è la ridotta necessità di supporti, facilitando i processi di post-produzione. Nel footwear, questa tecnologia è utilizzata da vari grandi brand sportivi, soprattutto per suole e solette costituite da strutture *lattice* e metamateriali [135, 136].

Figura 4.20
Schematizzazione del principio di funzionamento; fotografie dal processo di stampa [137-140].



SLA (STEREOLITOGRAFIA)

Processo che prevede la polimerizzazione, strato per strato, di un fotopolimero liquido versato in una vasca, con il movimento di traslazione verticale del piatto di stampa durante la solidificazione dei *layer*. La reazione è attivata da una sorgente UV e consente di ottenere componenti dall'elevata precisione geometrica e ottima finitura superficiale; sono inoltre impiegabili resine con proprietà di traslucenza o trasparenza [fig. 4.1]. Tecnologie affini sono la DLP e LCD, differenziate per modalità di trasmissione del raggio di polimerizzazione verso il piatto di stampa.

Nel settore *footwear*, processi riconducibili a questa famiglia tecnologica sono stati adottati su scala industriale da Adidas, utilizzando resine poliuretaniche come EPU 41 [141].

Figura 4.21
Schematizzazione del principio di funzionamento; fotografie dal processo di stampa [143].

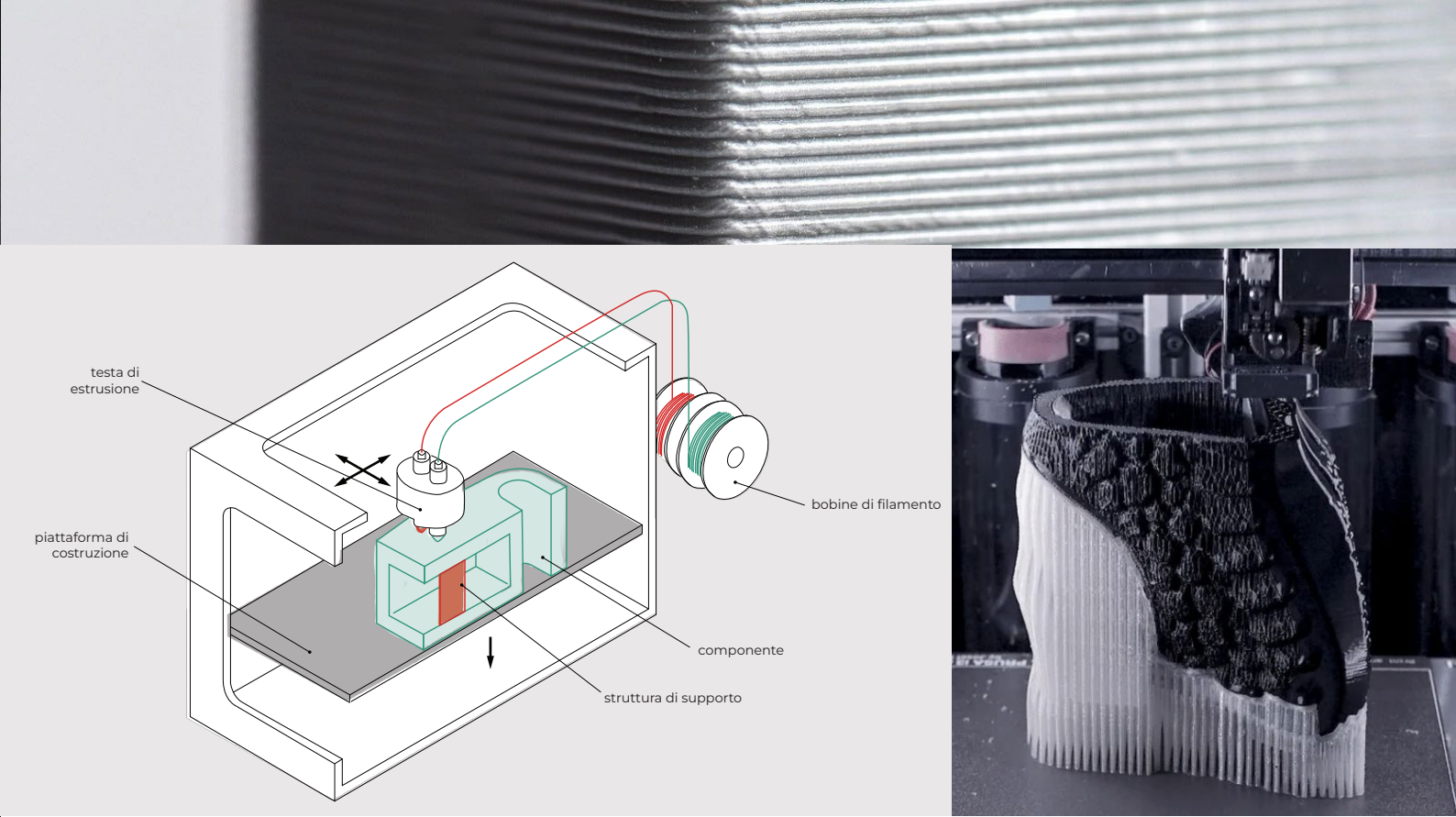
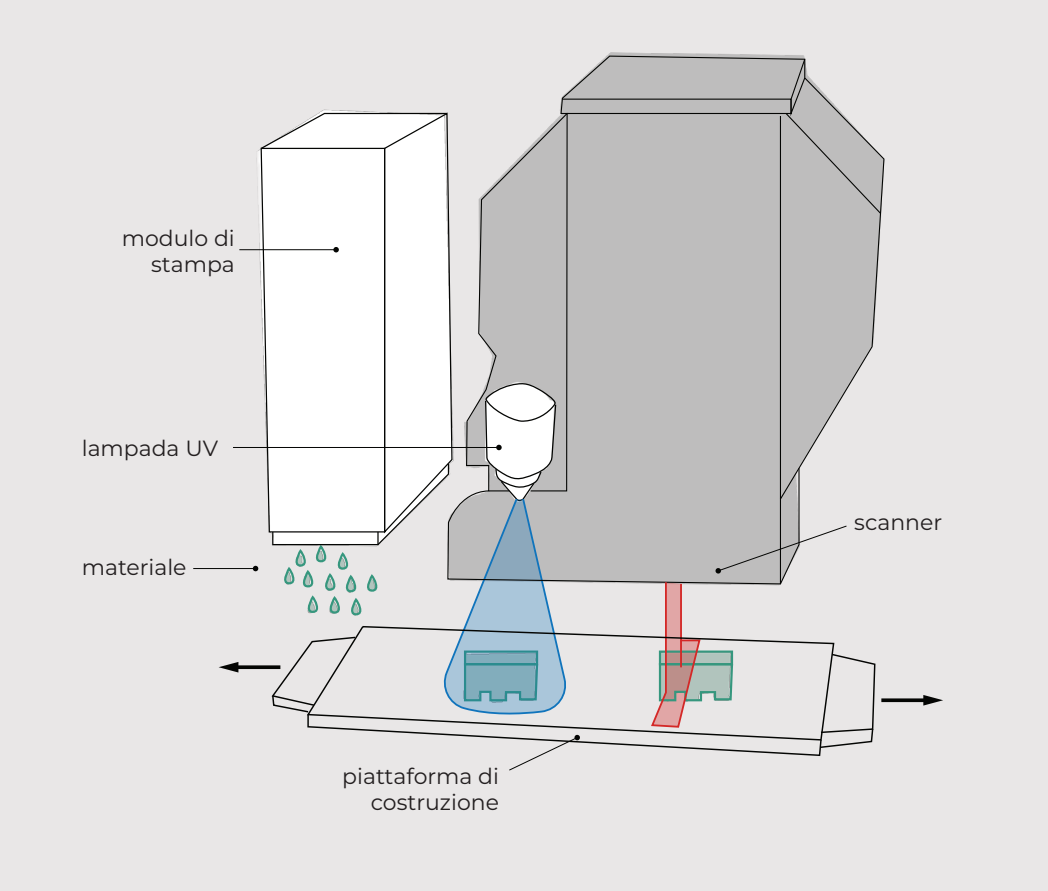
MJP (STAMPA MULTIJET)

Analogamente alle stampanti 2D, questa tecnologia prevede la deposizione strato per strato di gocce di materiale; in questo caso è applicato un polimero fotoreattivo, solidificato con l'esposizione ad una luce UV [fig. 4.22].

Una delle principali caratteristiche è la presenza di più teste di stampa, che permettono di depositare diverse resine nello stesso strato, consentendo una stampa multimateriale (che includa materiali flessibili e rigidi nello stesso oggetto) e multicolore. Sono inoltre utilizzabili materia-

li di supporto solubili, che semplificano la fase di rimozione. HP è l'azienda *leader* in questa tecnologia, nonché partner commerciale di alcuni produttori di calzature, tra cui Decathlon e Athos [144].

Figura 4.22
Rappresentazione del processo di stampa, dettagli di un componente stampato in MJF [144,145].



VCJ (VISION-CONTROLLED JETTING)

Combinando una tecnologia a getto simile alla MJP (fotopolimerizzazione di una resina tramite lampada UV) con uno scanning in tempo reale del layer, questo metodo di stampa consente grande precisione anche per geometrie complesse ad alte prestazioni. Il monitoraggio continuo consente di mantenere la massima costanza di proprietà e di modificare i parametri di stampa in tempo reale, sulla base delle variazioni rilevate. Ciò consente di migliorare la precisione dimensionale e ridurre gli scarti di produzione [fig. 4.23] [146].

Figura 4.23
Schematizzazione del processo di funzionamento; immagini dell'elevata precisione di stampa ottenibile [147].

FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Tra i metodi più diffusi, grazie alla sua *cost-effectiveness* ed alla varietà di macchinari disponibili sul mercato, la tecnologia prevede la deposizione, strato per strato, di materiale (principalmente in filamento) da parte di un ugello riscaldato, posizionato su una testa di stampa contenente il corpo estrusore. Il piano di stampa permette la regolazione delle temperature e, spesso, il movimento sull'asse Z [fig. 4.24].

Sono disponibili macchine che includono più estrusori o il cambio del filamento in ingresso

nell'ugello durante il processo di produzione: in questo modo, è possibile realizzare stampe multimateriale, ad esempio includendo supporti più semplici da rimuovere [148].

Figura 4.24
Schematizzazione del principio di funzionamento; finitura superficiale con *layer* maggiormente evidenti rispetto ad altri processi, esempio di stampa multimateriale [148, 149].

Come accennato, la tecnologia FDM è impiegata in macchinari appartenenti a diverse fasce di prezzo, suddivisibili in tipo industriale e *desktop* (principalmente per la prototipazione).

Le prime presentano volumi di stampa più ampi, maggior affidabilità rispetto a fallimenti, capacità di produzione di geometrie complesse in tempi minori ed un intervento di operatori umani minimo; le seconde si distinguono per l'accessibilità economica e l'intuitività d'uso.

Modelli *entry level* si collocano su una fascia di prezzo di 300-500 euro; è poi possibile acquistare macchine per amatori o piccole realtà professionali a 1000-2000 euro, migliorando precisione, velocità di stampa e varietà di materiali impiegabili. I modelli industriali, che possono includere anche camere di lavoro con filtri HEPA e altre funzionalità aggiuntive, raggiungono costi nell'ordine delle decine di migliaia di euro [fig. 4.25] [150,151].

Figura 4.25

Tra le macchine FDM industriali più apprezzate, la PrusaPro HT90 e la Stratasys Fortius 450 mc presentano un preciso controllo della temperatura della camera, maggior autonomia e volumi di stampa più ampi rispetto alle stampanti di uso domestico [152-154].



Poiché durante il percorso di tesi è stata impiegata una macchina FDM, in seguito le caratteristiche, i processi ed i parametri discussi faranno principalmente riferimento a questa tecnologia di stampa [fig. 4.26].

Figura 4.26
Immagine della stampante Bambu Lab A1, una macchina *entry-level* utilizzata nella fase di sperimentazione progettuale del percorso di tesi [155].

4.6 Materiali impiegabili

Generalmente, la quasi totalità dei materiali flessibili impiegati nell'AM rientra nella famiglia dei TPE (elastomeri termoplastici); nel caso dell'FDM, questi sono commercializzati in filamenti da 1.75 o 2.85 mm di diametro [fig. 4.27].

Di seguito una panoramica sui filamenti più diffusi:

Figura 4.27
Tra gli usi più comuni dei filamenti flessibili si possono considerare componenti morbide per robotica, plantari, guarnizioni e pneumatici [156].



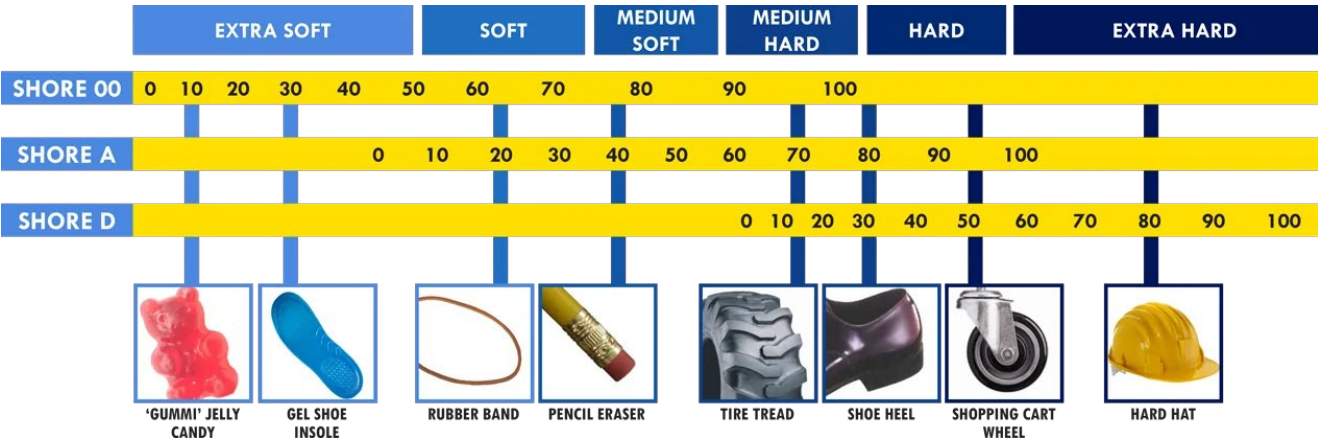
TPU “STANDARD”

Si tratta di poliuretano termoplastico, disponibile in una grande varietà di colori e fasce di prezzo da parte di decine di produttori.

La principale caratteristica di distinzione è la durezza *Shore*, da cui derivano diversi gradi di morbidezza raggiungibili, ma anche differenti complessità di stampa: nello specifico, durezze basse richiedono tempi di processo più dilatati, un controllo più rigoroso di temperatura, umidità ed adesione al piatto di stampa, oltre che accortezze in fase di modellazione. Tendenzialmente le stampanti *desktop* più accessibili supportano filamenti di durezza 85A, 90A, 95A (lo standard) e 98A; macchinari di fascia più alta permettono invece una lavorazione affidabile anche con durezze inferiori [fig. 4.28].

Benché generalmente monocolore e lucido, sono reperibili anche filamenti opachi o con caratteristiche estetiche particolari, come *glow in the dark* o “effetto legno”. Con rTPU si indicano i filamenti in materiale riciclato.

Figura 4.28
A seconda della durezza del filamento, il componente acquisirà delle proprietà elastiche più o meno pronunciate [157].



FOAMY TPU

Questi filamenti sono caratterizzati dalla presenza di un agente schiumogeno che, in fase di deposizione, genera un processo di espansione del materiale; ciò determina un aumento di volume e la diminuzione della durezza (ad esempio da 78A a 60A o da 90A a 70A).

In questo modo il filamento risulta meno imprevedibile nel passaggio attraverso gli ingranaggi dell'estrusore, riducendo il rischio di accumuli, ma, una volta riscaldato nell'ugello, raggiunge livelli elevati di morbidezza [fig. 4.29]. Oltre a ciò, la schiumatura determina anche leggerezza e risparmio materico, con incrementi di volume nell'ordine del 40-60% [fig. 4.30].

Tra i *foamy TPU* più diffusi sono menzionabili le linee Foamy di Filaflex e VarioShore di Colorfabb, con costi superiori del 45-50% rispetto al TPU standard [158, 159].

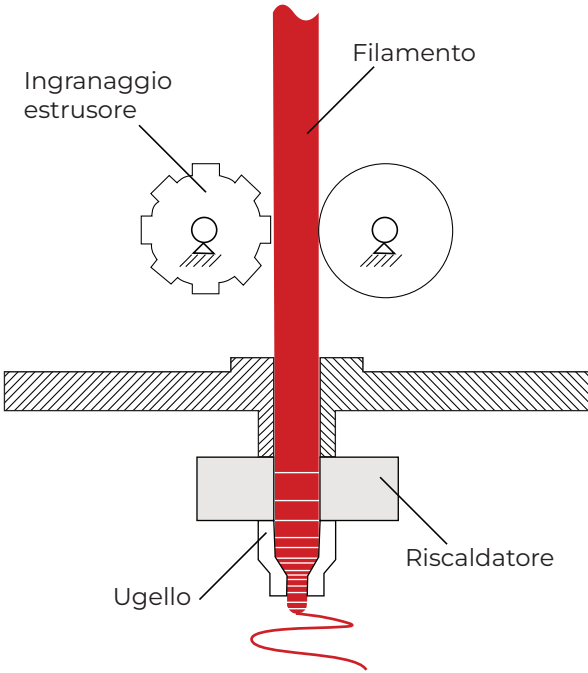


Figura 4.29
Il filamento diminuisce la sua durezza solamente quando riscaldato, passando negli ingranaggi del corpo estrusore con più facilità.

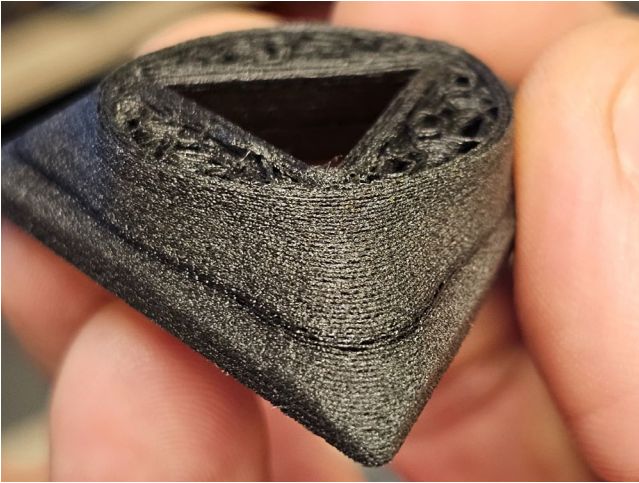


Figura 4.30
In termini di finitura, i TPU a durezza variabile si distinguono dal corrispettivo più comune per una leggera ruvidità superficiale [160].

TPU COMPOSITI

In questa categoria rientrano tutti i filamenti in TPU addizionati con particelle o fibre che conferiscono proprietà specifiche. Ad esempio, il filamento di Fiberology FiberFlex CF [161] contiene il 20% di fibre di carbonio, aumentando resistenza e stabilità termica in ambienti impegnativi, mentre il Recreus Filaflex Purifier Mineral [162] è arricchito con particelle minerali che, tramite processi di fotocatalisi, reagiscono con i gas inquinanti più diffusi negli ambienti urbani, neutralizzandoli [fig. 4.31].

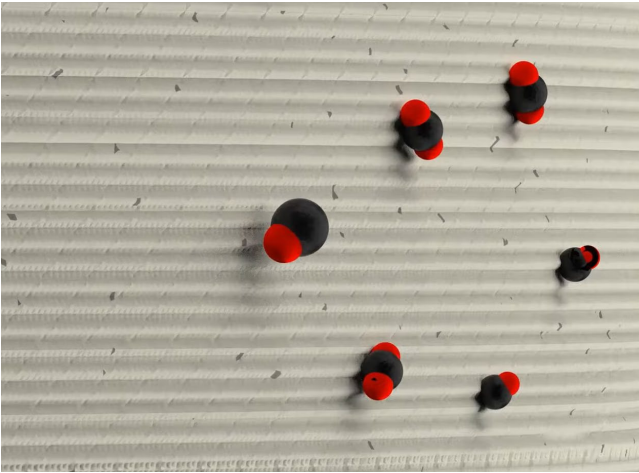


Figura 4.31
Sulla superficie dei componenti stampati con il Recreus Filaflex Purifier Mineral sono osservabili le particelle addizionate all'elastomero [162].

TPU HIGH FLOW

Dicitura utilizzata dai produttori per indicare filamenti a bassa viscosità in stato fuso, progettati per migliorare lo scorrimento nell'ugello riducendo la resistenza all'estrusore; questa caratteristica è dovuta alla presenza di vari additivi, principalmente di natura plastificante. Un ulteriore vantaggio è la solidificazione più rapida a seguito della deposizione. L'elevata fluidità determina tempi di stampa più rapidi, con incrementi della velocità volumetrica (il volume di filamento estruso in rapporto all'unità di tempo) anche di 2 o 3 volte rispetto al TPU standard.

TPC

Si tratta di filamenti costituiti da più copolimeri del poliestere. Rispetto al TPU, il materiale presenta maggior resistenza al calore, alle radiazioni UV e ad agenti chimici come oli combustibili e vapori, oltre a migliori prestazioni meccaniche compressive.

Sul mercato sono disponibili anche varianti parzialmente riciclate o *bio-based*. Tuttavia, la presenza di segmenti più rigidi della catena polimerica determina minor morbidezza ed una risposta meno “gommoso-elastica” rispetto al TPU; tra gli svantaggi si evidenzia anche la maggior complessità di stampa, a causa delle alte temperature che è necessario raggiungere e dell’adesione più difficoltosa al piatto di stampa.

Per questi motivi, generalmente il TPC è preso in considerazione per applicazioni in ambienti ad alte sollecitazioni o per *performance outdoor* prolungate [fig. 4.32].



Figura 4.32

Gli utilizzi del TPC sono più comuni in settori propriamente ingegneristici rispetto che in prodotti d'uso di grande diffusione [163, 164].

PEBA

Acronimo di PoliEtere-Blocco-Ammide, è un materiale impiegato da anni nei settori sportivo e medico e solo recentemente è stato commercializzato sotto forma di filamento.

Le principali differenze dal TPU risiedono nell’elevato ritorno elastico (pari a circa il 78% dell’energia applicata, a fronte del 45-55% tipici del TPU), nella minor densità (1g/cm^3 rispetto a $1.20\text{-}1.25\text{ g/cm}^3$) e nella sua stabilità anche a basse temperature. Di conseguenza, un componente in PEBA tornerà alla sua forma originaria dopo uno stress più affidabilmente, resisterà maggiormente alla fatica e peserà meno rispetto al corrispettivo in TPU.

I limiti attuali risiedono in un prezzo 2-3 volte superiore, nell’elevata igroscopicità (già maggiore per i filamenti flessibili rispetto a quelli rigidi) e a temperature di stampa prossime ai 270°C . Ciò porta a problemi di stampa nelle macchine meno performanti, tra cui la mancata saldatura dei *layer* e grande sensibilità ai parametri di stampa.

È possibile che questo filamento, una volta ottimizzati i parametri di processo e ridotto il prezzo per consumatori e produttori, possa divenire lo standard, ma attualmente è limitato a nicchie ad alte prestazioni, come scarpe da *running* o per attività invernali [fig. 4.33] [165].



Figura 4.33

Ad oggi l’uso del PEBA è consolidato in settori in cui è possibile sostenere costi più elevati in funzione di prestazioni eccellenti; tuttavia, questo materiale non ha ancora raggiunto una diffusione di ampio raggio [166].

TPE BIOPLASTICI

Come già accennato, dato l'interesse dimostrato negli ultimi anni per la stampa di filamenti flessibili, anche a fronte delle critiche legate all'utilizzo di plastiche fossili, diversi produttori hanno intrapreso progetti di sviluppo di alternative più sostenibili ai TPE tradizionali.

Tra i casi più rilevanti, l'azienda israeliana Balena ha sviluppato il filamento BioCirfflex 3D, ottenuto da materie prime di origine vegetale come semi di ricino, oli e polisaccaridi; il materiale presenta proprietà comparabili al TPU ma è biodegradabile in ambiente *compost*. Attualmente l'azienda ha sviluppato diversi modelli in fase prototipale con realtà calzaturiere, tra cui Vivo-Barefoot [fig. 4.34] [167, 168].



Figura 4.34
La bioplastica BioCirfflex è disponibile sotto forma di *pellet* o filamento, risultando adatta sia a processi produttivi tradizionali che all'AM [168].



4.7 La tipologia di riempimento

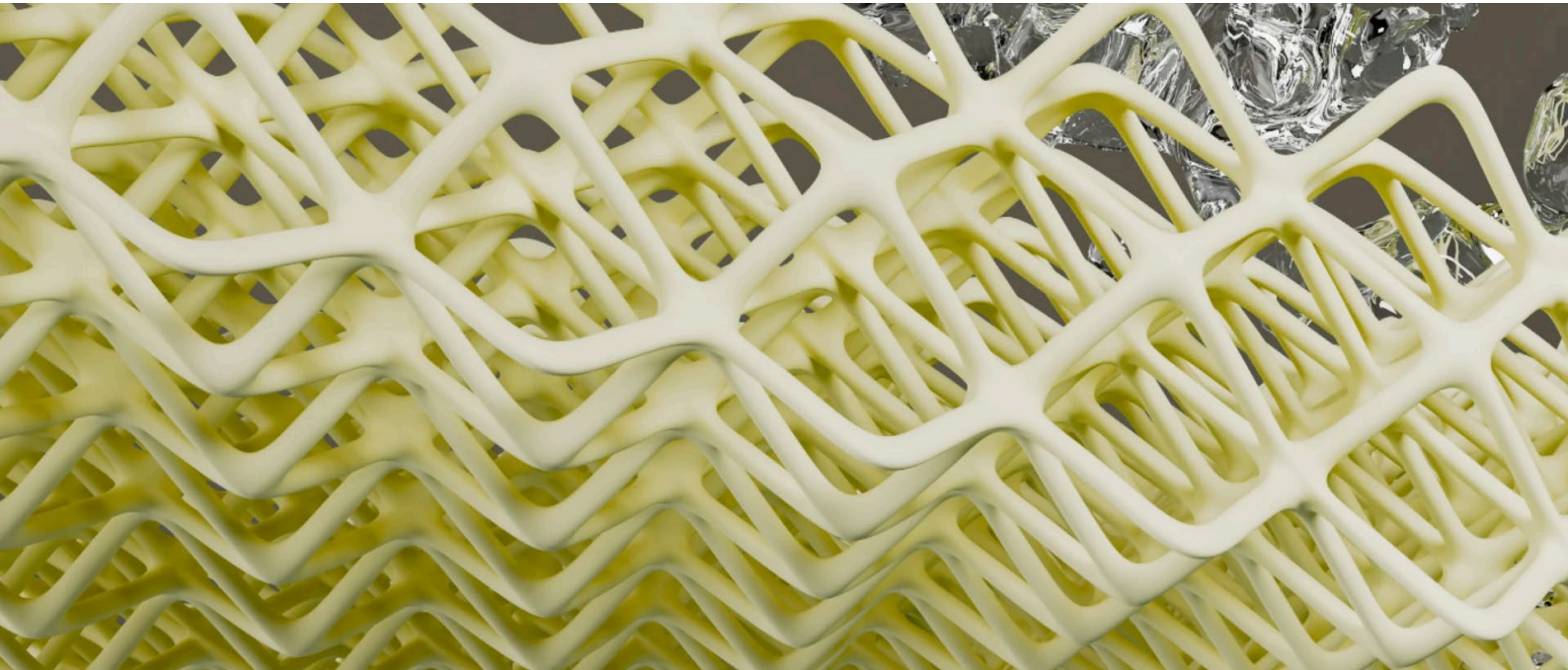
Nel settore calzaturiero, la produzione additiva introduce un cambio di paradigma nella progettazione delle suole, spostando l'attenzione dal solo materiale alla definizione della struttura interna. In questo contesto, le strutture reticolari (*lattice structure*) rappresentano un elemento progettuale centrale, poiché permettono di ottenere comportamenti meccanici complessi tramite la disposizione geometrica del materiale.

A differenza delle schiume tradizionali espanse, caratterizzate da celle generate in modo poco controllabile durante il processo produttivo e da proprietà relativamente uniformi, le strutture *lattice* prodotte in AM derivano da una progettazione digitale precisa della geometria interna.

Questo consente un controllo maggiore su compressione, flessibilità, distribuzione dei carichi e restituzione elastica del componente.

Nelle tecnologie di stampa a polvere o resina, queste strutture devono essere progettate in fase di modellazione, lasciando canali di drenaggio nel componente, mentre per la FDM molte di queste strutture reticolari sono applicabili direttamente nei *software* di *slicing* come riempimento [fig. 4.35].

Figura 4.35
Nelle strutture *lattice*, la geometria e la densità di ciascuna cella può influenzare le caratteristiche di morbidezza, assorbimento, traspirabilità e peso del componente [169].



Tra i disegni utilizzabili maggiormente diffusi, si possono citare [fig. 4.36] [170, 171]:

■ **Concentrico (2D):** Riempimento il cui disegno è basato sul perimetro del componente, ripetendosi con un graduale restringimento verso un centro. Benché permetta un risultato finale dalla rigidità moderata, questo riempimento presenta una notevole disomogeneità nella resistenza alle sollecitazioni, risultando inadatto a scopi che includono carichi orizzontali (come le forze di taglio) elevati.

■ **Grid (2D):** Consistente in linee parallele disposte in direzioni ortogonali, questo riempimento risulta rapido e versatile, ma tende ad irrigidire il componente rispetto ad altri tipi di disegno.

■ **Linea (2D):** Riempimento che impiega linee rette come unitaria minima; a differenza del *grid* queste possono essere disposte in strutture simil-*mesh* o sovrapposte con disegni personalizzati, generando forme di supporto tridimensionale più complesse.

■ **Cubo (3D):** Questo *infill* è caratterizzato da strutture con ampi volumi interni vuoti, minimizzando il peso; contemporaneamente, assicura una distribuzione degli sforzi relativamente uniforme, risultando un buon compromesso tra velocità di produzione e resistenza strutturale.

■ **Tri-esagono (3D):** Disegno ottenuto dall'intersezione di tre set di linee parallele, generando una struttura che include triangoli ed esagoni di maggiore dimensione. Questo *infill* risulta tra i più efficaci nella gestione di forze di taglio, rendendolo adatto ad applicazioni che richiedono alta resistenza a trazione.

■ **Honeycomb (2D e 3D):** Ispirato al disegno degli alveari, questo riempimento fornisce ottime proprietà meccaniche, mantenendo un peso ridotto. Allo stesso tempo, comporta un irrigidimento complessivo del prodotto e tempi di *slicing* più lunghi.

■ **Voronoi (3D):** Struttura biomimetica, osservabile ad esempio all'interno delle ossa, che si basa sulla suddivisione dello spazio rispetto alla prossimità ad un set di punti stabilito. Rispetto ai *pattern* tradizionali, presenta ottima resistenza alla compressione ed elevate capacità di assorbimento delle sollecitazioni.

■ **Giroide (3D):** Complessivamente, risulta uno dei riempimenti più adatti alla produzione di componenti morbidi, specialmente a densità basse (1-20%). Scoperta nel 1970 dallo scienziato della NASA Alan Schoen, si tratta di una TPMS (*triply period minimal surface*) ricorrente anche in natura, definita dall'intersezione di due curvilinee bidimensionali, in una forma che ricorda quella di una spirale di tipo chirale (dunque esistente in due forme enantiomeriche non sovrapponibili). Nella struttura non sono presenti linee rette [fig. 4.37, 4.38].

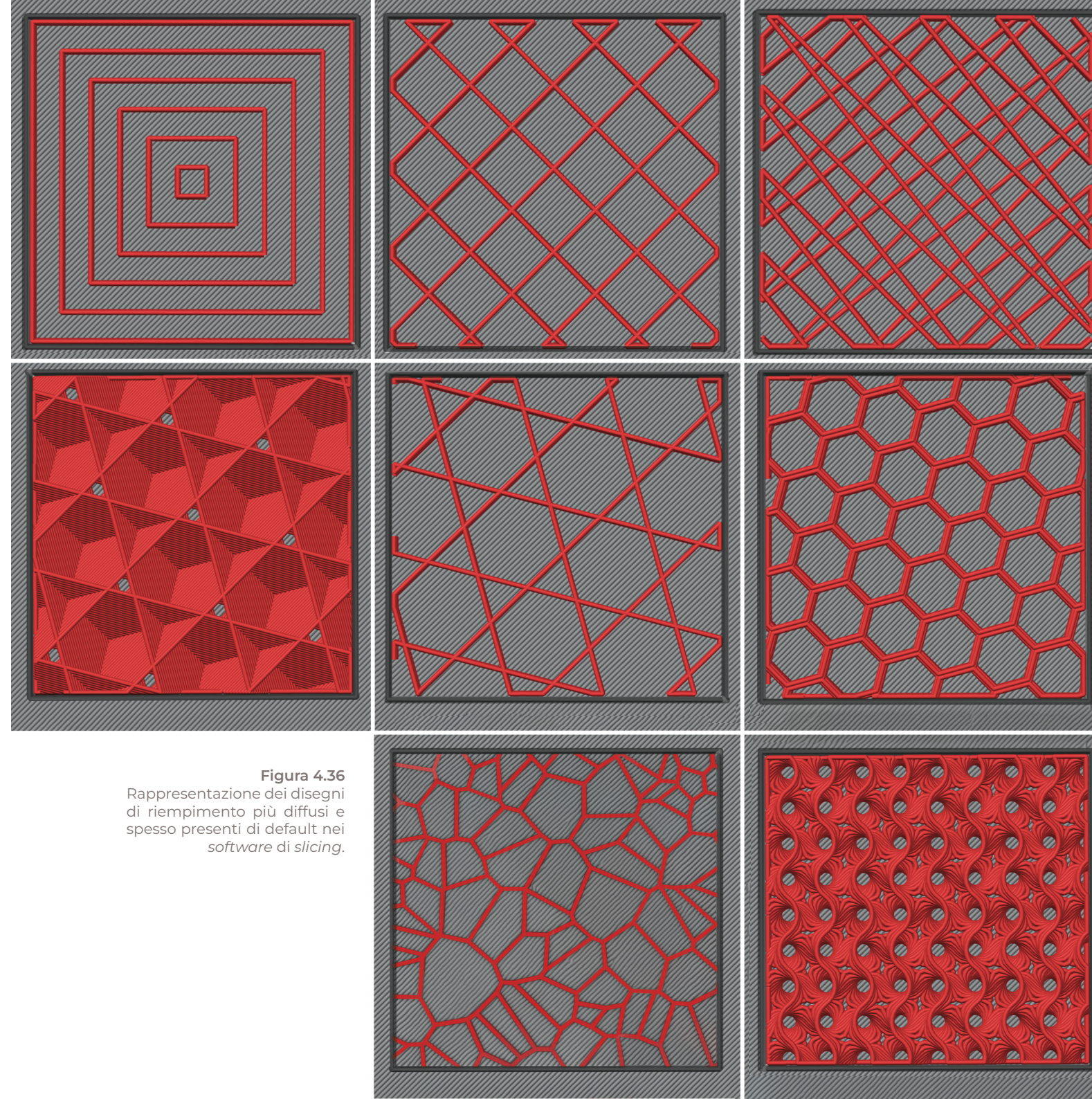


Figura 4.36
Rappresentazione dei disegni di riempimento più diffusi e spesso presenti di default nei software di *slicing*.

Tra le caratteristiche del giroide:

Proprietà quasi isotropiche

Rispetto alla maggioranza degli altri riempi-
menti, l'*infill* giroidale presenta una simmetria
cubica, che garantisce proprietà pressoché con-
gruenti a fronte di carichi applicati sui tre assi
principali. Questa caratteristica è molto vantag-
giosa per componenti soggetti a flessioni multi-
direzionali e migliora le qualità di assorbimento
di carico distribuito, come quello del piede, non-
ché il comfort complessivo.

Ottimo strenght to density ratio

Il valore di resistenza a trazione in rapporto alla
densità del riempimento risulta molto vantag-
gioso

Tempi di slicing più lunghi

Data la complessità geometrica di questo riem-
pimento, i tempi di generazione del *G-code* da
inviare alla macchina sono più dilatati, con un
codice finale di lunghezza maggiore

Vibrazioni in fase di stampa

L'assenza di movimenti rettilinei nella depo-
sizione del filamento fa sì che l'estrusore deb-
ba muoversi sempre in movimenti curvilinei. In
riempimenti ad alte densità, se non ben calibra-
ti, ciò può generare vibrazioni che lasciano difet-
ti sul componente [172, 173].

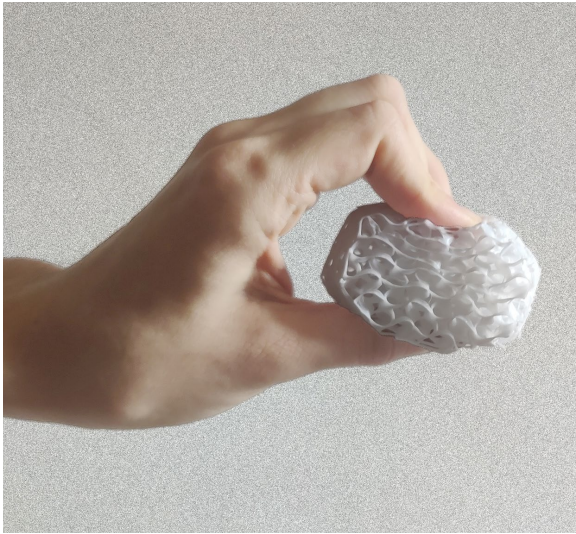
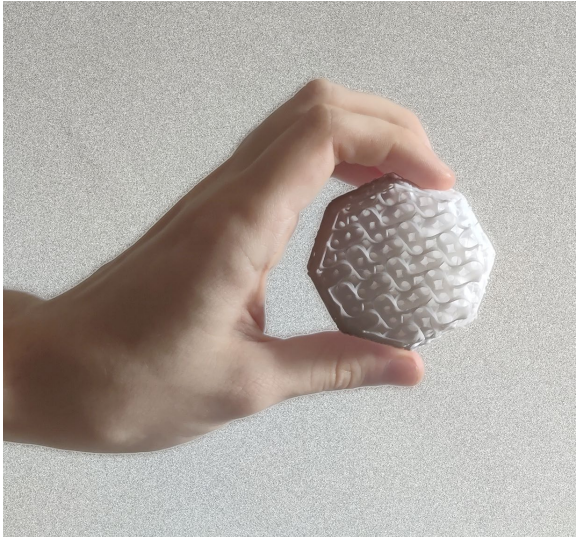


Figura 4.37
La deformazione delle celle con-
sente una distribuzione progressiva
dei carichi, evitando concentrazioni
locali di tensione.

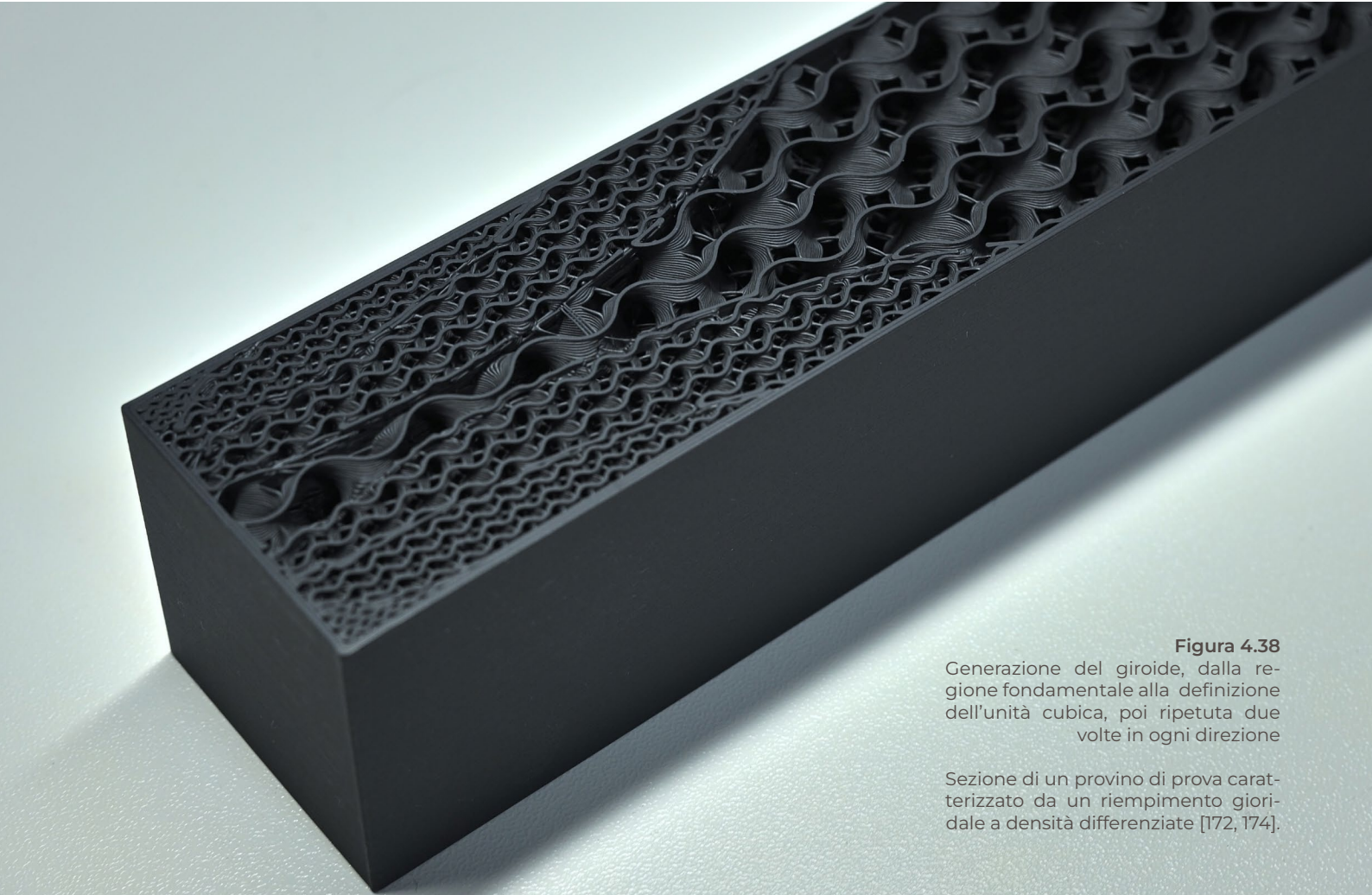
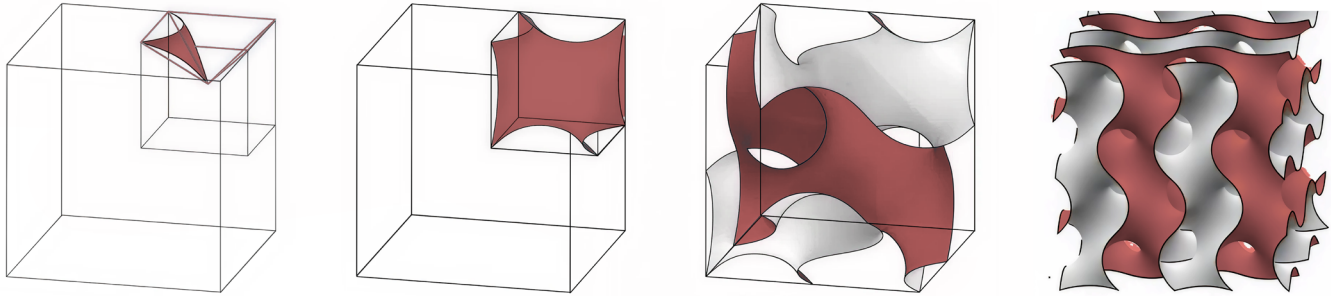


Figura 4.38
Generazione del giroide, dalla re-
gione fondamentale alla definizione
dell'unità cubica, poi ripetuta due
volte in ogni direzione

Sezione di un provino di prova carat-
terizzato da un riempimento giroi-
dale a densità differenziate [172, 174].

IL G-CODE CUSTOM

Questa tipologia di riempimento prevede la personalizzazione completa nel posizionamento del materiale da parte della macchina di stampa. Come per molte altre macchine di fabbricazione, le stampanti 3D operano tramite un linguaggio detto *G-Code* (*Geometry Code*), che fornisce tutte le indicazioni necessarie al processo, tra cui velocità e traiettorie dell’estrusore nel posizionamento o in retrazione, variazioni di temperatura dell’ugello e del letto di stampa. È il *G-Code* a permettere una conversione della geometria 3D del componente in un set di informazioni operative di posizionamento del materiale.

Utilizzando *software* di *slicing*, il *G-Code* viene generato automaticamente sulla base dei parametri di processo desiderati (impostati in interfacce più intuitive rispetto alla scrittura del codice), con un’ottimizzazione definita sulla base del materiale e della stampante in uso.

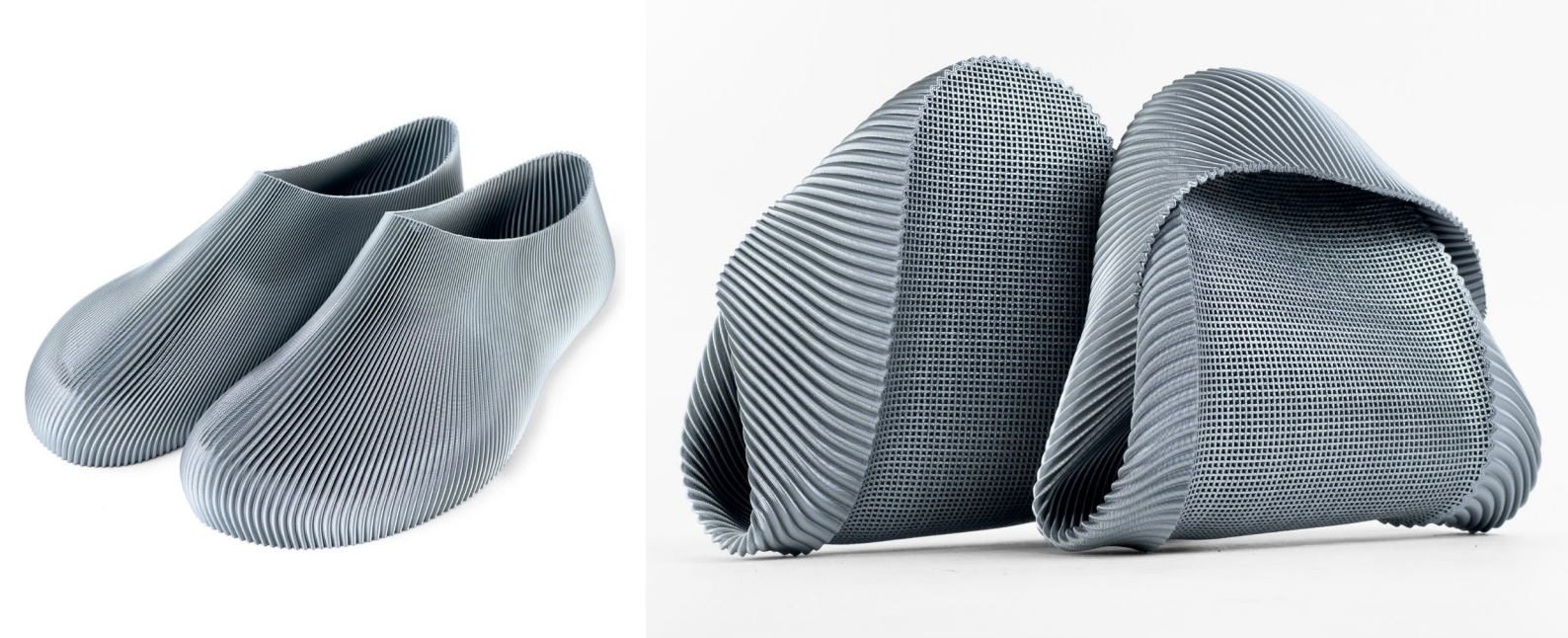
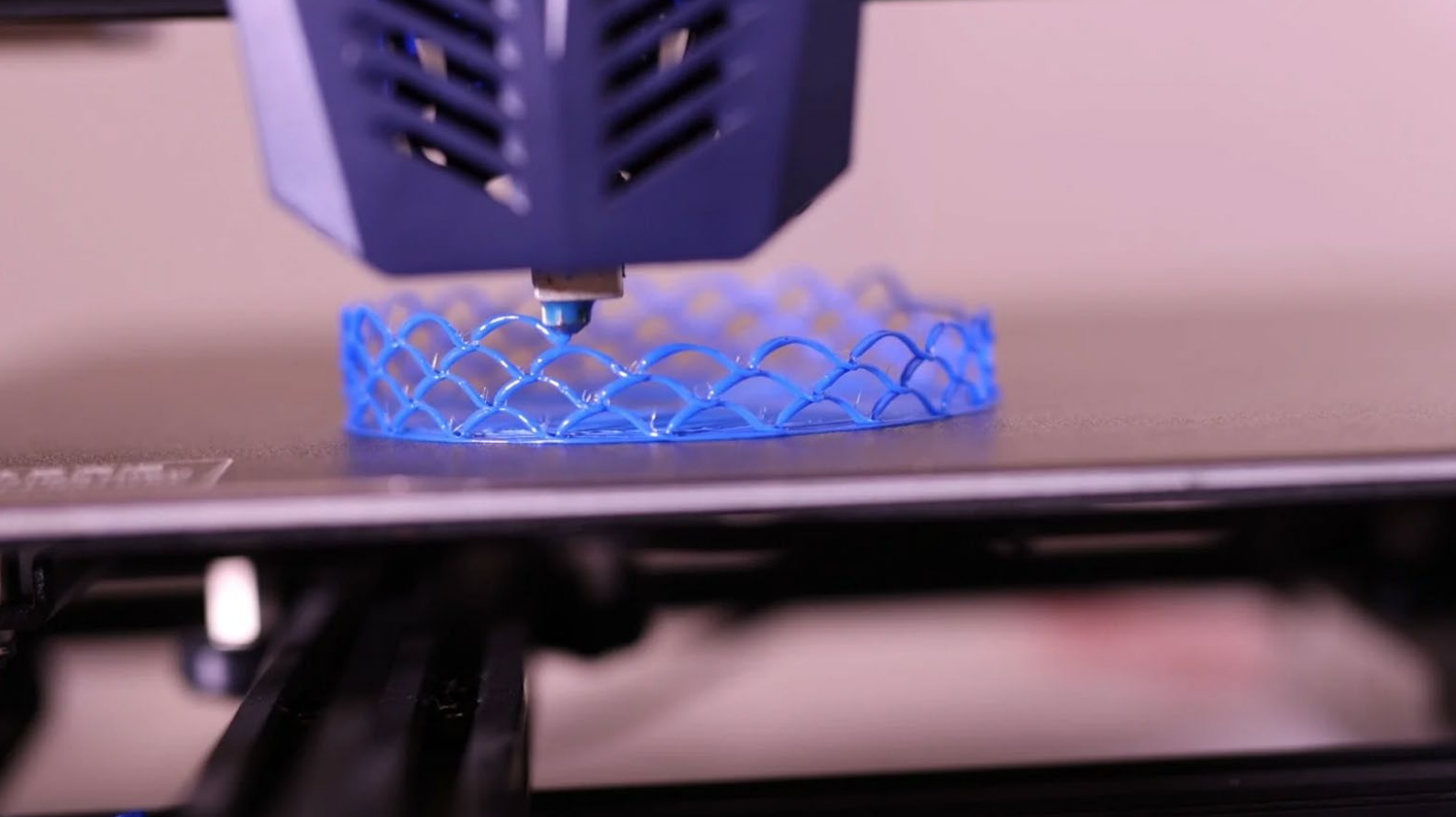
È tuttavia anche possibile scrivere un *G-Code* manualmente o, per geometrie più complesse, tramite script di Python, MATLAB o Javascript oppure, per rimanere nell’ambito della modellazione CAD, tramite Autodesk Fusion, Grasshopper o *plugin* dedicati.

Benché la realizzazione del codice sia più complessa rispetto alla generazione automatica, in questo modo si ottiene più libertà ed un controllo fine dei parametri della macchina, generando nel caso della FDM pareti e *infill* dalle proprietà uniche, spesso non previste nei normali *software* di *slicing*.

In ambito *footwear* si possono riscontrare varie sperimentazioni per calzature *barefoot*, in cui la minimizzazione dello spessore delle pareti arriva anche a generare soles alte uno o due *layer*; questo approccio è anche utile per la generazione di tomaie traspiranti simili a *mesh*, che richiedono molta precisione nei movimenti dell’ugello per mantenere la trama costante [fig. 4.39].

Figura 4.39
La Onda Barefoot, tramite l’elaborazione di un *G-code custom*, è realizzata minimizzando gli spessori del componente, fornendo al piede la massima sensibilità rispetto al suolo. Ogni parete è composta da 1-4 *layer*, variando lo spessore da 0.6 a 2.5 mm.

La complessità principale risiede nella gestione dei bridge e delle regioni in sbalzo della geometria, che non sarebbero stampabili con successo adottando le impostazioni standardizzate dei *software* di *slicing*. Il risultato è una calzatura estremamente flessibile, più simile ad un calzino che ad una scarpa tradizionale [176-177].



4.8 Altri parametri rilevanti

Una volta definite le tipologie di riempimento, due ulteriori parametri permettono di sfruttare in modo efficace la personalizzabilità della stampa 3D:

Variazione di densità

Questo valore si riferisce alla quantità di riempimento in rapporto al volume interno della geometria e solitamente è espresso in percentuale; ad esempio, un riempimento del 100% rappresenta un volume completamente solido, mentre al 50% indica una struttura interna costituita per metà da riempimento. Per garantire morbidezza nella calzatura, al netto delle proprietà dell'elastomero utilizzato, generalmente non viene superato il 30% di *infill*. Valori di densità maggiori determinano celle più piccole e compatte, con un complessivo irrigidimento della struttura.

Spessore delle pareti

Grandezza che indica la quantità di loop perimetrali compiuti dall'estrusore. Più *loop* conferiranno un maggiore spessore dello strato esterno, aumentando la rigidità del componente ma irrobustendolo a fronte di possibili danneggiamenti superficiali.

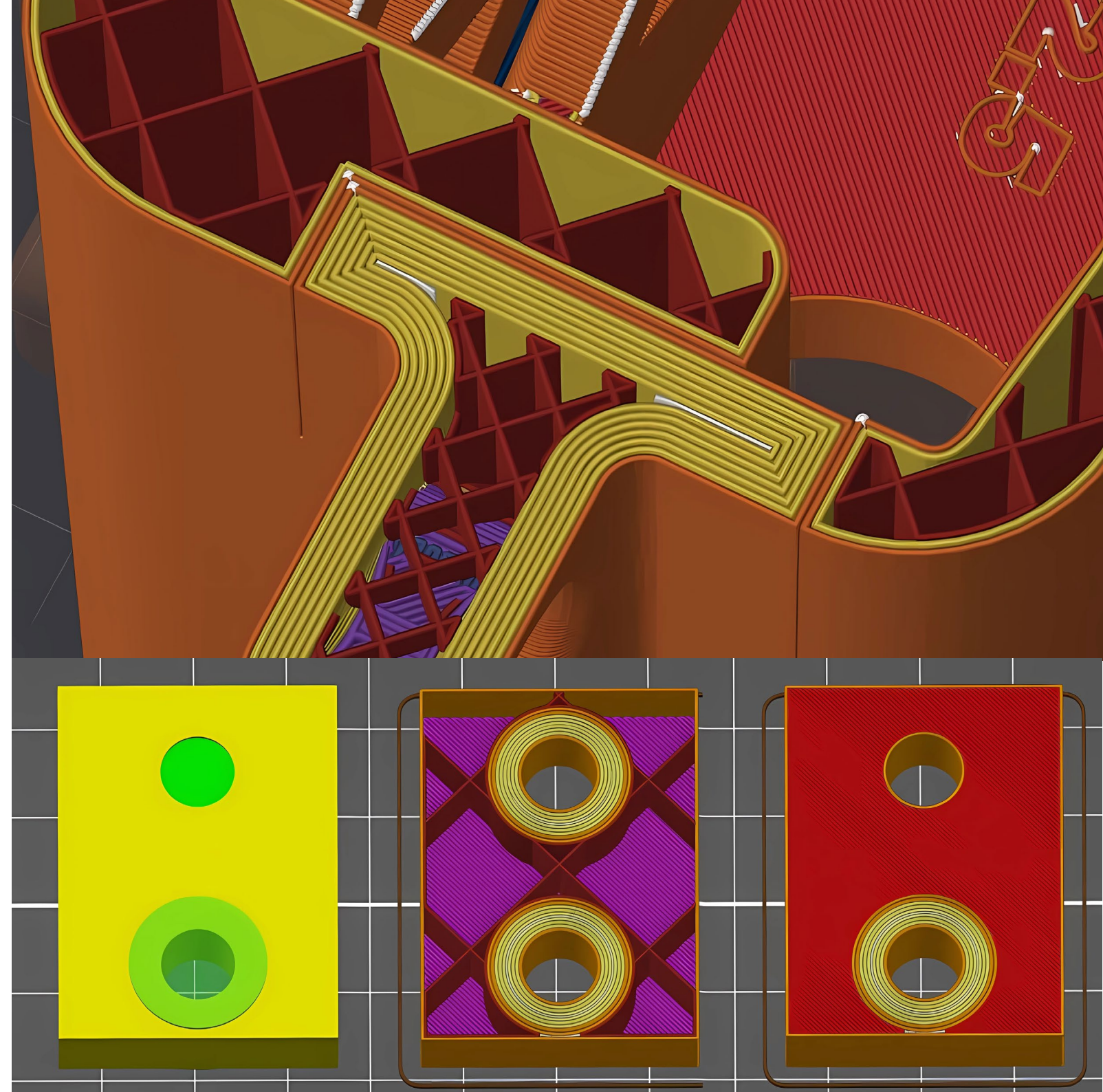
I MODIFICATORI

Analogamente a come è possibile fare nei software CAD parametrici, anche dai *software* di *slicing* le strutture *lattice* possono presentare variazioni localizzate in determinate regioni dei componenti [fig. 4.40].

Ciò è possibile tramite i modificatori, ovvero porzioni di volume dell'oggetto contrassegnate, per le quali è possibile alterare molti parametri di stampa rispetto al resto del modello, tra cui la densità interna, lo spessore delle pareti, geometria di riempimento, velocità di stampa o qualità superficiale.

In questo modo è possibile, ad esempio, irrobustire sezioni sottili della suola per evitare danneggiamenti dopo cicli ripetuti di flessione, ammorbidire zone in cui è necessaria maggior compressione delle celle o rallentare la stampa in aree più complesse geometricamente.

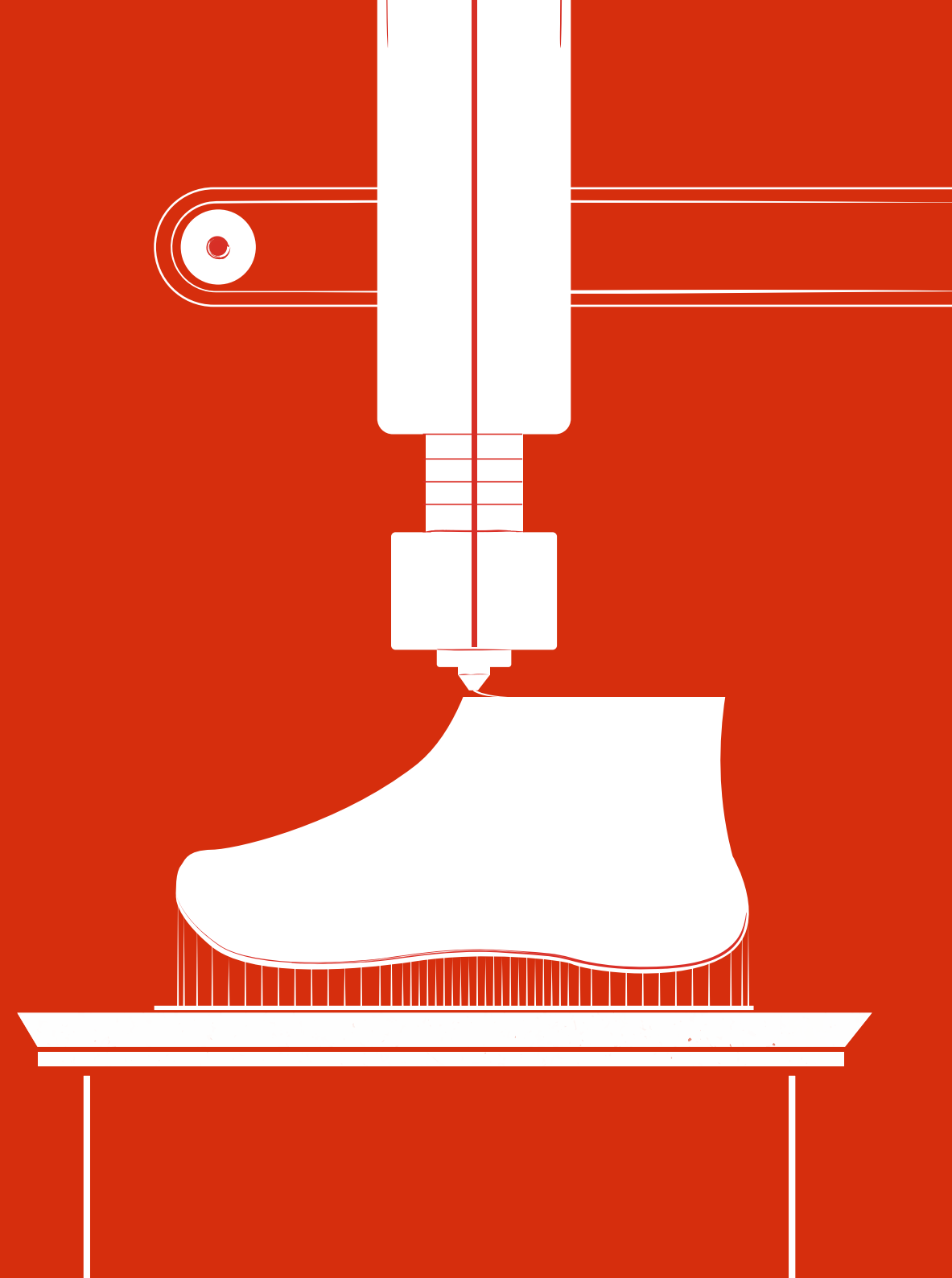
Figura 4.40
Due componenti visualizzati da uno *slicer*. Si può notare come il riempimento e gli spessori delle pareti varino a seconda della regione. In verde sono indicati i modificatori cilindrici posizionati sul secondo oggetto [178, 179].



FOOTWEAR MODULARE

La modularità nel *footwear* propone una concezione della calzatura come sistema riconfigurabile, nel quale componenti differenti possono interagire attraverso logiche di assemblaggio varia natura. Questo approccio introduce nuove possibilità progettuali, ma anche specifiche criticità tecniche ed espressive che è necessario affrontare.

05



5.1 Il concetto di modularità

**“La proprietà di essere costituito da parti distinte che, una volta unite, formano un insieme completo.”
Cambridge Dictionary [180]**

Più nello specifico, in ambito di design del prodotto si intende:

“(...) un tipo di prodotto composto da componenti o moduli intercambiabili o staccabili. Questi moduli possono essere combinati o configurati in modi diversi per creare varie configurazioni o varianti del prodotto, al fine di soddisfare le esigenze o le preferenze specifiche dei clienti.

**I prodotti modulari offrono flessibilità, personalizzazione e scalabilità, consentendo agli utenti di adattare il prodotto alle proprie esigenze senza dover ricorrere a personalizzazioni o redesign complessi.”
VividWorks [181]**

Costituisce un approccio che può essere adottato puramente dal punto di vista produttivo (ad esempio, tramite l'impiego di componenti modulari in una stessa famiglia di prodotti per standardizzarne l'architettura e l'assemblaggio),

ma anche come strategia orientata all'intercambiabilità dei moduli durante l'intero ciclo di vita del prodotto [fig.5.1].



Figura 5.1

Tra gli esempi di prodotti modulari: il sistema di mattoncini Lego (1958), la giacca realizzata da Jonathan Ive per Moncler (2024) ed il Fairphone (2013), che consente anche all'utente finale di aggiornare i componenti interni [182-184].

5.2 Vantaggi e limiti della modularità nel footwear

VANTAGGI

I maggiori benefici emergono nelle tipologie di prodotto pensate per avere una vita utile molto estesa, nella quale alcuni componenti sono soggetti a livelli di usura significativamente maggiori e più frequenti rispetto agli altri. Le calzature rientrano pienamente in questa categoria, vedendo tra i potenziali vantaggi:

■ Possibilità di riparazione

L'adozione della modularità consente di introdurre logiche di *component regeneration*: elementi ad alto deterioramento, come suole o tacchi, possono essere sostituiti conservando la tomaia ed il telaio strutturale della scarpa, evitando così l'*early disposal* dei componenti ancora funzionali.

■ Personalizzazione funzionale

La sostituzione dei moduli può permettere di modificare le prestazioni della calzatura in funzione del contesto d'uso. Ad esempio sarebbe possibile aumentare o diminuire la traspirabilità del prodotto a seconda del clima, modificare la rigidezza o la capacità della suola di assorbimento degli impatti oppure sostituire i metodi di chiusura, rendendo l'utilizzo autonomo della scarpa più accessibile per determinati bacini di utenza.

■ Aggiornabilità

In comparazione ad una linea produttiva tradizionale, l'aggiornamento di singoli componenti risulta più rapido, economico e finanziariamente meno rischioso rispetto all'introduzione sul mercato di una nuova calzatura completa. Il produttore può quindi proporre variazioni del prodotto senza dover riprogettare integralmente l'architettura della scarpa, rispondendo alla domanda del mercato più rapidamente e offrendo soluzioni personalizzate per determinate nicchie di utenti [185].

■ Personalizzazione espressiva

In un contesto nel quale sempre più soluzioni configurabili, personalizzabili direttamente dall'utente o sulla base dei dati inerenti ai suoi comportamenti d'acquisto, emergono nei beni proposti sul mercato, le calzature rappresentano una categoria particolarmente sensibile a queste dinamiche.

Oltre al valore puramente funzionale, infatti, ogni scarpa si colloca all'interno di uno spettro espressivo che la rende più o meno adatta a specifici contesti d'uso (formali, casual, sportivi ecc.) e più o meno coerente con il resto dell'abbigliamento dell'utente [Fig 5.2].

Per questo motivo, solitamente, i consumatori acquistano più paia di scarpe rispetto a quelle strettamente necessarie, costruendo un assortimento differenziato per colori, materiali, finiture, architetture ed espressività complessiva.

Un sistema modulare permette di incarnare questa variabilità in una famiglia di componenti intercambiabili, incentivando l'acquisto di singoli componenti anziché di nuove calzature complete.

■ Riduzione dell'impatto ambientale

Le istanze sopra elencate incidono direttamente anche sul potenziale beneficio ambientale di questo tipo di prodotto. L'estensione della vita utile della calzatura (oltre quella dei singoli componenti) attraverso pratiche di riparazione, aggiornamento e riconfigurazione espressiva potrebbe generare ingenti risparmi sull'investimento di materiale, diminuendo, complessivamente, il numero di scarpe acquistate dal consumatore nel tempo.



Figura 5.2

Gli utenti tendono a possedere diverse calzature nel proprio guardaroba, per adattarsi a contesti d'uso, esigenze funzionali ed espressive differenti [186].

LIMITI

Allo stesso tempo, trattandosi di un ambito sperimentale non pienamente esplorato all'interno del mercato effettivo, questo approccio presenta una serie di limiti progettuali, produttivi e culturali, tra i quali:

Vincoli formali

L'utilizzo di un sistema di collegamento più articolato della cucitura o incollaggio tradizionali comporta generalmente vincoli di tipo:

- **espressivo**, come la presenza evidente di elastici, giunzioni o strutture *shell*;
- **dimensionale**, con l'uso di collegamenti che, benché nascosti, influiscono sull'ingombro dei componenti; difficilmente, infatti, le interfacce adottate possono essere comparate a quelle, ad esempio, impiegate per un più comune incollaggio;

Limiti funzionali

Ad oggi, la maggior parte delle sperimentazioni si concentra su calzature casual, mentre i contesti ad alte prestazioni risultano ancora poco esplorati (*outdoor, running, skating, antinfortunistica ecc...*); ciò è dovuto alla necessità di soddisfare standard di prestazioni molto elevate (si vedano le normative EN 1392:1998 e EN ISO 17708:2003 [187]), specialmente termini di dimensioni e proprietà meccaniche.

La progettazione di un sistema di collegamento modulare sufficientemente stabile e capace di resistere agli stress tipici di questi contesti rap-

presenta una sfida significativamente più complessa rispetto ai requisiti richiesti da una scarpa *casual*.

Necessità di educazione al consumo

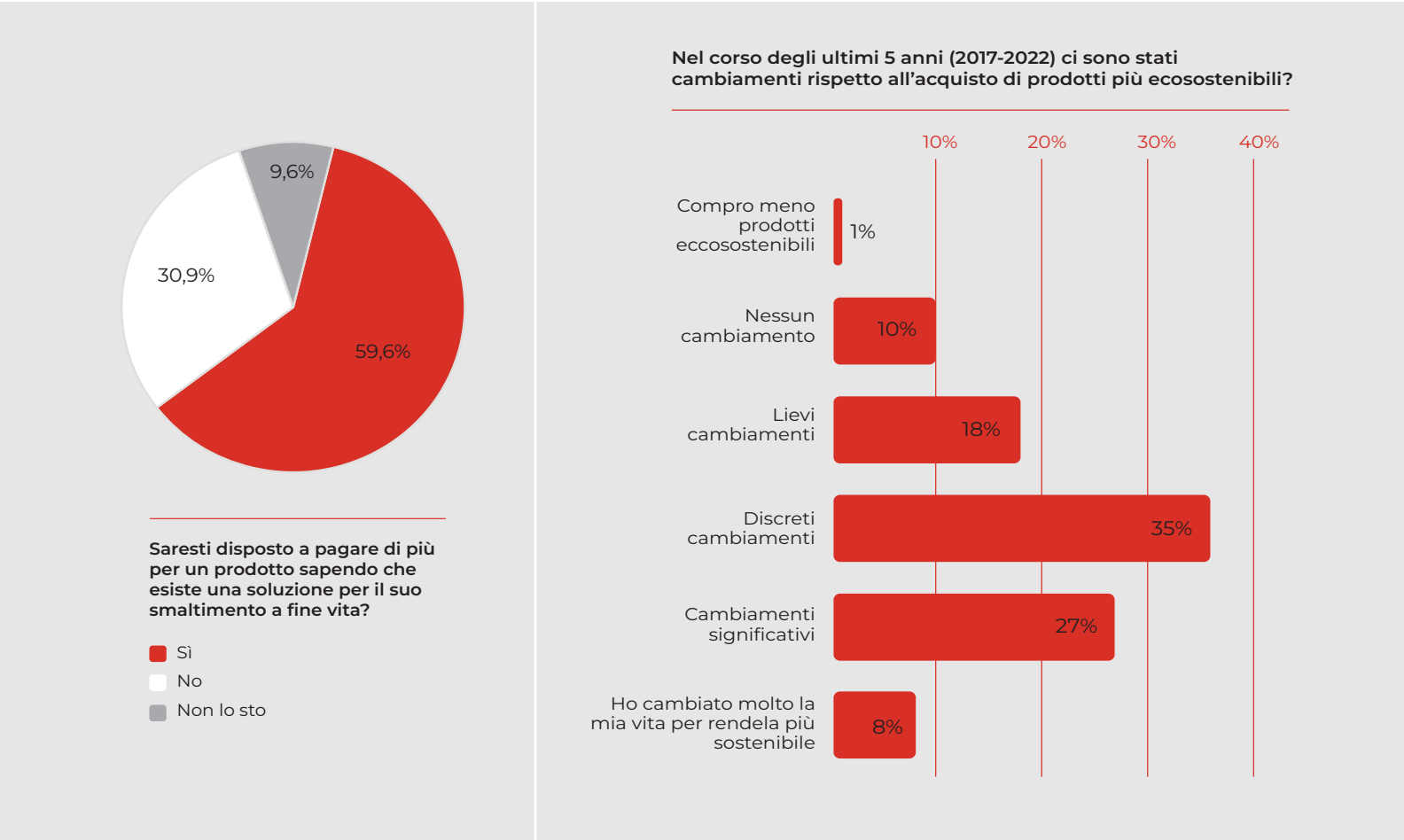
L'introduzione sul mercato di calzature modulari inevitabilmente implica un confronto con i modelli di consumo radicati nell'utenza e con possibili resistenze culturali.

In primo luogo, è necessaria una maggior sensibilizzazione verso pratiche di consumo più consapevoli e, soprattutto, attive: il prodotto non è un bene da fruire passivamente fino al suo smaltimento ma dev'essere percepito come sistema evolutivo in cui rientrano logiche di sostituzione ed aggiornabilità. All'utente è quindi richiesto un grado di coinvolgimento operativo, normalizzando pratiche di manipolazione e riconfigurazione anche al di fuori di contesti specialistici (come da parte di un calzolaio).

In generale, la richiesta di un maggior carico cognitivo nella manutenzione del prodotto rispetto ad una scarpa tradizionale è un fattore da tenere in considerazione, insieme alla necessità per il produttore di rendere comprensibile il metodo di collegamento in modo semplice ed intuitivo.

Va tuttavia osservato come negli ultimi anni si siano consolidati diversi segmenti di mercato disposti ad accettare una maggiore complessità d'uso o costi superiori a fronte di pratiche percepite come più sostenibili [188] [fig 5.3].

Parallelamente, sussiste il rischio che la modularità della calzatura finisca per promuovere le stesse logiche consumistiche e di dipendenza dalle mode che si vedono nel settore tradizionale, con l'acquisto velleitario di nuovi moduli per ragioni legate alle mode del momento, piuttosto che a reali necessità funzionali.



5.3 Tipologie di collegamento

Un approccio modulare alla progettazione in ambito *footwear* è stato estensivamente adottato per efficientare le linee produttive: specialmente all'interno della stessa famiglia di calzature non è raro che vengano proposti modelli che condividono la stessa suola, differenziandosi per la tipologia di tomaia [fig. 5.6]. D'altro canto, sono molto più esigui esempi sul mercato di scarpe che permettano l'interscambiabilità dei moduli sullo stesso prodotto, direttamente da parte dell'utente finale.

A seguito di un'analisi dei prodotti in commercio, in fase di prototipo o di *concept* e dei brevetti disponibili nel pubblico dominio, si possono suddividere le calzature modulari progettate ad oggi sulla base delle tipologie di collegamento più ricorrenti:



Figura 5.4
Spesso le collezioni di scarpe condividono alcuni moduli, variando ad esempio la conformazione della tomaia (in foto: Camper Thelma [189]).

Collegamento con laccio

Questi modelli prevedono l'uso di uno o più lacci in materiali ad alte prestazioni in termini di resistenza a trazione e strappo (spesso nylon o poliestere con rinforzi metallici) come metodo primario di assemblaggio dei componenti. Il laccio è inserito in asole, occhielli o altri tipi di fori nei moduli ed è usato come elemento tensionato per garantire un assemblaggio saldo.

Spesso sono sfruttate anche le proprietà elastiche dei moduli stessi (come "*shell*" di materiale elastomerico che comprime il resto dei componenti), in deformazione durante l'utilizzo.

Si tratta di un metodo diffuso poiché permette di mantenere la monomatericità dei moduli e garantisce una distribuzione delle forze di collegamento lungo direzioni poco contrastate dagli stress propri del ciclo di camminata (ad esempio, le forze parallele al suolo); inoltre, questo sistema può preservare la naturale flessibilità del piede e il laccio risulta un componente semplice da sostituire in caso di deterioramento.

Tuttavia, spesso l'impiego di lacci e moduli elastici in tensione incide significativamente sull'espressività della scarpa, non trattandosi di un collegamento discreto o facilmente occultabile. Inoltre, per ottenere una resistenza adeguata agli stress, è frequentemente necessaria ridondanza nel passaggio dei lacci, dunque l'assemblaggio della scarpa può risultare lungo (incluso più lacci e molti fori), laborioso e poco intuitivo [190-193].



MODULAR SHOES

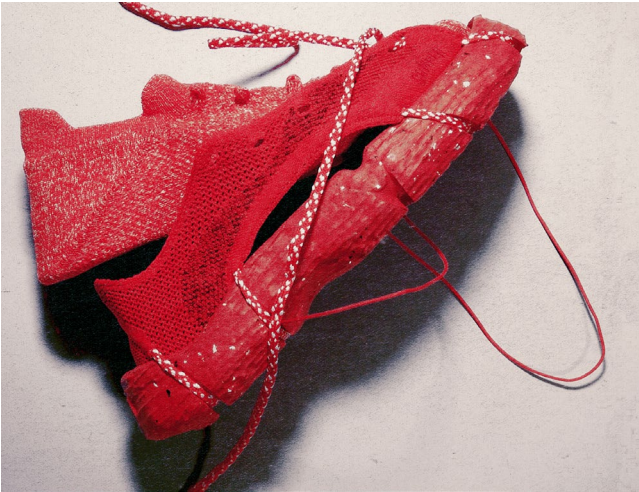
Designer	Noah Zadiman
Anno	2023
Stato	prototipo di designer
Componenti	2 (tomaia con laccio integrato e suola)
Caratteristiche	■ Collegamento con 6 ganci nella suola elastomerica (anteriore, posteriore e laterali)

KI ECOBE

Azienda INNUS KOREA
Anno 2018
Stato commercializzato

Componenti
5 (laccio, soletta, tomaia, suola, telaio elastico esterno)

- Caratteristiche
- Uso di uno *shell* elastomerico come elemento di compressione di tutti i componenti
 - Incastro dei tasselli nella suola nei corrispettivi fori del telaio



ROKU

Azienda Camper
Anno 2024
Stato commercializzato

Componenti
6 (suola, telaio, intersuola, tomaia, 2 lacci)

- Caratteristiche
- Gestualità di montaggio che richiama quella del cucito
 - Passaggio dei lacci in 5 canali sotto la suola per maggior stabilità
 - Realizzata anche con scarti e sottoprodotti pre-consumo



Collegamento con fessure nella suola

Questo metodo adotta dei fori o tagli di flessione nella suola come interfaccia in cui incastrare gli altri componenti (tomaia e intersuola possono essere solidali o indipendenti). La forza peso dell'utente contribuisce a consolidare il collegamento, garantendo sufficiente stabilità; anche in questo caso la suola ha spesso il ruolo di *shell* esterno.

Il sistema risulta relativamente semplice, adatto anche a componenti monomaterici; l'affidabilità deriva dal fatto che le forze coinvolte nel ciclo di camminata non stressano eccessivamente il collegamento. È necessario però che i moduli presentino adeguata resistenza a trazione, strappo e *creep*.

I principali limiti derivano dalla difficoltà di rendere il collegamento rapido e agevole in fase di assemblaggio oltre che dal forte vincolo formale ed espressivo imposto dalla suola-guscio; quest'ultima, inoltre, può limitare la flessibilità del piede [194,195].



NIKE ZVEZDOCHKA

Designer Mark Newson
Anno 2005
Stato commercializzato

Componenti
3 (shell, tomaia, suola)

- Caratteristiche**
- Espressività legata alla space age degli anni Sessanta
 - Uso di del metodo di collegamento come motivo estetico e decorativo



JOON

Designer Clement de Cooman
Anno 2024
Stato prototipo di designer

Componenti
2 (tomaia-intersuola e suola)

- Caratteristiche**
- Uno dei pochi esempi di modularità applicata a scarpe eleganti e semi-formali
 - La stessa suola può essere applicata per tomaie stile *derby*, mocassino o stivaletto



Incastro elastico della suola

In questa categoria rientrano le calzature che prevedono l'aggiunta della suola tramite una lieve deformazione elastica dei componenti in fase di assemblaggio e separazione.

Possono essere presenti denti e tassellature nell'intersuola con cavità corrispondenti nella suola; in altri casi viene adottato un labbro continuo nella suola che, allargandosi elasticamente nell'assemblaggio, permette un collegamento solidale al resto della scarpa. Alcuni modelli si caratterizzano dall'aggiunta di una seconda suola (più voluminosa) sulla scarpa, tramite incastri con il tacco o con il disegno del battistrada; questo funzionamento può potenzialmente rendere i nuovi moduli adatti anche a scarpe precedentemente possedute.

Si tratta di un metodo di semplice utilizzo per l'utente finale, che in alcuni casi può permettere l'aggiunta o rimozione dei moduli anche senza l'uso delle mani.

Tuttavia, la monomatericità dei moduli viene spesso compromessa e, per raggiungere un collegamento sufficientemente saldo, il sistema si irrigidisce sensibilmente, limitando la fluidità della rullata del piede. Ciò è dovuto al fatto che le forze generate nel ciclo di camminata tendono a contrastare fortemente il collegamento, rendendo necessarie molte accortezze formali per evitare rimozioni involontarie dei moduli [196-198].



MUVEZ FOOTWEAR

Designer Ryan Cruz
Anno 2013
Stato commercializzato

Componenti
2 (scarpa e suola aggiuntiva)

- Caratteristiche**
- È previsto un uso domestico della scarpa senza suola, aggiungendola per gli spostamenti fuori casa
 - Possibilità di rimuovere la suola usando solo i piedi

DERBY 1017 ALYX 9SM

Azienda 1017 ALYX 9SM
Anno 2019
Stato commercializzato

Componenti
2 (scarpa e suola aggiuntiva)

- Caratteristiche**
- Aggiunta di una suola Vibram elastomerica
 - Gioco espressivo sul contrasto tra eleganza e performance



GLIDE SHOES

Designer Tim Pearce
Anno 2023
Stato commercializzato

Componenti
2 (scarpa e suola aggiuntiva)

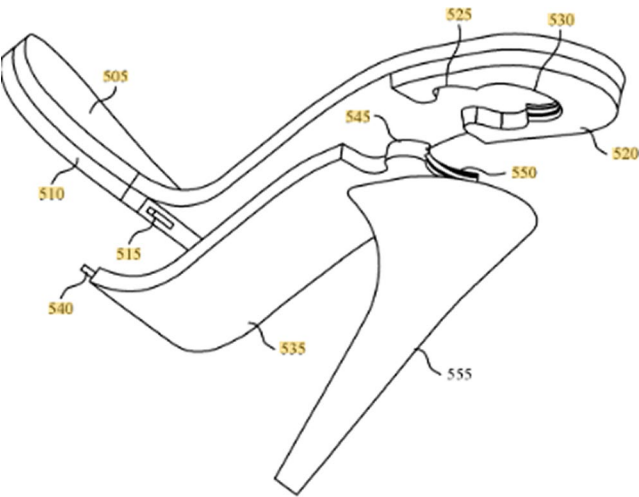
- Caratteristiche**
- Il modulo è utilizzabile anche con varie sneakers diffuse sul mercato, per proteggere la suola originale



Incastro a baionetta

Il metodo è contraddistinto dalla rotazione di uno o più moduli, con conseguente incastro a baionetta grazie alla geometria dei componenti. Si tratta di un collegamento particolarmente saldo, poiché ostacolato solamente dai movimenti rotativi del piede, di entità minore rispetto alle forze di *peel* o di scorrimento parallelo.

Benché possano essere integrati ulteriori sistemi di sicurezza o ridondanza, tendenzialmente le azioni di inserimento e rimozione risultano rapide. I vincoli principali si riscontrano nell'ingombro del sistema e nella necessità di componenti multimaterici piuttosto complessi, che richiedono un movimento preciso e tolleranze contenute. Inoltre, il collegamento tende ad irrigidire la scarpa, perciò attualmente gli impieghi sono limitati a modelli con tacco alto [199, 200].



PASHION FOOTWEAR

Designer Haley Pavone
Anno 2017
Stato commercializzato

- Componenti**
3 (tomaia-suola, piastra di supporto rigida, tacco)
- Caratteristiche**
- Uno dei pochi esempi di variazione del profilo nel cambio dei moduli (da scarpa con tacco a scarpa bassa)
 - Uso di un incastro a molla insieme a quello a baionetta



Collegamento con cerniera lampo

Principio di funzionamento adottato da varie *sneakers* presenti sul mercato, basato sull'utilizzo di una zip per collegare la suola ed i moduli della tomaia.

Si tratta di un sistema relativamente stabile e semplice da comprendere per l'utenza finale. Persistono tuttavia limitazioni formali e legate all'impermeabilità, oltre alla necessità di componenti multimateriali [201].



ACBC ZIP SHOES

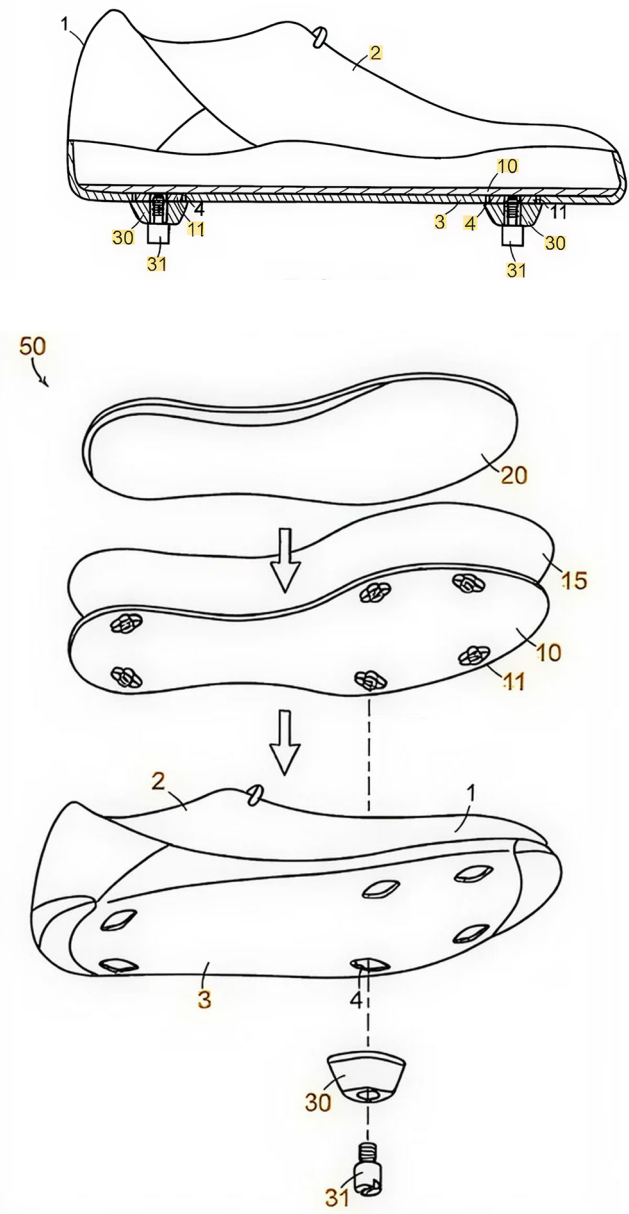
Designer Gio Giacobbe ed Edoardo Iannuzzi
Anno 2022
Stato commercializzato

- Componenti**
2 (tomaia e suola)
- Caratteristiche**
- Variazione dell'altezza della tomaia e del suo metodo di chiusura

Collegamento con perni removibili

Sistema ipotizzato per scarpe da calcio (sfruttando la presenza dei tasselli rigidi), nel quale dei perni filettati assemblano l'architettura multistrato della scarpa.

Si tratta di un collegamento molto stabile, ma che richiede l'uso di inserti metallici e, complessivamente, un sensibile irrigidimento del prodotto; ciò rende questo approccio poco esplorato nell'ambito delle calzature *casual* [202].



MODULAR SHOE - US7730637B2

Designer Wolfgang Scholz
Anno 2004
Stato brevetto
Componenti
4 (tomaia, suola, tacchi e viti)
Caratteristiche
■ Brevetto inerente a scarpe da calcio

Collegamento con bottoni e magneti

Si tratta di un sistema spesso impiegato in modo complementare ad altri collegamenti, per stabilizzare zone specifiche della calzatura (punta, tallone...) tramite l'utilizzo di fettucce, fori di passaggio, bottoni e magneti.

Risulta adatto principalmente a scarpe auto-costruite, calzature casual a basse *performance* o sandali, essendo semplice da realizzare e, per l'utente, facile da comprendere ed utilizzare, benché meno stabile rispetto ad altri metodi [203].



UP PART

Designer Lucille Nguyen
Anno 2018
Stato prototipo di designer

Componenti
6+ (suola, tomaia, alette laterali, linguetta posteriore, lacci, bottoni)
Caratteristiche
■ Calzature ispirate al mondo dell'edilizia prefabbricata
■ Sistema a griglia e clip

Collegamento con interfaccia interbloccante

È una tecnologia di collegamento poco esplorata, attualmente ipotizzata solo con sistemi *hook and loop* basati su *Velcro* convenzionale da abbigliamento.

Richiede accortezze costruttive volte ad evitare un alto irrigidimento della suola oltre che a ridurre l'esposizione dell'interfaccia con sporco e agenti atmosferici (con conseguente deterioramento e peggioramento delle performance di adesione).

Al netto di questi vincoli, i vantaggi sono da ricercarsi nella semplicità di utilizzo e nell'ingombro limitato, in particolare dal punto di vista dello spessore [204].

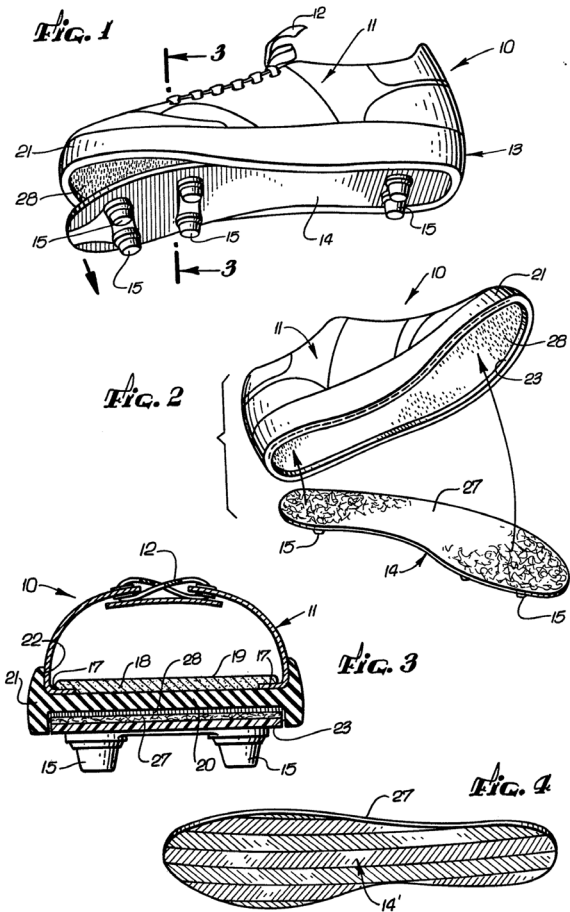
SHOE WITH RECESSED REMOVABLE SOLE - EP0153136A2

Designer Richard Hertz
Anno 1985
Stato brevetto

Componenti
2 (tomaia e suola)

Caratteristiche

- Sistema *hook and loop* posto su tutta la superficie della scarpa



COLLEGAMENTO A LACCIO

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Adatto a componenti monomaterici▪ Discreta stabilità▪ Alta manutenibilità▪ Versatilità | <ul style="list-style-type: none">▪ Complessità di assemblaggio▪ Limitazioni formali ed espressive |
|---|---|

COLLEGAMENTO CON CERNIERA LAMPO

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Rapidità di assemblaggio▪ Uso intuitivo | <ul style="list-style-type: none">▪ Inadatto a componenti monomaterici▪ Bassa versatilità |
|--|--|

COLLEGAMENTO CON FESSURE NELLA SUOLA

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Adatto a componenti monomaterici▪ Elevata stabilità, consolidamento durante il passo | <ul style="list-style-type: none">▪ Irrigidimento complessivo▪ Assemblaggio poco agevole▪ Bassa versatilità espressiva |
|---|--|

COLLEGAMENTO CON PERNI REMOVIBILI

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Elevata stabilità | <ul style="list-style-type: none">▪ Inadatto a componenti monomaterici▪ Elevato irrigidimento complessivo▪ Bassa versatilità▪ Aumento del peso▪ Disassemblaggio lungo |
|---|---|

INCASTRO ELASTICO DELLA SUOLA

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Semplicità formale▪ Assemblaggio rapido e intuitivo▪ Alta versatilità espressiva▪ Usabilità senza mani▪ Adatto a componenti monomaterici | <ul style="list-style-type: none">▪ Irrigidimento complessivo▪ Minor stabilità, contrastata durante il passo |
|--|---|

COLLEGAMENTO CON BOTTONI E MAGNETI

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Semplicità di assemblaggio▪ Accessibile per prodotti DIY▪ Utile come sistema ausiliario | <ul style="list-style-type: none">▪ Bassa stabilità▪ Limitazioni formali ed espressive |
|---|---|

INCASTRO A BAIONETTA

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Elevata stabilità | <ul style="list-style-type: none">▪ Complessità formale▪ Tolleranze costruttive strette▪ Inadatto a componenti monomaterici▪ Irrigidimento complessivo |
|---|---|

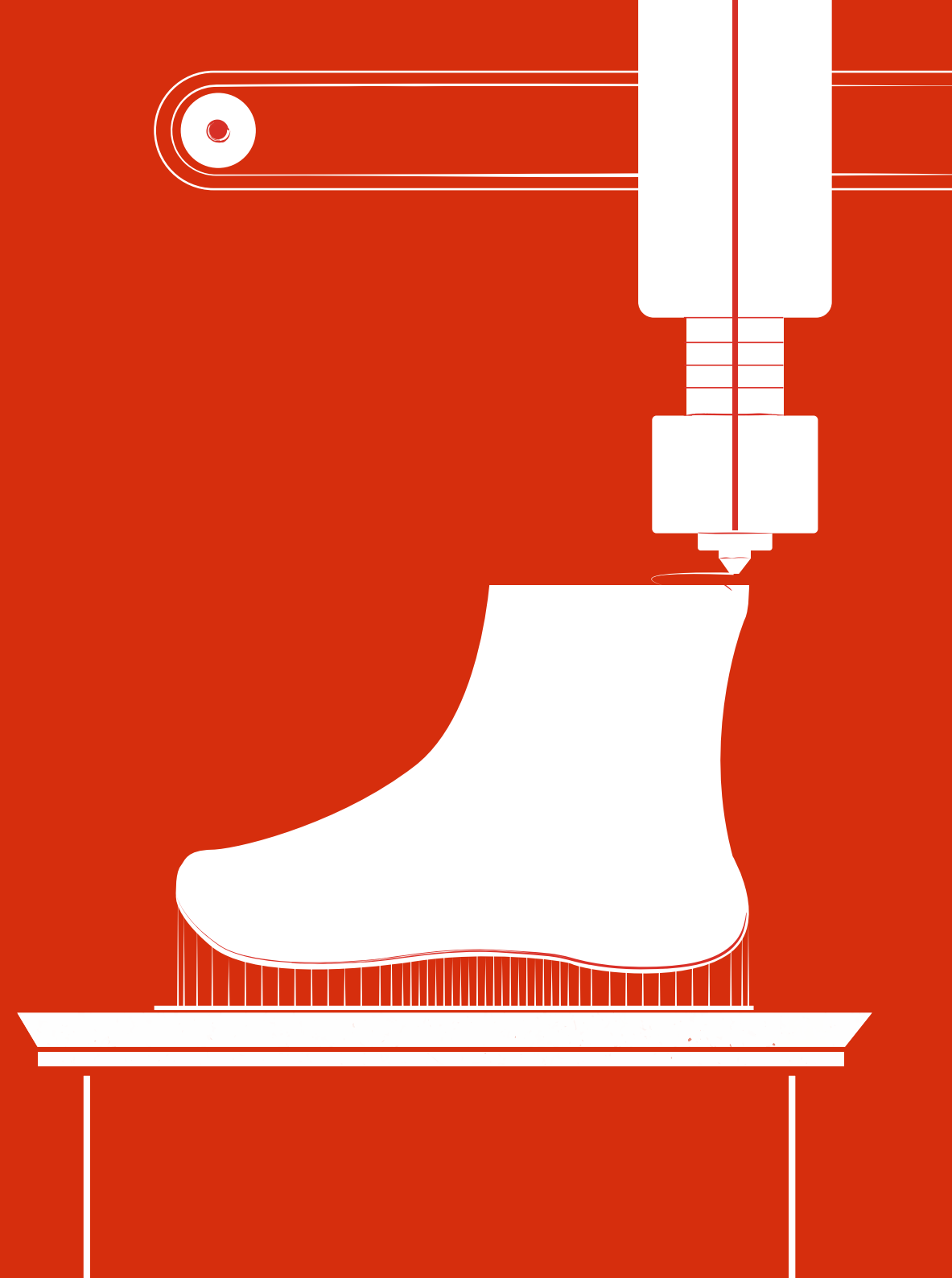
COLLEGAMENTO CON INTERFACCIA INTERBLOCCANTE

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Semplicità e rapidità di assemblaggio▪ Spessore limitato▪ Distribuzione dei carichi | <ul style="list-style-type: none">▪ Minore stabilità▪ Suscettibilità a sporco ed usura▪ Inadatto a componenti monomaterici |
|---|--|

SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE

La ricerca si concentra sulla definizione della proposta progettuale. Attraverso l'individuazione del *concept*, del target di riferimento e delle esigenze da soddisfare, vengono delineati i principi che guidano il sistema sviluppato.

06



6.1 Definizione del concept

L'analisi precedente ha permesso di raccogliere una massa sufficiente di dati relativi alla fabbricazione additiva applicata al *footwear*, con una consapevolezza dello stato di avanzamento nei diversi settori; è stato poi introdotto l'approccio modulare per fornire al prodotto maggior valore aggiunto rispetto alle calzature tradizionali. Il successivo obiettivo della tesi è quindi applicare le nozioni raccolte in un *concept* che rappresenti una possibile strada di sviluppo nell'ambito del *footwear*.

Nello specifico, la domanda di progetto è definibile come:

Progettazione di un sistema di scarpe modulari con componenti stampati in 3D, che permetta la sostituzione dei componenti per variare le caratteristiche funzionali ed espressive della calzatura.

6.2 Definizione del target

Nelle fasi iniziali della progettazione, sono state prese in considerazione diverse tipologie di utenza che potessero beneficiare di una calzatura modulare.

Tra le prime tipologie di target considerate:

NOMADI DIGITALI

Un'utenza nella fascia d'età tra i 25 e i 35 anni abituata a viaggiare, spostandosi sia in centri abitati che in aree immerse nella natura; molti nomadi vivono in camper e van assemblati o modificati *ad hoc* e frequentano spazi di *coworking*. I problemi identificati riguardano la scarsità di spazio disponibile e la necessità di scarpe per più tipi di ambienti, dentro e fuori il van.

Una scarpa modulare con componenti adatti a renderla una *sneaker* casual, uno stivale da montagna, una ciabatta da interno ed un sandalo potrebbe risolvere queste necessità, risultando anche producibile in 3D nei *makerplace* e *Fablab* diffusi sul territorio. Il principale limite legato a questo *target* è dovuto alla buona risposta all'ottimizzazione dello spazio ed alla versatilità funzionale, mentre risulta meno rilevante la possibilità di variazione espressiva della calzatura [fig 6.1].



Figura 6.1

La vita in van impone un approccio minimalista alla quotidianità, prediligendo prodotti compatti e multi-funzionali [205, 206].

SKATER

Ragazzi e ragazze di 12-25 anni, spesso incuriositi da novità nel mondo dell'abbigliamento funzionale. Data la facilità con cui le sollecitazioni dello *skate* causano un consumo localizzato delle calzature, (*ollie zone*, *toe drag area*, lacci, *sidewall* interno), una scarpa modulare garantirebbe la sostituzione dei singoli componenti, allungando sensibilmente la vita complessiva della scarpa (rispetto agli incollaggi multiuso attualmente adottati).

Oltre a ciò, il target risulta aperto ad innovazioni tecnologiche volte a migliorare l'esperienza d'uso con la tavola. Tuttavia, i limiti principali risiedono nelle capacità di *grip* delle scarpe stampate in 3D e nella resistenza all'abrasione superficiale, tipica di un contesto fortemente stressante come quello dello *skate* [fig. 6.2].



BALLERINE E BALLERINI

Data la frequente sostituzione delle calzature da parte dei ballerini di danza classica, con un passaggio da mezze punte con suola intera, a suola spezzata e poi a scarpe da punta, un paio di scarpe modulari permetterebbe di sostituire i componenti usurati e di adattarsi gradualmente alle capacità dell'utente (come tipologia e rigidità).

Inoltre, sarebbe possibile integrare tecnologie di scansione 3D per avere una calzatura perfettamente aderente al piede, con vantaggi economici rispetto alle scarpe tradizionali (sostituite mediamente ogni 3-6 mesi) elevati.

Ciononostante, questa soluzione progettuale dovrebbe confrontarsi con i processi di produzione delle scarpe da danza attuali, fortemente artigianali e radicati nella tradizione, oltre che con la ridotta dimestichezza del target con la fabbricazione additiva.

Figura 6.2
L'esecuzione di *trick* con la tavola da *skate* determina spesso un'usura localizzata in poche specifiche aree della scarpa, richiedendo perciò riparazioni temporanee o la sostituzione dell'intero prodotto [207].

SOTTOCULTURE UNDERGROUND

Un'ultima utenza esplorata è rappresentata da giovani appartenenti a culture underground (*goth*, *punk*, *alt* ecc...), abituati a usare tipologie di scarpa diversa in base all'occasione (stivali alti, *platform shoes*, scarpe a suola bassa per la *routine* quotidiana...) [fig. 6.3]

Siccome le scarpe alte dopo molte ore di utilizzo creano fastidio ai piedi ed alla schiena, una scarpa modulare permetterebbe di sostituire la suola negli spostamenti e quando l'utente ne sente la necessità, passando a moduli più comodi; inoltre, questo approccio permetterebbe una personalizzazione estetica sullo stesso "corpo scarpa" principale, aggiornando i componenti ed aggiungendo accessori momentaneamente.

Nonostante l'utenza sia vicina alla sfera del *DIY* e dell'autoproduzione, il limite principale è rappresentato dalla forte specificità del target .



AMPLIAMENTO DEL TARGET

Dei primi potenziali target esplorati, l'ultimo è stato ritenuto più interessante, data la forte correlazione tra qualità estetiche e funzionali determinata dalla sostituzione dei moduli.

Tuttavia, la fascia di utenza è stata successivamente ampliata, includendo un target femminile meno circoscritto; l'obiettivo della progettazione è quindi passato alla definizione di un *output* adatto ad un pubblico universale, caratterizzato principalmente da apertura alla sperimentazione e sensibilità alle tematiche ambientali.

Si è quindi passati dalla progettazione di un prodotto riferito ad una sottocultura specifica ad una logica di maggior neutralità e integrazione nella quotidianità.

La scelta di dedicarsi principalmente al genere femminile è dovuta alla maggior varietà di archetipi di calzature su cui è possibile intervenire, consentendo ampie variazioni di altezza, profili della suola, espressività e contesti di utilizzo. Questo cambiamento ha influenzato significativamente l'approccio progettuale, soprattutto in termini di espressività e modalità di utilizzo.

Figura 6.3
L'uso di calzature con intersuole molto alte può incrementare il peso della scarpa e ridurre la stabilità, affaticando i piedi dell'utente in poche ore di utilizzo [208].

6.3 User personas

Come accennato, l'utenza a cui il prodotto è indirizzato appartiene ad una fascia piuttosto ampia di consumatori, caratterizzato da [fig. 6.5]:

- **Età:** compresa tra 20 e 60 anni;
- **Apertura alla sperimentazione nei prodotti d'uso:** rispetto ad un approccio conservatore, legato alle abitudini d'uso più consolidate, la curiosità personale porta a fare prova di prodotti innovativi per ottenere vantaggi in termini di comodità o di benessere percepito
- **Sensibilità alle tematiche ambientali:** Si tratta di un'utenza consapevole che vede nella sostenibilità del prodotto un elemento di valore aggiunto. Ciò si traduce in una maggiore disponibilità ad accettare compromessi in termini di prezzo, modalità d'uso o interazione con il prodotto, anche quando queste si discostano dagli standard convenzionali, purché coerenti con i principi di riduzione dell'impatto ambientale.
- **Provenienza:** Il target è collocato in un contesto culturale occidentale, nello specifico italiano, essendo l'ambito con cui è stato possibile accedere. Ciò nonostante, non è esclusa una diffusione anche in altri mercati, come quello giapponese, che mostrano una maggior apertura verso l'integrazione di materiali e forme contemporanee all'interno di archetipi tradizionali.

Figura 6.4

Fotografia di una potenziale utente appartenente al target del prodotto [209].



Provenienza: città medio-grandi

Età: 20-60 anni

Stile di vita: Giornate eterogenee contenenti più tipi di eventi, incontri e spostamenti

Interessi: prodotti d'uso innovativi

Motivazioni d'acquisto: percezione di valore alto (qualità, sostenibilità economica, comodità, identità)

SCENARIO D'USO

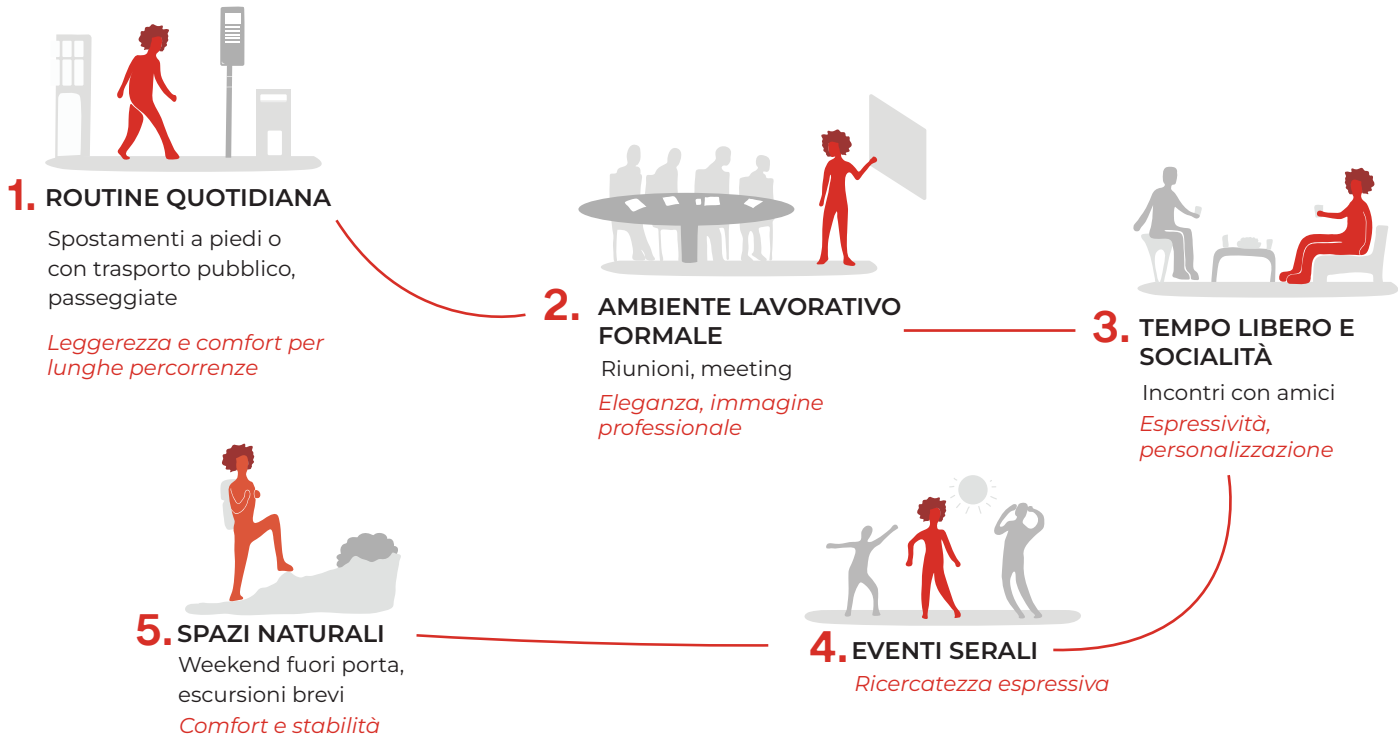
Un sistema modulare che consenta l'intercambiabilità dei componenti risulta particolarmente efficace per un'utenza abituata a muoversi tra contesti ed occasioni differenti all'interno della propria *routine* quotidiana. Tali situazioni richiedono qualità espressive e funzionali eterogenee, alle quali la calzatura può adattarsi attraverso la sostituzione dei moduli.

Ci si riferisce quindi a un'utenza abituata a frequentare sia contesti formali e lavorativi (come riunioni o cene di lavoro), sia situazioni sociali

più rilassate, tra cui uscite o eventi con amici, in cui ha la possibilità di esprimere il proprio gusto estetico con maggior libertà; infine, possono essere inclusi anche moduli orientati principalmente alla funzionalità ed al *comfort*, per situazioni come spostamenti a piedi prolungati o piccole commissioni quotidiane (portare a spasso il cane, fare la spesa ecc...) [fig. 6.5].

Tenendo in considerazione questi tre scenari di utilizzo, il sistema può coprire un ampio ventaglio di archetipi di calzatura.

Figura 6.5
Schematizzazione dei diversi contesti frequentati dall'utenza.



QUADRO ESIGENZIALE

Prima della progettazione, è stato definito un sistema esigenziale-prestazionale che evidenzia i diversi aspetti da tenere in considerazione [Tab 6.6] :

Tabella 6.6
Quadro esigenziale, finalizzato a definire delle linee guida alla progettazione.

ESIGENZE → REQUISITI	
Requisiti Percettivi	Indossare una scarpa coerente con l'estetica contemporanea - Pulizia delle forme dei componenti - Metodo di collegamento armonico o poco evidente - Riduzione della complessità dovuta alla modularità
	Usare il sistema in contesti di diversa natura - Varietà di moduli (incontri formali, eventi, spostamenti quotidiani...) - Versatilità dei moduli non intercambiabili
Requisiti funzionali	Prepararsi per uscire rapidamente - Sostituzione dei moduli rapida e senza sforzi eccessivi (max ~ 1 min.) - Intuitività d'uso
	Pulire il prodotto facilmente Protezione dall'accumulo di polvere o sporcizia
	Sostituire solo le parti usurate Isolamento dei moduli più vulnerabili all'usura
	Indossare le scarpe per diverse ore al giorno - Stabilità del metodo di collegamento - Resistenza dei componenti a cicli d'uso ripetuti (≥ 1000 cicli)
	Trovare comoda ogni configurazione - Rispetto dei movimenti naturali del piede nel ciclo di rullata - Corrispondenza con i profili delle soles più ottimizzati ergonomicamente - Gestione ottimale dello scarico della forza peso - Peso ≤ 600g (per la configurazione con i moduli più pesanti)

6.4 La scelta tipologica

Per la definizione del sistema è necessario identificare la tipologia di calzatura di riferimento per i componenti non intercambiabili della scarpa; nel caso della sperimentazione, la tomaia. Questa dev'essere sufficientemente neutra da permettere il collegamento con moduli di diverse qualità espressive e funzionali; inoltre, prevedendo una maggior complessità formale nelle suole, non deve risultare eccessivamente caratterizzata.

Nel panorama dei modelli di calzature femminili, la scelta è ricaduta su uno stivaletto, connotabile con l'opportuna essenzialità formale e adatto ad un accostamento con una grande varietà di tipologie di suola senza che queste risultino fuori posto [fig. 6.7].

Oltre a ciò, lo stivaletto, in particolare se in pelle, può assumere un'espressività classica, contemporanea o proiettata verso il futuro tramite variazioni mirate di alcuni elementi della sua geometria, come squadratura della punta, larghezza del collare o profilo del taglio superiore.

Inoltre, gli stivaletti consentono l'uso di chiusure semplici (come cerniere lampo o fasce elastiche), che possono essere impiegate per non complessificare ulteriormente il sistema, data anche la presenza del metodo di collegamento dei moduli.

Infine, questa tipologia di tomaia non costringe rigidamente il sistema modulare al genere femminile, facilitando le variazioni che lo renderebbero più apprezzabile anche a target diversi o la proposta di versioni *unisex*.

Figura 6.7
Alcuni esempi di stivaletti presenti sul mercato, molto differenziati dal punto di vista espressivo sulla base delle caratteristiche della tomaia e della suola [210-215].



Mabel,
Via della Paglia



Wanda,
Camper



Komono 01,
Ernesto Dolani



1460 FZ,
Dr. Martens



Bulla DD 103,
Officine Creative



Dean,
Camper

6.5 Definizione dei moduli

Come accennato, la tesi mira a suggerire un sistema modulare “aperto”, in cui ulteriore sperimentazione possa aumentare la quantità di moduli utilizzabili; è stata, tuttavia, definita una selezione suole che permetta di testare le caratteristiche del metodo di collegamento e che, per l’utente, risulti una quantità sufficientemente vasta per utilizzare il sistema in occasioni eterogenee [fig. 6.8].

- **Suola bassa:** una suola adatta alla *routine* quotidiana, confortevole e leggera
- **Suola con tacco:** una suola elegante, adatta ad eventi formali e meno flessibile, caratterizzabile con un tacco di diverse altezze e profili (a stiletto, a rocchetto, a trapezio, a blocco, cilindrico...)
- **Suola platform:** una tipologia di suola apprezzata nel gusto contemporaneo che, benché più rigida rispetto ad una suola bassa, prevede un utilizzo sia in contesti quotidiani che in occasioni più speciali.

Oltre a queste suole, delle quali nel percorso di tesi sono stati definiti i prototipi, potrebbe essere incrementata la varietà includendo altri moduli, tra cui:

- **Suola con zeppa:** una tipologia elegante alternativa al tacco; in generale, è possibile prevedere moduli con differenti altezze e profili, in base alle preferenze dell’utente e al livello di *comfort* richiesto.
- **Suola “light outdoor”:** data la forma a stivaleto della tomaia, è possibile considerare una suola con tassellature e *rocker* più pronunciati, adatta a contesti outdoor leggeri. L’inclusione di questo modulo dipende tuttavia dalla capacità del sistema di collegamento di resistere a sollecitazioni superiori rispetto a quelle di un uso urbano.
- **Suola estiva:** per incentivare un utilizzo anche nei periodi dell’anno più caldi, potrebbero essere sviluppate suole che includano metodi di traspirazione e termoregolazione volti a limitare l’accumulo di calore. Questa potrebbe essere anche abbinata ad una tomaia in materiale leggero e traspirante (es: *lyocell*).



SUOLA BASSA
• drop ~ 18 mm
• tacco ~ 20 mm



SUOLA CON TACCO
• tacco ~ 60 mm



SUOLA PLATFORM
• drop ~ 10 mm
• tacco ~ 50 mm



SUOLA CON ZEPPA
• tacco ~ 60 mm



SUOLA OUTDOOR
• drop ~ 22 mm
• tacco ~ 30 mm



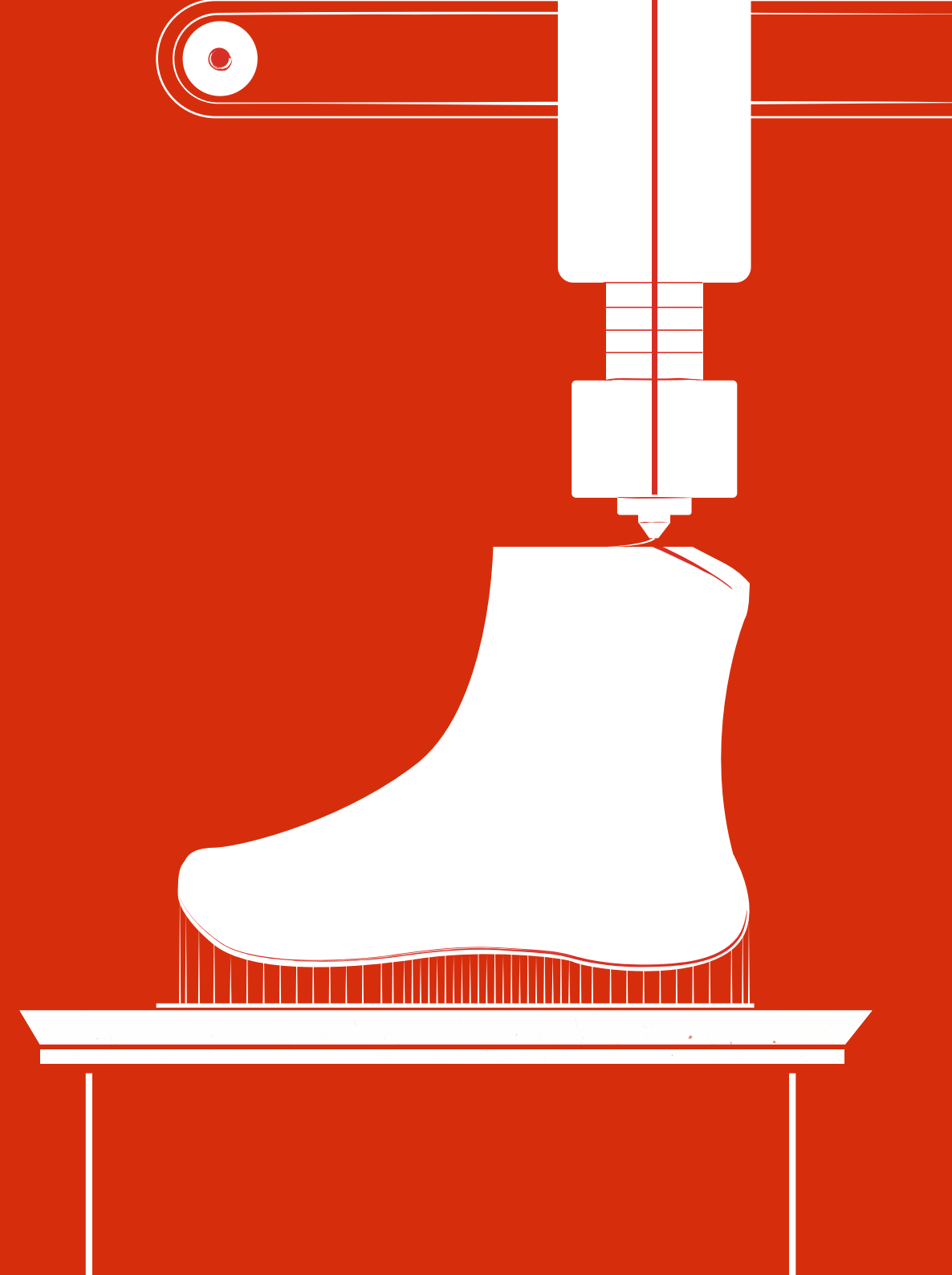
SUOLA TRASPIRANTE
• drop ~ 18 mm
• tacco ~ 20 mm

Figura 6.8
Tra le suole ipotizzate per lo sviluppo del sistema modulare, nella sperimentazione sono state approfondite le prime tre (bassa, con tacco e platform).

PRESENTAZIONE DEL CONCEPT

A seguito delle fasi analitiche è proposta la sperimentazione sviluppata nel corso della tesi, descrivendone il sistema modulare, i componenti costitutivi, i materiali ipotizzati e le possibili tecnologie produttive. Viene inoltre illustrato il percorso di definizione del progetto attraverso la prototipazione e il testing, includendo lo scenario d'uso e il modello di consumo ipotizzati.

07



Modu è un sistema modulare di calzature che permette la sostituzione dei moduli della suola, consentendo di variare sia le proprietà funzionali del prodotto (come rigidezza, altezza, presenza di tacco, conformazione del battistrada...) sia la sua espressività [Fig 7.1].



Figura 7.1
Immagine raffigurante la tomaia-intersuola e i tre moduli della suola sviluppati per la sperimentazione.

7.1 Tecnologie di collegamento

Con l'obiettivo di sperimentare sistemi di connessione meno esplorati da altri prodotti modulari, sono state prese in considerazione soluzioni che possano ottimizzare il tempo di sostituzione dei moduli, la discretezza visiva dell'interfaccia di contatto e l'ingombro complessivo.

Dopo una prima proposta basata su un collegamento elastico tramite una tomaia flessibile, sono state prese in esame tecnologie derivate da applicazioni tecniche ed industriali, trasferibili ad un prodotto destinato all'uso quotidiano.

Modu adotta un sistema di collegamento volutamente ridondante, volto a distribuire le sollecitazioni generate nel ciclo di camminata in più soluzioni, evitando che la stabilità del sistema dipenda da una singola tecnologia [Fig. 7.2].

Figura 7.2
Sezione laterale del sistema, con l'accoppiamento del modulo della suola Low. Viste di dettaglio sui tre sistemi di collegamento.





■ **SISTEMA DI FISSAGGIO INTERBLOCCANTE**

Il collegamento principale tra intersuola-tomaia e moduli della suola è affidato a un'interfaccia interbloccante a micro-incastro organizzata in quattro aree di contatto indipendenti. L'adesione è ottenuta tramite l'accoppiamento meccanico delle superfici, senza l'utilizzo di adesivi permanenti.

La suddivisione in aree separate, oltre a preservare la flessibilità del piede, limita la propagazione di eventuali distacchi localizzati, che comprometterebbero il collegamento. Questa tipologia di connessione risulta più suscettibile a forze di *peel* concentrate, per questo motivo, la geometria delle superfici e gli altri sistemi di supporto sono progettati per ridistribuire tali sollecitazioni [Fig. 7.3].



■ **DENTE PERIMETRALE CONTINUO E LABBRO DI INCASTRO**

Un dente continuo nell'intersuola alto 4 mm, di larghezza variabile, si accoppia con un corrispondente labbro nei moduli delle suole. La geometria del dente e le proprietà di *infill* del labbro consentono l'ingresso dell'intersuola tramite una leggera deformazione elastica della suola nell'inserimento.

Questo elemento svolge principalmente una funzione di stabilizzazione laterale e di contenimento delle forze di *peel*, mediante la distribuzione su una superficie più ampia e convertendole in sforzi di taglio, rispetto ai quali l'interfaccia a micro-incastro è più prestante.



■ **TASSELLI DI ACCOPPIAMENTO**

Le quattro aree interbloccanti sono posizionate su tasselli rialzati di 4 mm, corrispondenti a quattro cavità all'interno della suola. Questo accorgimento introduce un ulteriore livello di incastro meccanico tra i moduli e contribuisce a proteggere le superfici di connessione da sporco e umidità.

Figura 7.3
Rappresentazione dei tre sistemi di collegamento (interfacce interbloccanti, dente perimetrale e tasselli di accoppiamento).

SOLLECITAZIONI PIÙ CONTRASTATE

SISTEMA DI FISSAGGIO INTERBLOCCANTE

- Separazione dei moduli: forze di trazione perpendicolari alla pianta del piede dovute alla flessione del piede, alla forza di gravità...
- Forze di taglio parallele alle superfici, che determinerebbero lo scorrimento dei moduli
- Micro-spostamenti e vibrazioni
- Forze torsionali e rotative del piede

DENTE PERIMETRALE CONTINUO E LABBRO DI INCASTRO

- Forze di *peel* concentrate
- Forze rotative del piede
- Flessioni che potrebbero causare disaccoppiamento

TASSELLI DI ACCOPPIAMENTO

- Spostamenti laterali e disallineamenti
- Forze di taglio

IL SISTEMA DI FISSAGGIO

Tra gli oggetti principali della sperimentazione rientra il sistema di fissaggio richiudibile; il principio di funzionamento richiama quello dei prodotti simil-Velcro, ma presenta proprietà meccaniche ed applicazioni differenti, essendo orientato verso contesti più impegnativi di tipo industriale ed ingegneristico.

In generale, le tecnologie di collegamento interbloccante possono essere suddivise in due sistemi [Fig. 7.4]:

1. HOOK AND LOOP

In questa categoria rientrano i sistemi di fissaggio rimovibili tradizionali, largamente impiegati nell'abbigliamento, nel rivestimento di arredi ed imbottiture o nei dispositivi biomedicali indossabili. Il collegamento avviene tra due interfacce di natura diversa:

Interfaccia *hook*: più rigida, caratterizzata dalla presenza di piccoli uncini (spesso in poliolefine, come il polipropilene) di dimensioni variabili tra 0.5 e 0.8 mm, organizzati in file sullo strato di supporto.

Interfaccia *loop*: la superficie è caratterizzata da fibre di nylon intrecciate in modo irregolare, con un'altezza di 1-2 mm; queste costituiscono degli anelli di tessuto su tutta la superficie.

L'adesione è determinata dall'incastro degli uncini dell'interfaccia *hook* con gli anelli dell'interfaccia *loop*, seguendo un funzionamento biomimetico originariamente osservato nei semi di bardana, per il trasporto sul pelo dei mammiferi. È solitamente mantenuta una buona flessibilità del sistema, tuttavia si vede un maggior accumulo di sporcizia nel tempo [216, 217].

Figura 7.4
Immagini di dettaglio delle interfacce di collegamento *hook and loop* e interbloccanti [218, 219].

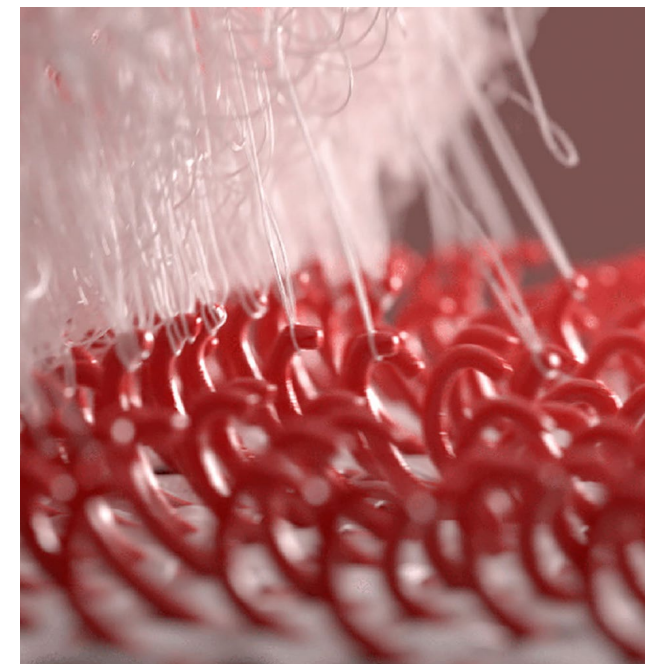
2. FISSAGGIO CON TESTINE INTERBLOCCANTI

Con questa definizione si intendono i sistemi di collegamento ad alte prestazioni, approssimabili ad un funzionamento "*hook and hook*". In questo caso, le due interfacce di collegamento presentano delle file di testine a fungo interbloccanti tipicamente alte 2-3 mm, rigide e distribuite uniformemente.

È perciò assente un'interfaccia in tessuto e l'incastro si verifica tramite una leggera deformazione elastica delle testine. Il collegamento è netto, meno progressivo e spesso caratterizzato da un suono a scatto. Si ottiene un sistema più resistente e stabile, che permette applicazioni in ambiti in cui il sistema *hook and loop* risulterebbe troppo poco efficace, come automotive, aerospazio, elettronica professionale e componentistica tecnica.

Dalle schede tecniche fornite dai produttori si evince come questi collegamenti siano circa cinque volte più resistenti al distacco rispetto ai sistemi *hook and loop*. Inoltre, benché le interfacce collegate risultino piuttosto rigide, è mantenuto un leggero grado di flessibilità fornito dalle aree del supporto prive degli elementi di aggancio [220].

Per il collegamento tra intersuola e moduli delle suole questa seconda categoria di sistemi di fissaggio è stata ritenuta più affidabile nel contrastare gli stress determinati dal ciclo di camminata.

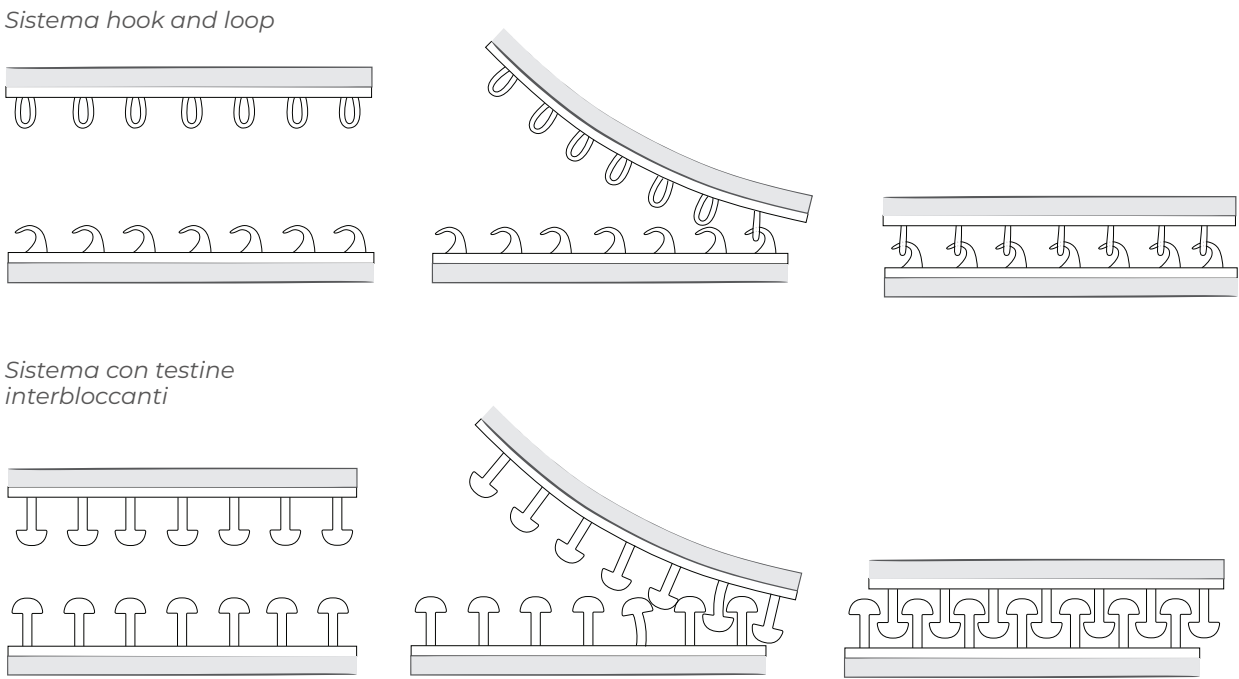


A titolo esemplificativo, sono stati presi in esame i *datasheet* di due sistemi di fissaggio commercializzati da 3M, rispettivamente un sistema *hook and loop* da uso comune (rivestimenti delle imbottiture, sostegno di oggetti leggeri) ed un sistema a testine interbloccanti simile a quello utilizzato nei prototipi [Tab. 7.5] [221, 222].

In generale, si può apprezzare come il sistema *interlock* [Fig. 7.6] presenti maggiori prestazioni, a fronte, però, di uno spessore più elevato.

Tabella 7.5
Comparazione di un'interfaccia di collegamento *hook and loop* e di un'interfaccia interbloccante a testine.

Tipo di prova	SJ3506 and SJ3507 Thin Hook and Loop	SJ3870 ¹
RESISTENZA A TRAZIONE DISTACCO (N/cm²)	4.9	29.6 - 41.1
FORZE DI TAGLIO DINAMICHE (N/cm²)	29.3	15 - 41.3
CLEAVAGE STRENGTH (N/cm di larghezza) ²	8.05	42-56
ADESIONE IN T PEEL (N/cm di larghezza) ³	0.4	3.3-2.6
ADESIONE IN PEEL a 90° (N/cm di larghezza) ⁴	4.02	8.01-8.01
SPESSORE DI COLLEGAMENTO (mm)	0.59	6.15



¹ = Il doppio valore indica l'accoppiamento tra interfacce con densità differenti: rispettivamente 250-250 e 250-400.

² = La prova di *cleavage* valuta la resistenza all'apertura progressiva di due supporti rigidi uniti dal sistema di fissaggio. La separazione avviene mediante un effetto leva applicato sul bordo di uno dei supporti; il risultato è espresso in N/cm di larghezza del fronte che si sta distaccando.

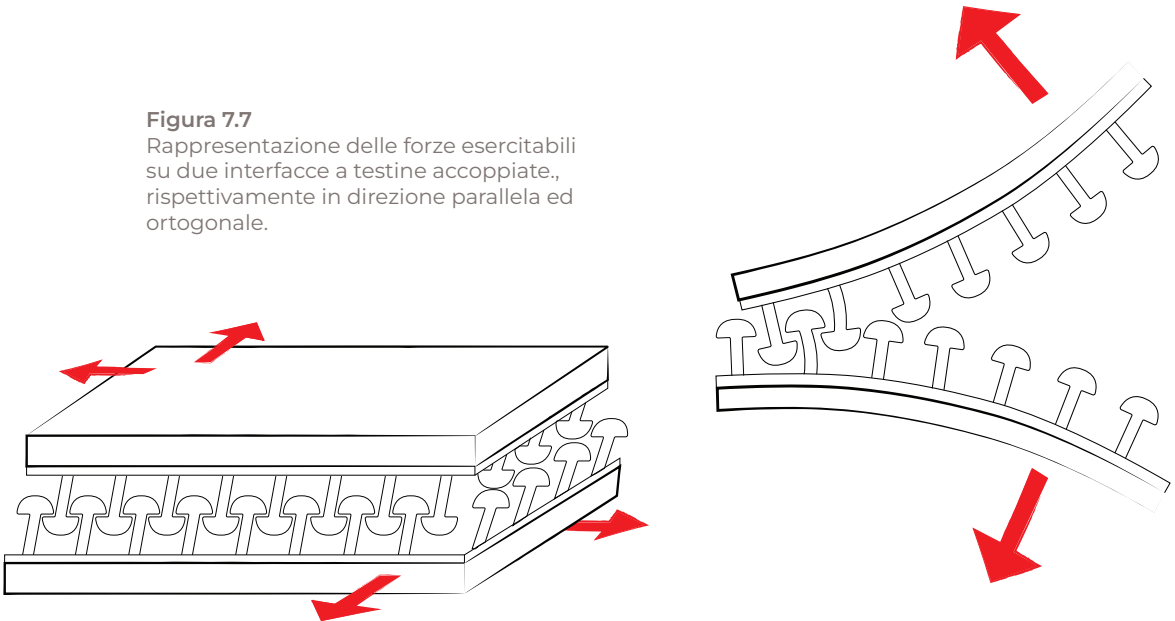
³ = La prova di adesione in *T-peel* misura il comportamento di pelatura progressiva di due interfacce flessibili sottoposte a trazione in direzioni opposte. Il distacco si propaga dai bordi

verso l'intera superficie, assumendo la caratteristica configurazione a "T".

⁴ = La prova di *peel* a 90° prevede il distacco di un'interfaccia flessibile da una rigida mediante l'applicazione di una forza con angolo di 90° rispetto al supporto rigido.

Figura 7.6
Schematizzazione del processo di collegamento delle due interfacce, rispettivamente in un sistema *hook and loop* e in uno a testine interbloccanti

Figura 7.7
Rappresentazione delle forze esercitabili su due interfacce a testine accoppiate., rispettivamente in direzione parallela ed ortogonale.

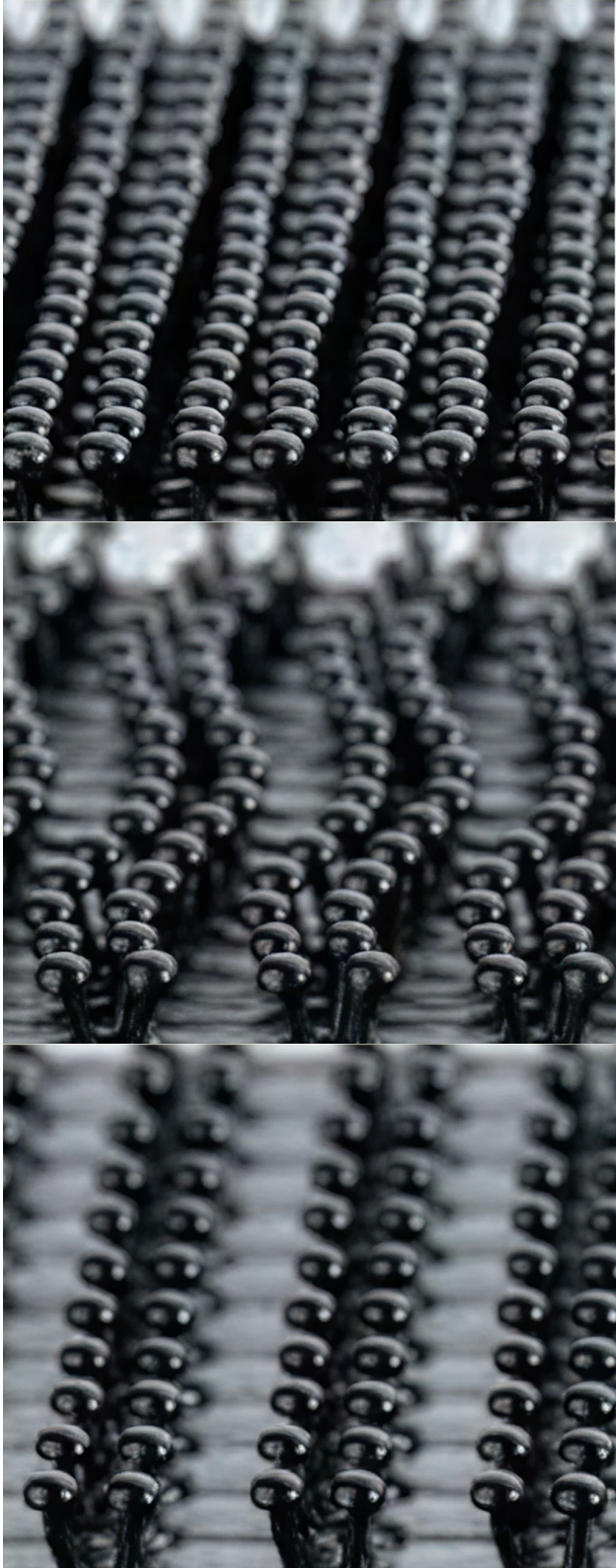


PROPRIETÀ

Le proprietà di entrambi i sistemi di fissaggio risultano fortemente anisotrope, variando sensibilmente in base alla direzione in cui le forze vengono esercitate [Fig. 7.7]. In particolare:

- Elevata resistenza alle forze parallele all'interfaccia (forze di taglio);
- Minore resistenza alle forze ortogonali alla' interfaccia (forze di peel), che tendono a separare progressivamente le superfici.

Per questo motivo, le altre soluzioni di connessione e la geometria dei moduli devono limitare l'innescò delle modalità di distacco più critiche per le testine, ridistribuendo le forze in configurazioni più favorevoli.



LE DENSITÀ DELL'INTERFACCIA

I sistemi con testine interbloccanti si differenziano, oltre che per i materiali impiegati, per l'altezza e la densità delle testine sulla superficie [Fig. 7.8]; quest'ultima caratteristica è misurata dai principali produttori di questi sistemi (3M e Velcro) in steli per pollice quadrato o per centimetro quadrato [223].

- **400: 400 steli/inch²** o circa 60 steli/cm²
- **250: 250 steli/inch²** o circa 38 steli/cm²
- **170: 170 steli/inch²** o circa 26 steli/cm²

Una maggiore densità determina un collegamento più resistente e rigido, ma anche meno progressivo durante la separazione e l'accoppiamento; interfacce ad alta densità, infatti, sono impiegate dove è necessario sostenere carichi di decine di kg.

Come indicato dai produttori, è possibile accoppiare superfici di densità diverse per controllare in modo più libero il comportamento meccanico del sistema, variando rigidezza, resistenza a trazione, vita utile e facilità di unione e distacco.

Per il sistema Modu è stata adottata una combinazione di densità differenti, garantendo sufficiente stabilità nella camminata ma senza ostacolare eccessivamente la rimozione dei moduli da parte dell'utente.

Figura 7.8
Fotografie di dettaglio di interfacce a densità 400, 250 e 170, differenziate per quantità e pattern di distribuzione delle testine.

7.2 La tomaia

La tomaia a stivaletto presenta un'espressività neutra, con l'obiettivo di non aumentare la complessità della scarpa e di non competere visivamente con i moduli della suola, che costituiscono l'elemento principale di caratterizzazione del sistema [Fig. 7.9].

Materiali

- **Esterno:** pelle morbida (vitello o agnello), con finiture che preservino la flessibilità del materiale (es: bottalato, *tumble softened*, nappato, oliato leggermente), in spessore di 1.2-1.6 mm.
- **Interno:** pelle morbida (vitello)
- **Rinforzi (puntale e contrafforte):** sfridi di cuoio rigenerato e compresso, in una miscela con lattice e fibre cellulosiche (vd. prodotti di Lefaflex [224]).

In alternativa:

Pelli vegetali

Soluzioni derivate da materie prime di origine vegetale (come cocco, cactus, mais ecc.), che, se di qualità, possono raggiungere buoni livelli di durabilità e rappresentano un'alternativa ai materiali di origine animale [225]

Pelli in TPU

Per evitare l'impiego di pelli animali e diminuire il costo è possibile utilizzare pelli sintetiche a base polimerica (lo stesso TPU ad esempio). Queste soluzioni determinano alcuni compromessi sulla durabilità, ma facilitano la compatibilità tra materiali per le fasi di riciclo e rigenerazione, essendo molti degli altri componenti in varianti dello stesso polimero.

Inoltre, le pelli sintetiche sono disponibili in formulazioni altamente flessibili, permettendo una riconfigurazione del profilo della tomaia ottimale. L'uso di pelli in TPU è compatibile anche con un rivestimento interno dello stesso materiale (es: spacer fabric) e con rinforzi in composizioni più rigide.

Soletta

A contatto con il piede, un plantare in *TPU foamy* a basse durezze (60-70A Shore) con infill variabile consente una modulazione localizzata della morbidezza, migliorando la dissipazione delle pressioni concentrate sul piede.

Chiusura a cerniera lampo posteriore. Questo posizionamento permette di mantenere per l'utente sia la chiusura della scarpa che il punto di sostituzione delle suole nella stessa area funzionale.



Figura 7.9
La tomaia del sistema non accoppiata ai moduli della suola.

7.3 L'intersuola

Questo componente, solidale alla tomaia, consente il collegamento con i diversi moduli delle suole attraverso il sistema integrato di interfacce interbloccanti, tasselli di accoppiamento ed il dente perimetrale continuo illustrati precedentemente [Fig. 7.10].

Figura 7.10

L'intersuola include i tre sistemi di collegamento che permettono un accoppiamento stabile con le suole.



1 Tasselli di accoppiamento

Il sistema interbloccante ed i relativi tasselli sono collocati nelle aree meno soggette a flessione durante il ciclo di camminata, riducendo il rischio di deformazioni che disallinebbero i moduli. In particolare, le sezioni rigide si trovano in corrispondenza del calcagno [Fig. 7.11], dell'area metatarsale del mesopiede, della regione delle falangi intermedie e della punta della tomaia.

2 Scanalature di flessione

Sono presenti 15 scanalature nelle aree flesse durante l'accoppiamento, inserite per facilitare l'adattamento dell'insieme tomaia-intersuola ai diversi profili dei moduli della suola.

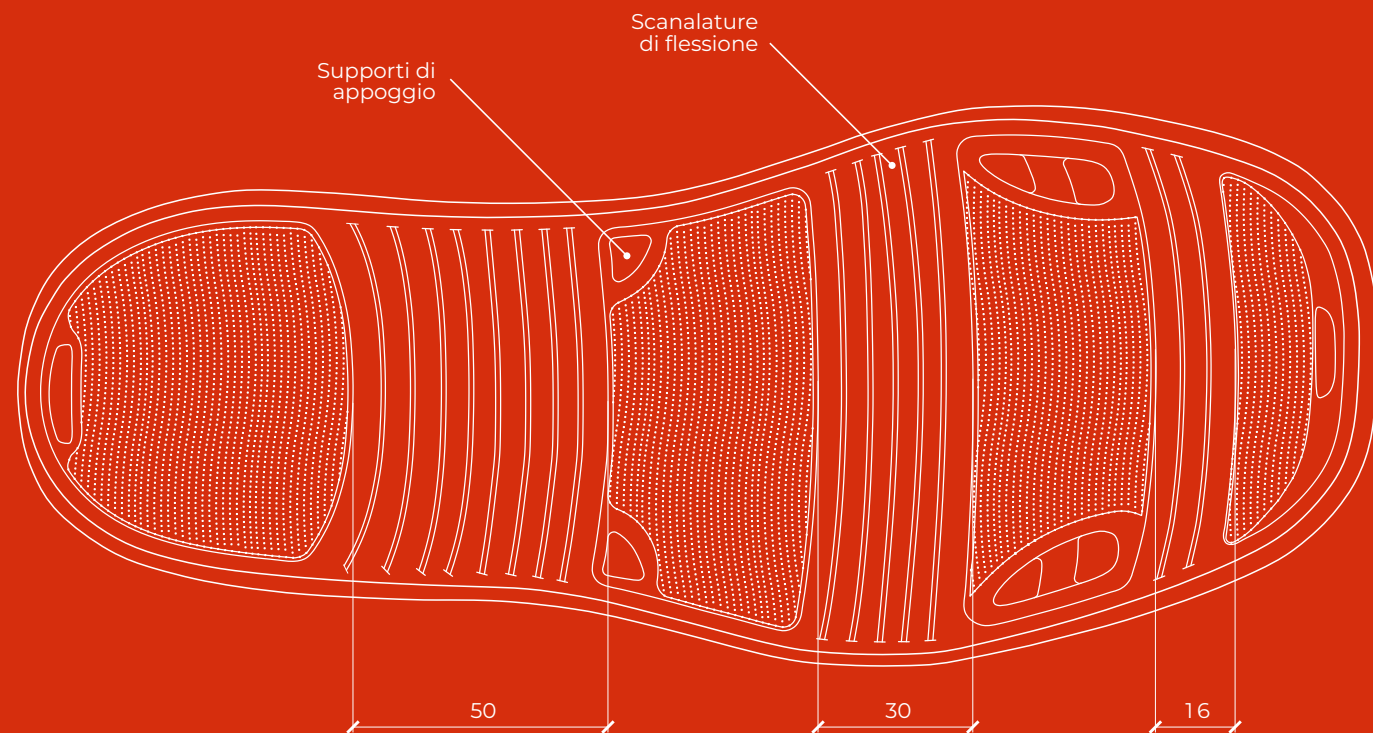
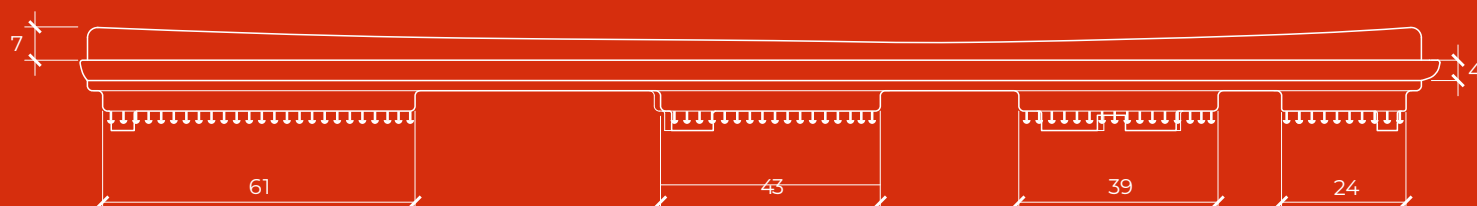
3 Dente continuo

Il dente presenta uno spessore variabile (4-2 mm), con maggiore robustezza nelle zone meno flessibili.

- **Maggiore spessore:** punta, lati del tallone
- **Minore spessore:** nelle aree di flessione del mesopiede e avampiede piede, posteriormente al tallone

4 Supporti di appoggio

Durante le fasi di test è stato riscontrato che l'utente può inconsapevolmente appoggiare il piede a terra senza aver ancora inserito i moduli, talvolta alzandosi in piedi ed trasferendo il proprio peso sull'interfaccia di micro-testine. Per evitare possibili danneggiamenti, sono presenti 6 supporti alti 4 mm, finalizzati a distribuire il carico evitando la pressione sull'interfaccia; questi sono posizionati sui tasselli in modo da non interferire con la flessione.

VISTA INFERIORE
Quote in millimetriVISTA LATERALE
Quote in millimetri

Materiali

- Realizzabile in *TPU foamy* di durezza 80A, inserendo densità interne differenziate
- **Dente perimetrale:** riempimento maggiore
- **Tasselli di accoppiamento:** riempimento minore, per preservare la morbidezza nel contatto con il piede e diminuire il peso complessivo.

7.4 Le suole intercambiabili

Per verificare le potenzialità del sistema di collegamento e la versatilità dell'architettura modulare sono state sviluppate tre tipologie di suola. Queste consentono di configurare la calzatura secondo archetipi ampiamente diffusi nel panorama *casual*/contemporaneo, pur rappresentando soltanto una parte delle possibili evoluzioni del sistema. La piattaforma progettuale è infatti pensata per accogliere future varianti, differenti sia per caratteristiche funzionali sia per linguaggio espressivo. Le colorazioni presentate hanno valore puramente esemplificativo: il sistema prevede la possibilità di personalizzazione in fase di acquisto.

Modu è infatti pensato come ecosistema di moduli progressivamente espandibile, nel quale nuovi moduli possono essere sviluppati mantenendo invariata l'interfaccia di connessione composta dal sistema interbloccante, dalle sedi di accoppiamento dei tasselli e dal labbro perimetrale di incastro.

Figura 7.11

Viste ortogonali dell'intersuola.

È osservabile lo spessore variabile del dente perimetrale, la suddivisione delle interfacce interbloccanti e la presenza di scanalature di flessione.

Suola Low

La configurazione è pensata per l'utilizzo quotidiano, orientata a massimizzare flessibilità e naturalezza dei movimenti durante la camminata [fig. 7.12].

Profilo

- **Drop:** medio (19 mm)
- **Tacco:** medio-basso (23 mm)

Materiali

- *TPU foamy* di durezza 85A-75A

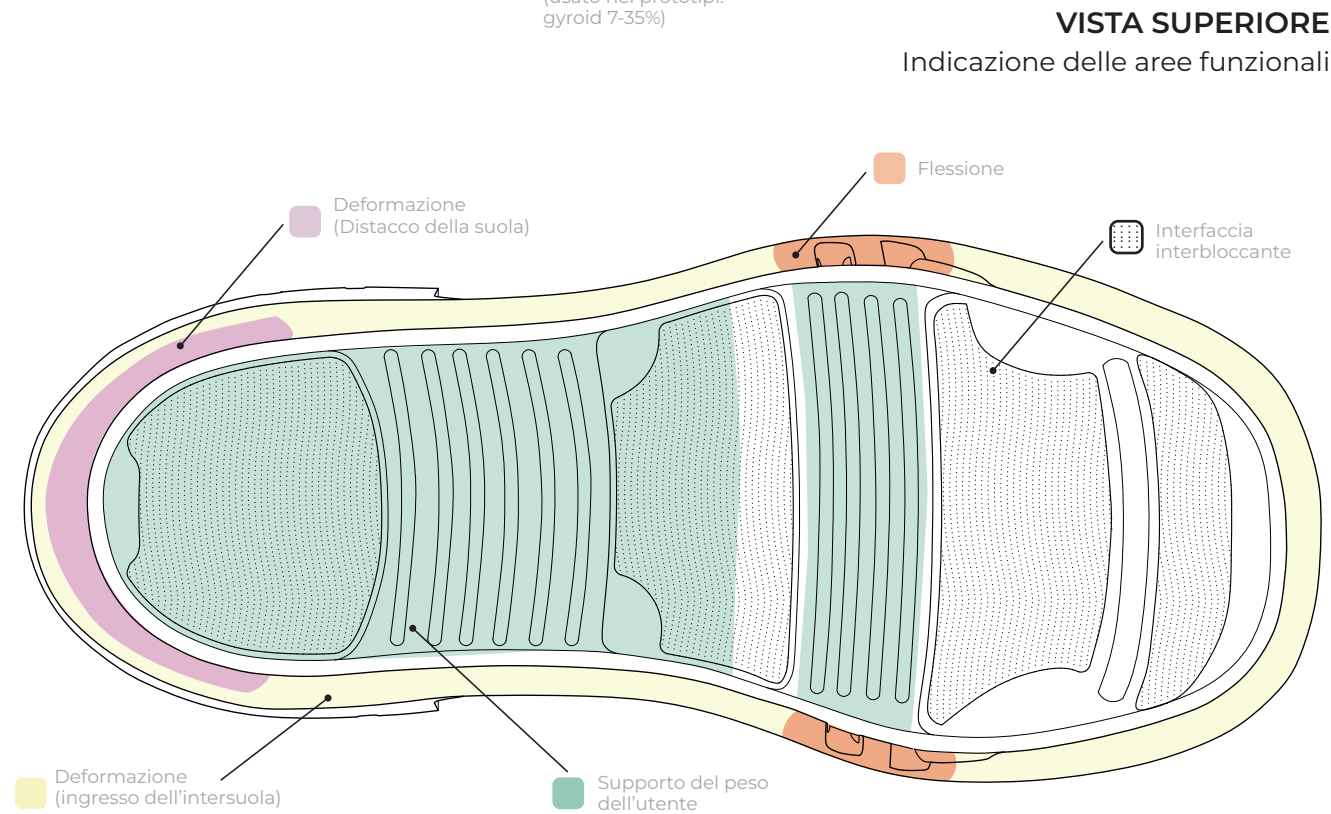
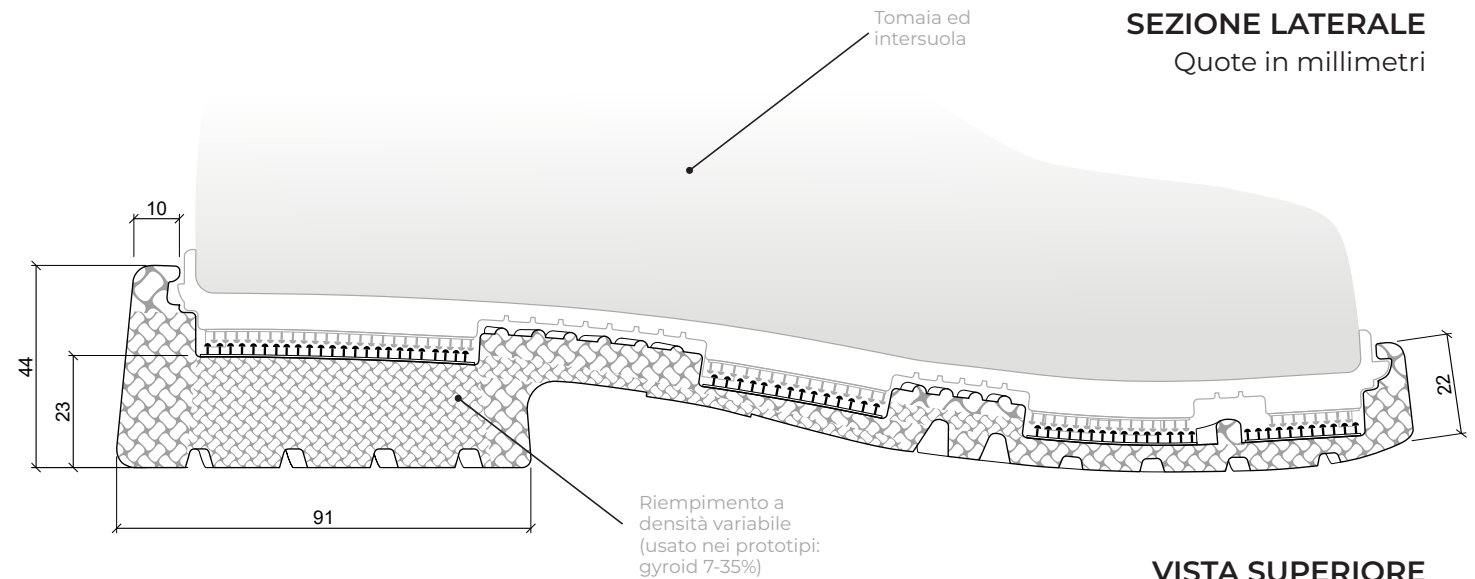
Caratteristiche

- Scanalature di flessione nell'avampiede per favorire la rullata;
- Maggiore densità dell'*infill* nell'arco plantare, per incrementare la stabilità ed i sostegno;
- Minor densità di riempimento in corrispondenza del labbro di aggancio (per facilitare la deformazione elastica per l'incastro dell'intersuola), e nell'area di flessione tra metatarsi e falangi.

Figura 7.12

Vista laterale del sistema con suola bassa. In seguito: vista dall'alto e dal basso, sezione laterale e vista dall'alto con indicazione delle aree funzionali.





Suola Block

Una configurazione caratterizzata da tacco a blocco, pensata per contesti più formali o occasioni sociali. L'architettura generale, più rigida, privilegia la stabilità, mantenendo comunque una sufficiente flessibilità nell'avampiede [fig. 7.13].

Profilo

- **Drop:** elevato (53 mm)
- **Tacco:** medio-elevato (60 mm)

Materiali

- *TPU foamy* di durezza 95A-85A

Caratteristiche

- Densità di riempimento maggiore nell'arco plantare e al centro del tacco, per migliorare le prestazioni meccaniche di sostegno del peso dell'utente ed evitare deformazioni accidentali durante il passo.

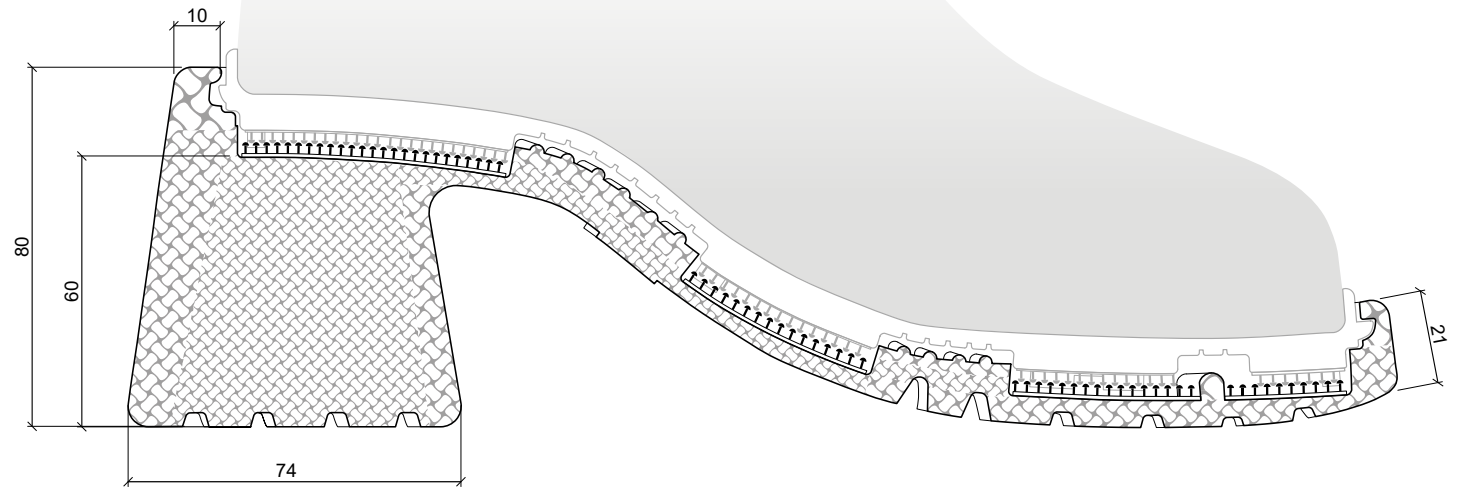


Figura 7.13

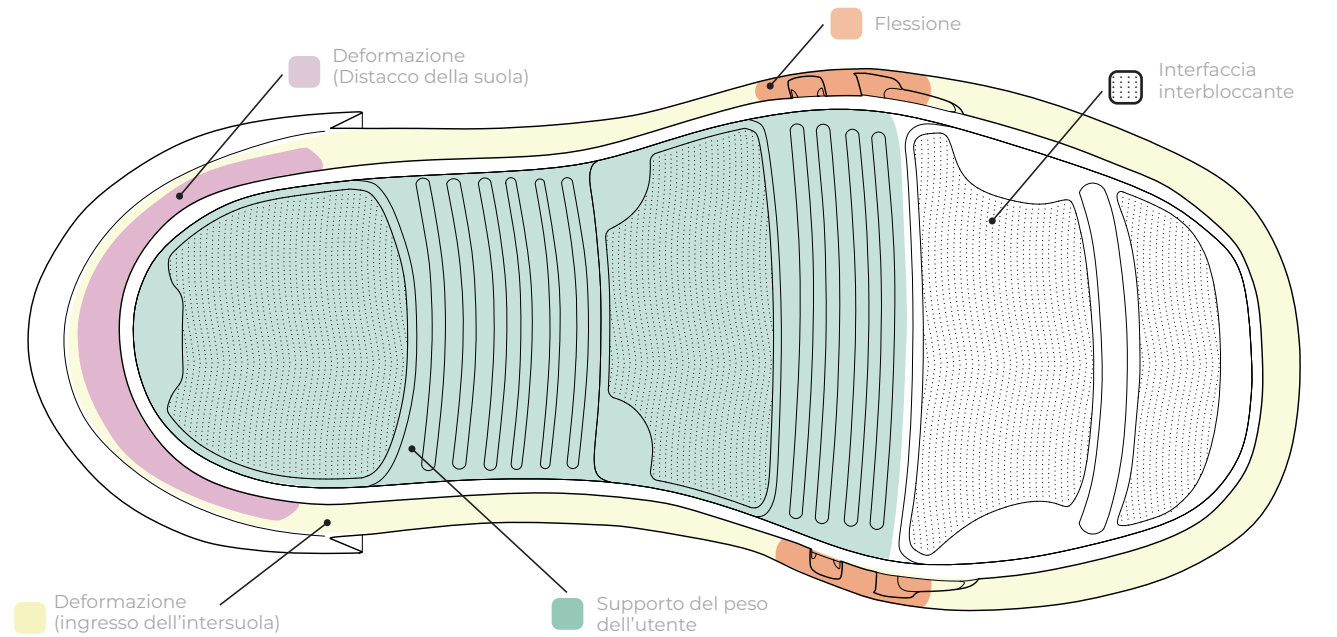
Vista laterale del sistema con suola Block. In seguito: vista dall'alto e dal basso, sezione laterale e vista dall'alto con indicazione delle aree funzionali.

SEZIONE LATERALE

Quote in millimetri

**VISTA SUPERIORE**

Indicazione delle aree funzionali



Suola Platform

Una tipologia di suola molto diffusa nella contemporaneità, derivata da sottoculture *underground* e giovanili ma ad oggi proposta anche ad un target ampio. Questa è caratterizzata da un aumento significativo dello spessore lungo tutto il profilo della scarpa (3-8 cm), aumentandone l'altezza complessiva e fornendo una presenza visiva marcata. A differenza dei moduli più convenzionali con tacco pronunciato, in questo caso è mantenuto un *drop* contenuto, per mantenere un maggior stabilità durante la camminata [fig. 7.14].

Caratteristiche

- Struttura complessivamente più rigida per effetto dell'elevato spessore;
- Scanalature profonde (circa 12 mm) che contribuiscono alla riduzione del peso, irrigidite da un perimetro laterale continuo largo 7 mm;
- Discontinuità superiore nell'avampiede mantenuta per coerenza visiva con gli altri moduli, ma qui non funzionale alla flessione;
- Maggior densità di riempimento in corrispondenza del retropiede, per sostenere il peso dell'utente.

Profilo

- **Drop:** basso (11 mm)
- **Tacco:** piattaforma alta 38 mm

Materiali

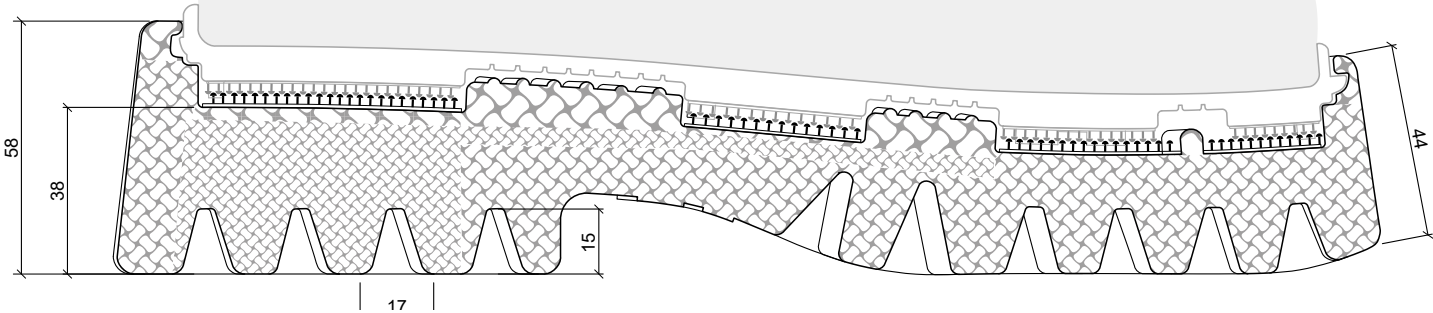
- TPU foamy di durezza 85A-75A



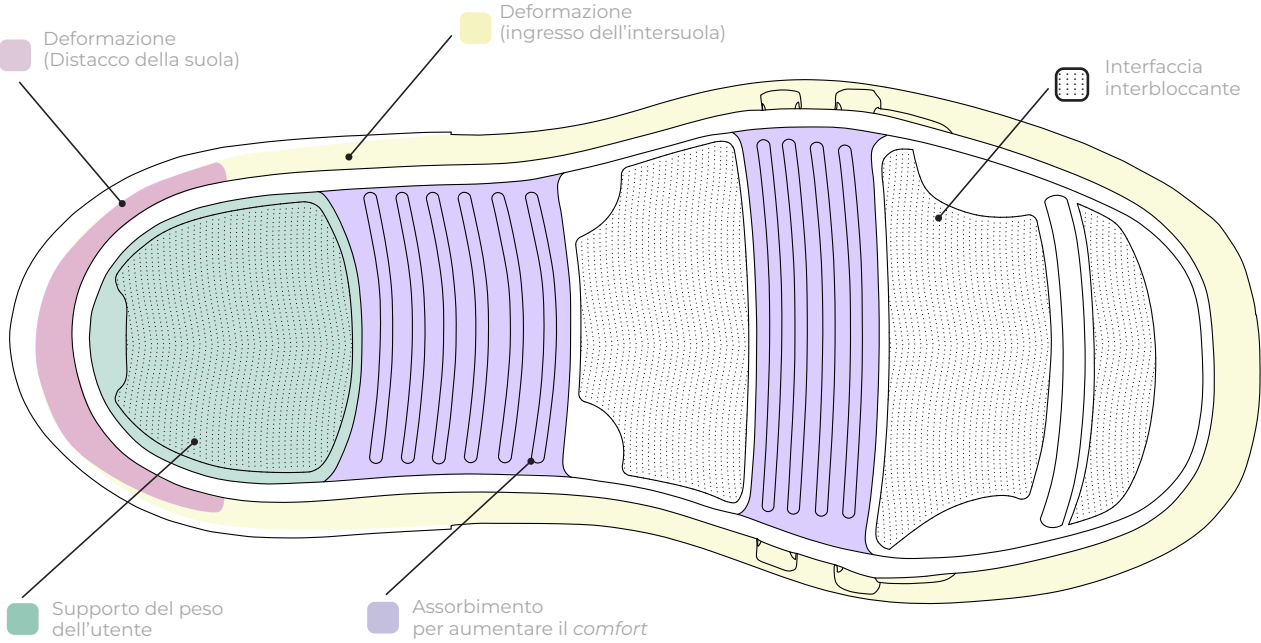
Figura 7.14

Vista laterale del sistema con suola Platform. In seguito: vista dall'alto e dal basso, sezione laterale e vista dall'alto con indicazione delle aree funzionali.

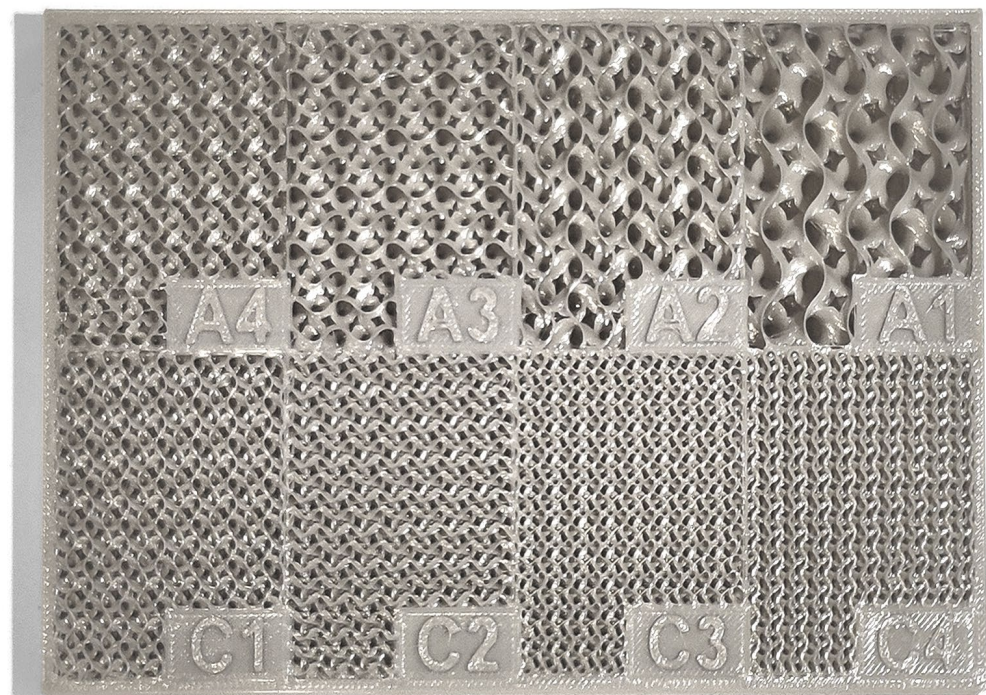
SEZIONE LATERALE
Quote in millimetri



VISTA SUPERIORE
Indicazione delle aree funzionali



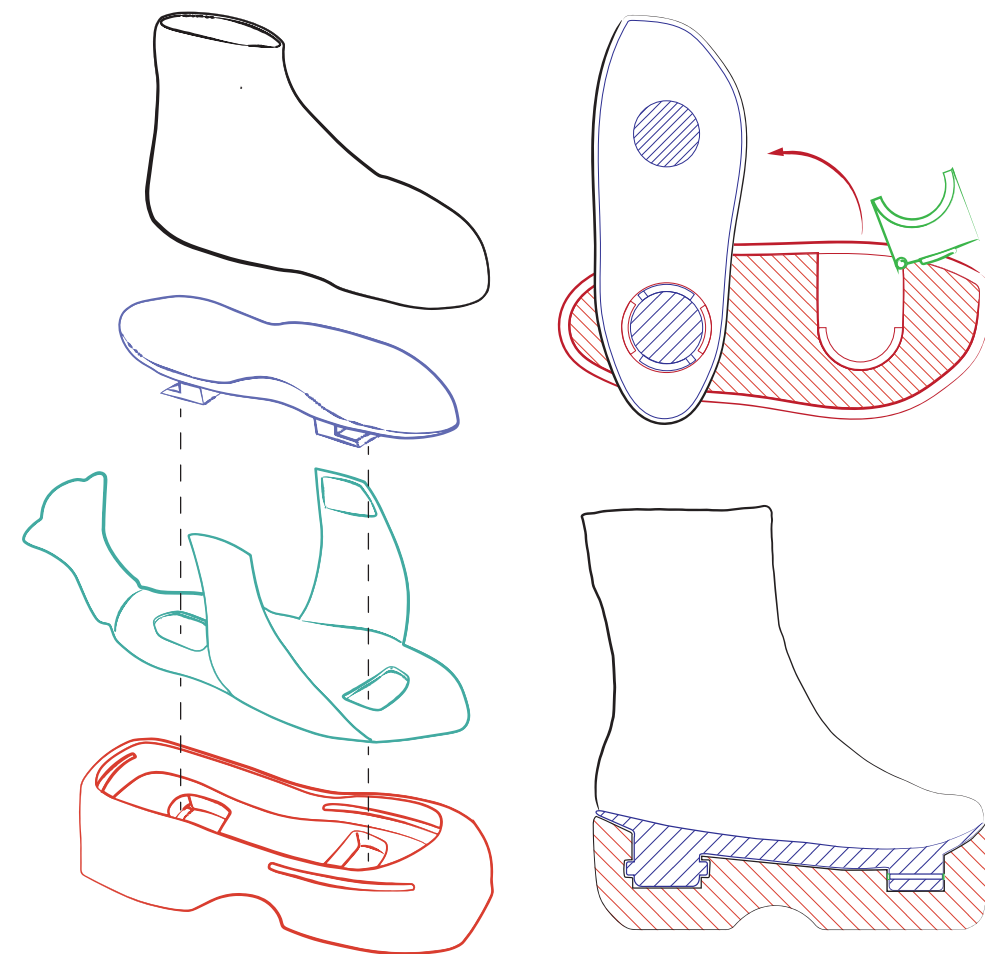
7.5 La definizione della forma



La configurazione finale del sistema è stata ottenuta attraverso un processo iterativo di progettazione e verifica, supportato dalla realizzazione di prototipi fisici. In questo modo, è stato possibile correggere i dimensionamenti dei componenti e valutare le proprietà ottenibili, pur utilizzando materiali e tecnologie di stampa di livello prototipale.

SOLETTE E DENSITÀ DI *INFILL*

In una prima fase, la stampa di due solette e di un set di campioni di riempimenti giroidali ha permesso di familiarizzare con i livelli di morbidezza e flessibilità ottenibili, oltre che con i parametri necessari alla stampa con filamenti flessibili (umidità del materiale, temperatura di estrusione, ventilazione, adesione del primo layer...)



PRIMI CONCEPT

Le prime soluzioni esplorate prevedevano:

- **Sistema a baionetta**, scartato per la complessità formale che sarebbe stata necessaria
- **Sistemi "a laccio" con ali di tessuto**, funzionanti ma limitanti in termini di flessione del piede e troppo influenti sull'espressività globale della calzatura



0. SISTEMA AD ALI DI TESSUTO

Un primo prototipo con funzionamento a chiusura elastica ha introdotto l'analisi degli spessori delle pareti dei vari componenti, ma è stato poi scartato per la limitata versatilità del sistema nell'uso di moduli di diversa forma.



1. SISTEMA CON MODULO LOW

L'introduzione di un'interfaccia interbloccante è stata testata con un primo modulo a suola bassa. Per facilitare la rimozione dei moduli è stata inserita una linguetta posteriore. Durante l'utilizzo si è riscontrata una concentrazione di tensioni nel materiale all'altezza delle falangi, in corrispondenza della zona di flessione.

Avanzamenti

- Definizione delle aree di interfaccia
- Posizionamento delle scanalature di flessione inferiori

Criticità

- Riduzione dello spessore del labbro e dei denti per facilitare l'incastro
- Diminuzione della densità di riempimento per aumentare la flessibilità
- Riprogettazione della linguetta per maggiore leva
- Gestione delle tensioni nella zona di flessione anteriore



2. SISTEMA CON TACCO A BLOCCO

Un primo modulo con tacco (alto 6.8 cm) ha introdotto l'uso di filamenti *high flow* (Bambu Lab 95A HF); è stata anche validata la capacità dell'intersuola di adattarsi ai moduli di diversi profili. La linguetta in continuità con la suola ha consentito una rimozione dei moduli sia manuale che tramite il piede; due incisioni laterali permettono una deformazione elastica di allargamento nelle fasi di inserimento e rimozione.

Sono inoltre stati compiuti i primi test dinamici, utilizzando una tomaia provvisoria in tessuto incollata all'intersuola. Dopo alcuni cicli di camminata e corsa su un terreno liscio ed uno irregolare, anche stressando l'interfaccia con carichi laterali e posizioni limite, è stato convalidato il sistema di collegamento.



Avanzamenti

- Differenziazione del riempimento nella scarpa: densità bassa lungo il labbro, piastra rigida nel retropiede e mesopiede per dare supporto al piede, densità alta nel tacco per evitare il collasso durante l'utilizzo
- Texture puntinata sulla linguetta per aumentare il *grip*
- Modifiche formali per diminuire l'ingombro e aumentare la flessibilità

Criticità

- Sezione trasversale della linguetta troppo fragile: durante l'utilizzo, la presenza delle incisioni ed il dimensionamento hanno causato una rottura
- Ottimizzazione del profilo, per fornire una distribuzione dei carichi più naturale e rendere più comoda la camminata
- Aumentare il raggio di raccordo del tacco per evitare flessioni involontarie



3. SECONDO MODULO LOW

In questa fase è stata introdotta una tomaia in similpelle, ricavata da una calzatura preesistente riscaldando gli incollaggi e separandola dalla suola.

Sono state introdotte variazioni nella sagoma della scarpa e nella forma della linguetta di distacco. Nell'intersuola sono presenti i piedini di distribuzione del carico, suddividendo poi l'interfaccia anteriore in due aree separate.

Nervature nella suola

Nelle aree prive di tasselli è stato mantenuto un distanziamento di 3 mm, inizialmente pensato per l'inserimento di alcune sezioni *hook and loop*, poi ritenuto non necessarie. È comunque conservato uno spazio libero per permettere

leggere deformazioni della suola e della soletta, scaricando possibili tensioni; sono però inserite delle nervature per mantenere un movimento parallelo tra i due moduli del sistema.

Avanzamenti

- Ottimizzazione delle densità per migliorare inserimento e flessione

Criticità

- Modifica del profilo della scarpa: una suola piatta "*barefoot*" può risultare scomoda per l'utenza
- Riduzione della complessità visiva della suola

4. SEZIONI DI FLESSIONE DELL'AVAMPIEDE

Per risolvere la tendenza dell'avampiede a scaricare le tensioni generate dalla flessione del piede mediante un allargamento verso l'esterno, sono stati testati diversi sistemi volti a guidare la flessione, in modo che la suola rimanesse pienamente solidale all'intersuola. L'obiettivo è infatti quello di comprimere le celle giroidali localmente con una deformazione elastica controllata.

1. tagli di flessione "a V" 3 o 7 tagli che agiscono da nervature per guidare la flessione e la compressione delle celle

2. profilo inferiore curvo: una curvatura alla base dell'area di flessione, per evitare pareti piane

3. zone a bassa densità di riempimento: una sezione trapezoidale con celle più grandi, meno rigide e capaci di dissipare accumuli di tensione.

4. Interruzioni della parete superiore: siccome l'allargamento è dovuto principalmente alla parete superiore della suola, delle interruzioni consentono di scaricare le tensioni e mantenere la solidarietà con l'intersuola anche durante la flessione. Dato che questa soluzione è maggiormente evidente sui moduli, alterandone l'espressività, è stata presa in considerazione solo nel caso in cui le altre accortezze formali non risultassero efficaci.

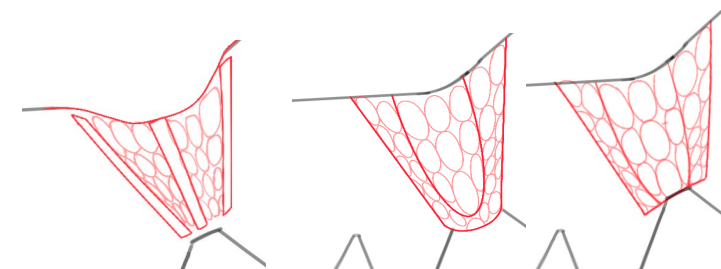
Queste soluzioni sono state testate su sezioni parziali del modulo, con risultati più efficaci ottenuti dalla riduzione localizzata della densità (3).

CAP - 7

1.

2.

3.



4.





5. SECONDO MODULO CON TACCO

Il secondo modulo con tacco, derivato da analisi del profilo di modelli a blocco e rocchetto (6–7 cm) presenti sul mercato, ha visto un affinamento della geometria generale e delle sezioni. La linguetta è stata riprogettata per una presa più ergonomica e le densità interne ottimizzate per ridurre criticità legate all'orientamento dei layer.

Nonostante le modifiche, persistono fenomeni di apertura nella zona anteriore, richiedendo ulteriori iterazioni. È stato poi possibile sperimentare con il profilo e le dimensioni del tacco, per mantenere un profilo "classico" ma limitando l'ingombro complessivo.

Avanzamenti

- Ottimizzazione del profilo e delle densità
- Miglioramento delle proprietà meccaniche del tacco

Criticità

- Flessione anteriore
- Necessità di smussi e raccordi più ampi per facilitare l'ingresso dell'intersuola
- Riduzione dell'ingombro percepito della linguetta

6. SISTEMA DI RIMOZIONE

La ricerca si è successivamente concentrata sulle modalità di rimozione dei moduli. La linguetta iniziale, pur funzionale, risultava visivamente invasiva e poco integrata nel sistema, oltre a poter intralciare il passo. Sono quindi state ideate delle soluzioni che permettessero un esercizio di forze nella corretta direzione, garantendo però una maggiore pulizia formale.

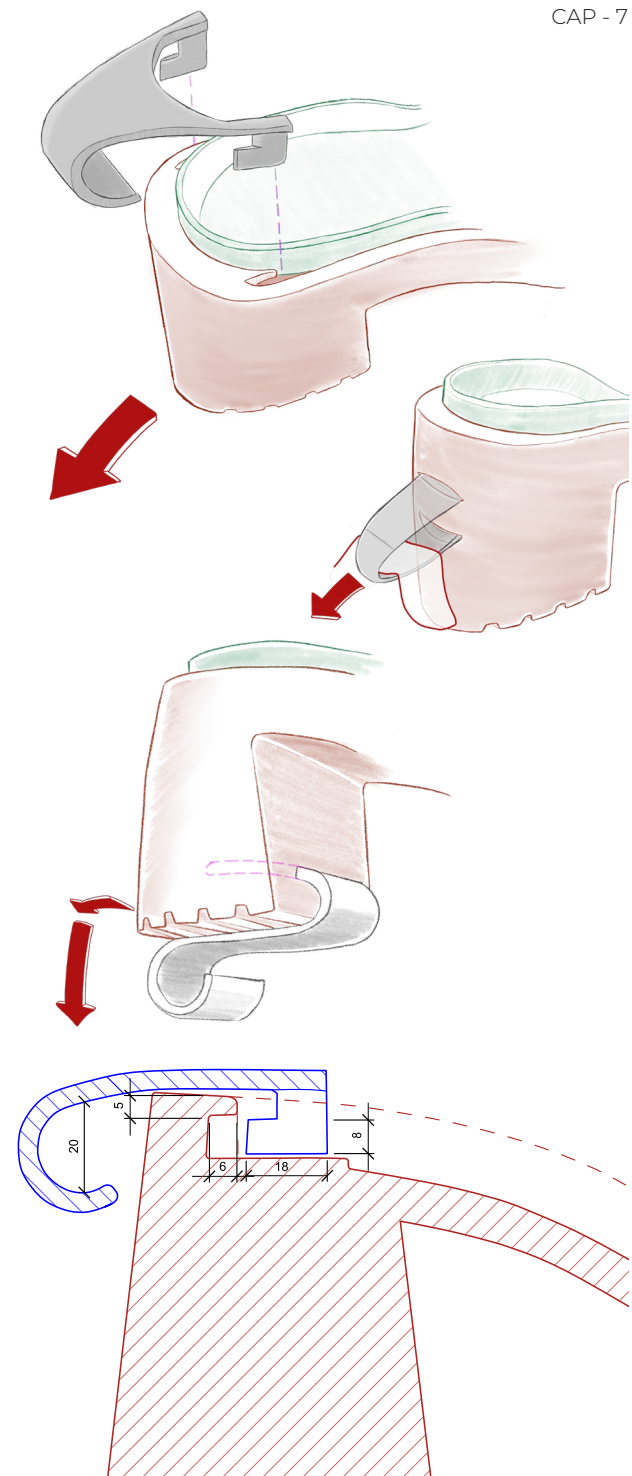
Tra le soluzioni ideate e testate:

■ **linguetta removibile:** una linguetta inseribile ad incastro tramite due alloggiamenti nel tallone. Benché funzionante, richiede un allargamento dell'area del tallone.

■ **Fascia removibile di trazione:** un nastro, inseribile in una fessura posteriore, permette all'utente di esercitare una forza di trazione sulla suola con agevolezza. Il limite è dettato dalla presenza di due discontinuità visive nei moduli delle suole.

■ **Incastro ad uncino nel tacco:** adatto a generare sufficiente leva nella scarpa, determina dei limiti nel dimensionamento del tacco dei vari moduli

■ **incavo per presa:** un incavo posteriore consente di deformare leggermente il modulo per facilitare la rimozione.





A seguito dell'esplorazione di queste possibilità, è stato valutato come un elemento aggiuntivo da utilizzare per la sostituzione dei moduli sarebbe risultato una complicazione eccessiva dell'esperienza d'uso, oltre a comportare più vincoli formali per la calzatura.

Seguendo una logica di *trade-off*, perciò, è stata privilegiata la semplicità formale ed espressiva, ottimizzando i dimensionamenti e gli smussi del tallone per garantire una rimozione manuale sufficientemente agevole, simile a quella

necessaria per molti degli stivaletti già presenti sul mercato (vd. Doctor Martens). In via opzionale, è possibile aiutarsi con un calzascarpe per esercitare forza sul tallone.

Inoltre, nel prototipo di testing è stata introdotta la discontinuità nell'area di flessione anteriore, con un profilo corrispondente a quello delle scanalature del battistrada. Per facilitare la flessione, le pareti laterali della suola sono leggermente inclinate (3°).



7. TACCO A PROFILO TRAPEZOIDALE

Un ulteriore prototipo ha permesso di validare nuove geometrie del tacco, del dente e del labbro, oltre a una revisione della divisione dell'interfaccia nella zona anteriore.

Una nuova intersuola ha introdotto un disegno superficiale per facilitare l'assemblaggio con la tomaia

Avanzamenti

- Introduzione di un filamento colorato (TPU Elegoo 95A)
- Miglioramento di smussi e raccordi del modulo
- Riduzione complessiva dell'ingombro

Criticità

- Variazione della tomaia, per mantenere una maggior armonia con le proporzioni della suola.

7.6 I prototipi

Al termine della sperimentazione sono stati prodotti i prototipi delle tre soles intercambiabili presentate, utilizzando dei filamenti in TPU di durezza *Shore 95A*. Questi sono stati impiegati in verifiche funzionali e dell'espressività complessiva del sistema [fig 7.15, 7.16].

Figura 7.15

Fotografia dei prototipi realizzati per la sperimentazione, utilizzando una tomaia preesistente.





TESTING DEI PROTOTIPI

Durante il testing è stata verificata la tenuta dei collegamenti in condizioni di stress di varia natura [fig 7.17, 7.18]. Ogni modulo è stato validato in cicli di camminata, corsa e salto, oltre che applicando carichi concentrati sulle superfici laterali, anteriore e posteriore; queste prove sono state compiute sia su un terreno liscio che su uno irregolare.

I principali aspetti presi in considerazione risultano la comodità di accoppiamento e separazione dei moduli, la tenuta complessiva del sistema, la flessibilità (in particolare nell'avampiede), la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni e la possibile formazione di disallineamenti.

Le prove sono servite anche a validare la rigidità dei moduli più alti ed il *comfort* durante l'utilizzo.

Benché si siano riscontrate alcune differenze dovute all'uso di un materiale più rigido rispetto a quello pensato per i prodotti finali, è stato possibile confermare l'affidabilità del sistema di collegamento.

Figura 7.16
Fotografia dei prototipi delle
suole accoppiati e del modulo
tomaia-intersuola.

Figura 7.17 e 7.18
Immagine del sistema durante
la fase di testing su un terreno
irregolare costituito da ciottoli e
nei test di rimozione.





INFILL VARIABLE

È stato possibile variare localmente il riempimento dei moduli, per alterare le proprietà di:

- **Stabilità** dell'arco plantare in camminata;
- **Flessibilità** dell'avampiede (tra metatarsi e falangi);
- **Morbidezza** del labbro di incastro;
- **Assorbimento** della pressione esercitata dall'utente;
- **Peso** complessivo del modulo;

Nel caso dei prototipi è stato impiegato un riempimento giroidale [fig 7.19]; si può, tuttavia, ipotizzare nel prodotto finale un *infill* customizzato, intervenendo con più precisione nel *G-code* della macchina. Tale soluzione è molto adottata dai produttori di calzature in FDM presenti sul mercato, perché consente di incrementare sensibilmente la durabilità del prodotto sul lungo periodo, ottimizzando l'orientamento delle *layer lines* e massimizzando il controllo delle proprietà meccaniche; si riscontrano dei miglioramenti anche dal punto di vista della resistenza all'abrasione e del grip sul terreno.

Naturalmente la tipologia di celle e di densità sarà dipendente dalle osservazioni riportate dopo un *testing* dei materiali pensati per il prodotto finale, più morbidi rispetto al TPU impiegato in fase di prototipazione e caratterizzabili con additivi differenti.

Figura 7.19
Immagine del riempimento giroidale differenziato impiegato nei prototipi, qui nella suola *Platform*



VINCOLI FORMALI

La tipologia di sistema interbloccante impiegata è caratterizzata da uno spessore di 6 mm quando le due interfacce sono accoppiate; questo vincolo può essere ovviato solamente comprovando l'usabilità di sistemi di accoppiamento meno spessi.

Per garantire sufficiente resistenza a fatica dei componenti, inoltre, ogni parete presenta uno spessore minimo di 3 mm, con due *loop* perimetrali a definire il volume della geometria.

In generale, la geometria dei prototipi è stata definita sulla base della tomaia impiegata, ricavata da uno stivaletto reperito in commercio; la progettazione di una tomaia *ad hoc* consentirà un alleggerimento dimensionale e un maggior controllo della flessibilità di questo modulo [tab. 7.20].

Tabella 7.20
Tabella riassuntiva delle differenze tra prototipi realizzati e prototipo finale ideato.

Prototipo di testing	Prodotto finale
Uso di TPU 95A	Uso di Foamy TPU di durezza Shore 85-70A
Riempimento giroidale (7-35%)	Riempimento con G-code custom ottimizzato
Collegamento interbloccante reperibile nel commercio al dettaglio	Superfici interbloccanti sagomate più precisamente, con densità variabile
Produzione tramite FDM desktop, entry level	Uso di macchinari di AM industry grade o di tecnologie di stampaggio tradizionali (es: sistemi 3ntr o Stratasys)
Tomaia ricavata da una calzatura preesistente	Tomaia personalizzata in pelle morbida, dall'ingombro minore

LA RIMOZIONE

I test hanno riguardato anche la rimozione dei moduli della suola. Questa può avvenire sia tramite le mani che con i piedi, esercitando una pressione nella sporgenza di 7-10 mm posteriore alla suola. In questo modo è possibile innescare un *peeling* progressivo delle interfacce interbloccanti, disaccoppiando i moduli [fig. 7.21].

In alternativa, l'utente può utilizzare un calzascarpe, inserendolo nell'area del labbro posteriore al tallone ed esercitando pressione; una battuta di 3 mm permette un appoggio sufficientemente saldo [fig 7.22].

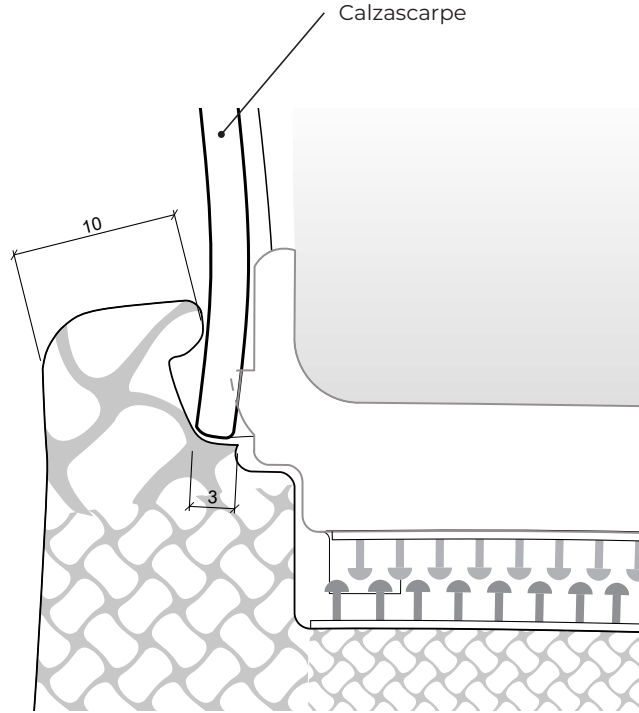
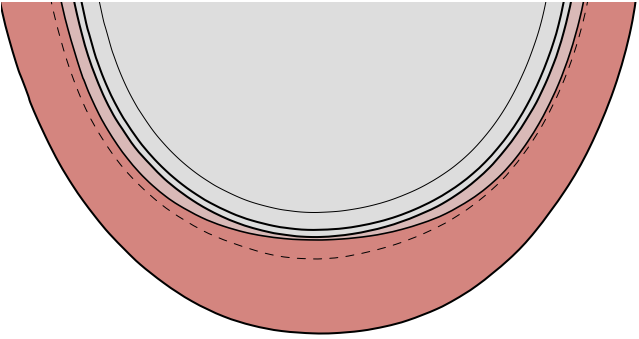


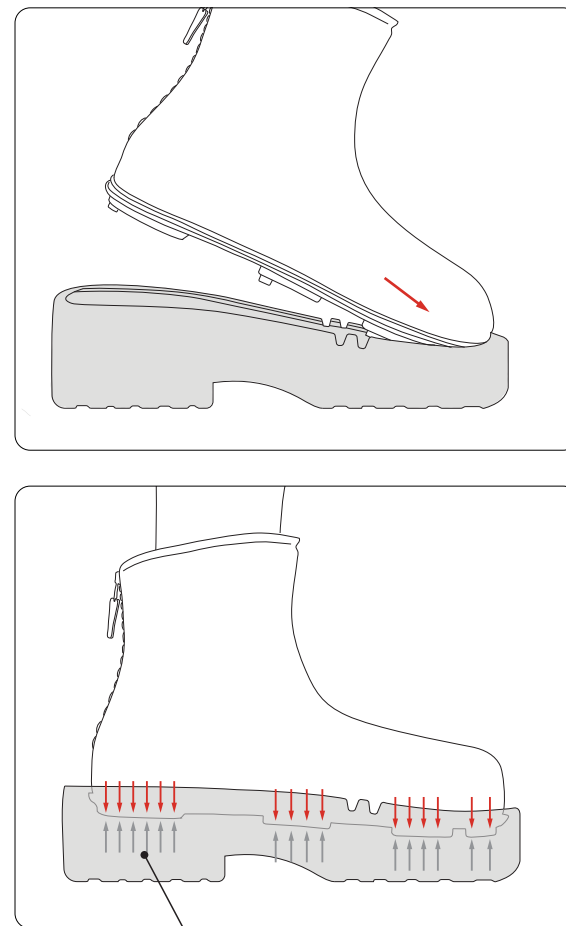
Figura 7.21
Dettaglio della sporgenza posteriore della suola Low, su cui esercitare pressione tramite la mano o il piede.

Figura 7.22
Sezione laterale: inserendo il calzascarpe, il labbro viene leggermente deformato, permettendo l'incastro e l'esercizio di pressione per rimuovere il modulo.

Vista superiore del sistema: il labbro si assottiglia nell'area anteriore per lasciare spazio funzionale all'appoggio del calzascarpe.



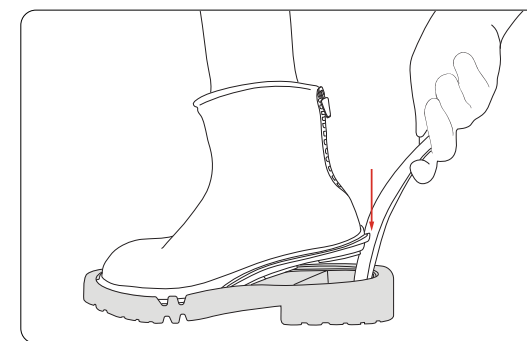
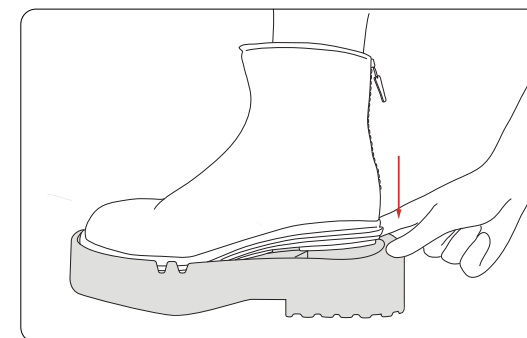
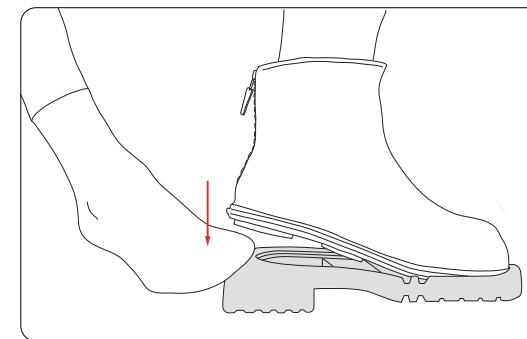
7.7 Storyboard di utilizzo



ACCOPIAMENTO DEI MODULI

Per accoppiare i moduli più comodamente, l'assemblaggio può avvenire da seduti. Applicando la pressione del proprio peso corporeo, il labbro della suola viene deformato ed il sistema interbloccante consolida l'incastro delle testine.

La pressione esercitata dall'utente durante l'utilizzo è funzionale al consolidamento delle interfacce interbloccanti.



SEPARAZIONE DEI MODULI

Dopo l'utilizzo, è necessario esercitare pressione con le mani, i piedi o un calzascarpe nell'area posteriore al tallone, per innescare il distacco della suola.



COLLEGAMENTO PARZIALE

Nel momento di scelta dei moduli, è possibile accoppiare debolmente le suole con il resto della scarpa, applicando una pressione più bassa. In questo modo si può confrontare la resa estetica delle configurazioni rapidamente.

7.8 Ipotesi produttive

Rispetto ai prototipi realizzati, la transizione verso una produzione seriale implica alcune variazioni sia in termini di materiali sia di tecnologie adottabili.



Figura 7.23
Fotografia di una tomaia con chiusura *Strobel* [228].

TOMAIA

Per questo componente tra le priorità si osserva la possibilità di separare il più possibile i materiali eterogenei, permettendo la rigenerazione del sistema e agevolando il processo di riciclo. Due strategie di assemblaggio con l'intersuola sono state prese in considerazione:

1. Incollaggio con TPU *hot melt*

Utilizzo di adesivi termopoliuretanicici applicati a caldo, caratterizzati da una temperatura di rammollimento che può variare tra i 70° ed i 120°C. È perciò possibile una loro riattivazione termica per indebolire l'adesione e separare i componenti. L'affinità chimica con l'intersuola in TPU riduce inoltre il rischio di contaminazione del materiale, preservandone la riciclabilità [226, 227].

Chiusura *Strobel* della tomaia

Per evitare deterioramenti della tomaia a seguito del distacco è adottabile un'architettura del componente molto diffusa nelle *sneakers*, detta cucitura *Strobel*. Questa chiusura è caratterizzata dalla presenza di una "*Strobel board*" (o *Strobel sock*) cucita lungo il perimetro della tomaia; si tratta di un elemento morbido e flessibile che tiene uniti gli altri costituenti indipendentemente dal collegamento con l'intersuola, preservando la forma complessiva del componente [fig. 7.23]. In questo modo, si ottiene una tomaia più compatta e resistente agli stress comportati dal disassemblaggio.

2. Cucitura

Specialmente nelle calzature artigianali, è possibile adottare soluzioni prive di incollaggio, basate su cuciture strutturali dei componenti e permettendone una separazione ottimale in fase di riciclo o rigenerazione; tra i metodi più diffusi si possono citare le cuciture *Goodyear* o *Stormwelt*. Questi sistemi spesso prevedono la cucitura di un guardiolo alla tomaia, successivamente cucito o saldato al resto della suola. Pur facilitando sensibilmente il disassemblaggio, sono necessarie molte accortezze formali nella geometria dei componenti, perciò l'adozione di questi metodi altererebbe l'ingombro dell'intersuola.

INTERSUOLA

Può essere realizzata con tecnologie di stampa a filamento fuso di livello industriale, coerentemente con quanto già sperimentato nel mercato [fig. 7.24].



Figura 7.24
In alto: il brand inglese Doctor Martens assembla la suola degli stivaletti alla tomaia mediante saldatura: un guardiolo in PVC è cucito alla tomaia e viene successivamente fuso, per potervi saldare la suola realizzata nello stesso materiale [229].

In basso: esempio di soletta con disegno parametrico per incrementare la traspirabilità [230].

SUOLE

La produzione delle suole può avvenire tramite fabbricazione additiva, per mantenere le peculiarità che questa tecnologia fornirebbe ai componenti. In particolare, risultano adatti diversi macchinari FDM di fascia industriale, con costi nell'ordine di 5-30.000 euro ciascuno. Rispetto alle stampanti “da banco”, questi sono caratterizzati da:

- **Produzione in camera chiusa**, fornendo un controllo più rigoroso della temperatura
- **Volumi di stampa maggiori**, consentendo la produzione di un paio in un solo ciclo
- **Capacità di stampa multimateriale**, aumentando le possibilità funzionali ed espressive del prodotto o facilitando la rimozione dei supporti, per mantenere una finitura superficiale ottimale. Sono infatti impiegabili materiali idrosolubili e biodegradabili, come il Copolimero Butenediolo-Alcol Vinilico (BVOH), removibili tramite processi di lavaggio, anche con acqua fredda. Sono solitamente utilizzate macchine con più teste di stampa, per una deposizione di materiale senza i rallentamenti della stampa determinati dal cambio di filamento nel singolo estrusore [fig. 7.25] [231].
- **Tempi di stampa ridotti**
- **Minor intervento umano** e ridotte possibilità di fallimento

Un ulteriore livello di ottimizzazione riguarda la generazione di *G-code* personalizzati, modificando la tipologia di riempimenti adottati e definendo il percorso di deposizione degli estruso-

ri con massima precisione. Ad oggi i player attivi nella produzione di calzature in AM in ambito industriale spesso adottano materiali, tecnologie *software* e *hardware* proprietari, per ottenere un controllo completo del processo produttivo.

La stampa di tacchi sottili

In fase di ingegnerizzazione sarà necessario valutare se il disegno interno dei moduli garantisca un grado sufficiente di rigidità e resistenza alle deformazioni in cicli ripetuti dei moduli con tacchi più pronunciati.

Se infatti nel caso di suole con tacchi bassi e dalla sezione trasversale ampia si riscontrano vari casi studio in commercio nei quali non è necessario l'inserimento di supporti rigidi, così come anche nelle calzature tradizionali tipo *platform* spesso è sufficiente la suola elastomerica [232] per tacchi alti e sottili potrebbe essere necessario un controllo più approfondito.

In questo caso, si potrebbe svolgere una stampa multimateriale o l'incapsulamento di un componente più rigido durante la stampa. Tra i materiali utilizzabili sono considerabili termopoliouretani molto rigidi (es: 60D o l'RPD, già utilizzato per produrre alcuni stilette in fabbricazione additiva) oppure nylon rinforzati, di cui esistono anche alternative *bio-based* (come il PA11 derivato dall'olio di ricino).

Figura 7.25

La scarpa Air Max 1000 è realizzata da Nike in collaborazione con Zellerfeld impiegando supporti solubili per efficientare sensibilmente la linea produttiva [233].



7.9 Modello di business

La valutazione delle possibilità produttive dipende fortemente dai volumi previsti [tab. 7.26]:

Produzione *on-demand*

Le tecnologie FDM ad oggi presentano tempi di produzione piuttosto eterogenei, che variano da 2-3 ore fino a circa 25 ore di stampa, a seconda della complessità della geometria.

I principali *player* attivi nel settore adottano impianti industriali contenenti dal centinaio a poche migliaia di macchinari di stampa. Il caso più documentato è quello della compagnia tedesca Zellerfeld, che dichiara una capacità produttiva di oltre 40.000 paia di scarpe all'anno tramite due impianti da 200 e 2000 macchinari; l'azienda è in crescita e afferma di voler raggiungere il milione di scarpe prodotte entro il 2028 [234]. Si può perciò affermare che, con una produzione nell'ordine delle decine di migliaia di scarpe, è possibile progettare una linea produttiva efficiente ed economicamente sostenibile.

È quindi ipotizzata una struttura produttiva distribuita, in cui la tomaia e le interfacce di collegamento sono prodotte da pochi impianti centralizzati, orientando invece la produzione dei moduli elastomerici in *hub* di medio-piccole dimensioni (50-200 macchinari) dislocati sul territorio; potenzialmente attrezzati anche per la rigenerazione dei componenti.

In questo scenario gli *hub* potrebbero divenire un punto di contatto per l'utente, dando la possibilità di scegliere le caratteristiche dei moduli (profilo, colore, configurazione...) in fase di ordine, procedendo poi con una produzione *on-demand* ed un assemblaggio locali.

I vantaggi, in ottica di circolarità, si troverebbero in:

- una riduzione del volume di scorte di magazzino
- minori costi logistici e distributivi
- un rapporto più diretto con l'utenza, incentivando restituzione, rigenerazione e riciclo dei componenti usurati

Similarmente, si può delineare una produzione interamente artigianale, con la realizzazione della tomaia stessa all'interno del singolo *hub* in cui sono realizzati anche i moduli delle suole.

Produzione seriale tradizionale

Riferendosi a volumi produttivi più alti, nell'ordine delle centinaia di migliaia di unità per modulo, emergono i maggiori limiti in termini di efficienza dell'AM rispetto a tecnologie di produzione delle suole tradizionali (stampaggio a iniezione o a compressione, espansione...), caratterizzati da cicli di pochi secondi. In questo caso sarebbe comunque possibile mantenere la modularità del sistema, adottando però processi produttivi centralizzati e maggiormente standardizzati, con un minor grado di innovazione tecnologica nei processi e nei materiali.

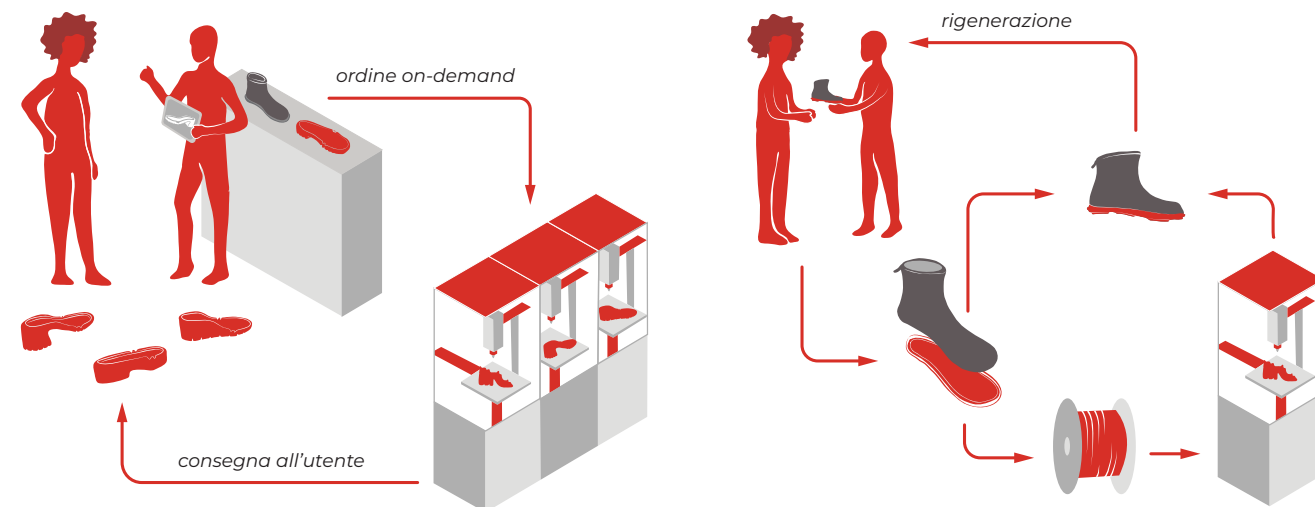
Un'alternativa consiste nel mantenere una produzione in fabbricazione additiva anche su larga scala, accettandone la minor efficienza economica. Ad oggi, le sperimentazioni più avanzate in questa direzione provengono soprattutto dai grandi *brand* sportivi come Adidas, che dal 2017 ha realizzato suole tramite tecnologie di stampa DLS in volumi di centinaia di migliaia di componenti e afferma di disporre dell'infrastruttura per compiere lanci da un milione di pezzi [235-236].

Tabella 7.26
Sintesi delle due possibilità di approccio alla produzione, a seconda dei volumi previsti.

	Prod. on-demand in AM	Prod. seriale tradizionale
Volumi (pezzi per modulo all'anno)	~10.000-90.000	> 100.000
Impianti produttivi	Impianti centrali (tomaia e interfacce) + hub distribuiti	Impianti centralizzati di grandi dimensioni, fortemente automatizzati
Vantaggi	▪ Inventario molto ridotto ▪ Distribuzione meno onerosa ▪ Personalizzazione più rapida dell'utente ▪ Innovazione tecnologica nei materiali e nelle architetture	▪ Alta efficienza produttiva
Criticità	▪ Tempi di realizzazione molto dilatati (5-25 h. circa) ▪ Bassa efficienza produttiva ▪ Maggior intervento umano	▪ Vincoli formali dettati dalla produzione per stampaggio a iniezione, per compressione, formatura... ▪ Minor flessibilità produttiva ▪ Investimenti iniziali elevati

7.10 Scenario di consumo

L'adozione di questo sistema da parte di un'utenza sufficientemente sensibile ai temi della durabilità e dell'impatto ambientale potrebbe introdurre modalità di consumo differenti rispetto a quelle tradizionalmente associate al settore calzaturiero:



■ Personalizzazione

In fase di acquisto, l'utente può configurare il sistema scegliendo le tipologie di moduli che prevede di utilizzare, a seconda dei contesti frequentati abitualmente, variando anche colore ed espressività. Una produzione *on-demand* garantirebbe la massima flessibilità, evitando problematiche di scorte in magazzino. Dopo la produzione e l'assemblaggio, il prodotto potrebbe essere distribuito sia tramite spedizione diretta sia attraverso punti vendita fisici e rivenditori.

■ Relazione post-vendita

Siccome il target a cui Modu si rivolge è caratterizzato dalla sensibilità alle tematiche dell'impatto ambientale e dell'*early disposal*, la presenza di molteplici *hub* dislocati nel territorio permetterebbe di riconsegnare, oltre ai moduli delle suole usurate, l'intersuola e la tomaia, nel caso di danneggiamenti. In questo modo sarebbe ad esempio possibile recuperare il cuoio contenuto o rigenerare la tomaia, dopo una sostituzione dell'intersuola e delle interfacce di collegamento.



Modelli simili sono già adottati da aziende che pongono particolare attenzione alla durabilità dei prodotti e alla relazione post-vendita con l'utente, come Patagonia, Vibram e Freitag [237-239].

■ Allargamento dell'ecosistema di suole

Benché nel progetto siano stati sviluppati moduli caratterizzati da un linguaggio formale essenziale, il sistema potrebbe evolvere nel tempo attraverso nuove famiglie di suole progettate per differenti contesti d'uso ed espressività.

L'adozione di un'interfaccia di collegamento condivisa consentirebbe inoltre l'apertura del sistema a collaborazioni con designer, professionisti o *brand* esterni, ampliando progressivamente l'ecosistema di componenti compatibili senza modificare l'architettura principale della scarpa.

Figura 7.27
Il sistema consente l'integrazione di nuove tipologie di moduli, come suole con tacchi di diversa geometria o a zeppa.

■ Possibilità di recupero

In seguito è proposta la schematizzazione del processo di riciclo e rigenerazione dei componenti, ipotizzato nel caso di una produzione in AM *on-demand* con volumi medio-bassi e adottando le accortezze progettuali precedentemente esposte per la selezione dei materiali.

Data la presenza esclusiva di polimeri termoplastici, è possibile il riciclo dei componenti anche all'interno del sistema stesso, riducendo, ad esempio, il TPU raccolto in nuovo filamento.

Per quanto riguarda il modulo tomaia-intersuola, invece, la via prioritaria di valorizzazione si può trovare nella rigenerazione della tomaia, accoppiandola ad una nuova intersuola, prevedendo che questo componente sia maggiormente suscettibile all'usura; come accennato, la presenza della *Strobel board* è finalizzata ad un distacco più agevole. Qualora non sia più possibile una rigenerazione, il riciclo della tomaia in cuoio può avvenire tramite triturazione e riutilizzo nei rinforzi dello stivaletto (*downcycling*).

Infine, i moduli delle suole possono essere valorizzati separando l'interfaccia dal resto del componente e riducendo i polimeri a nuova materia prima per l'AM o per lo stampaggio tradizionale.

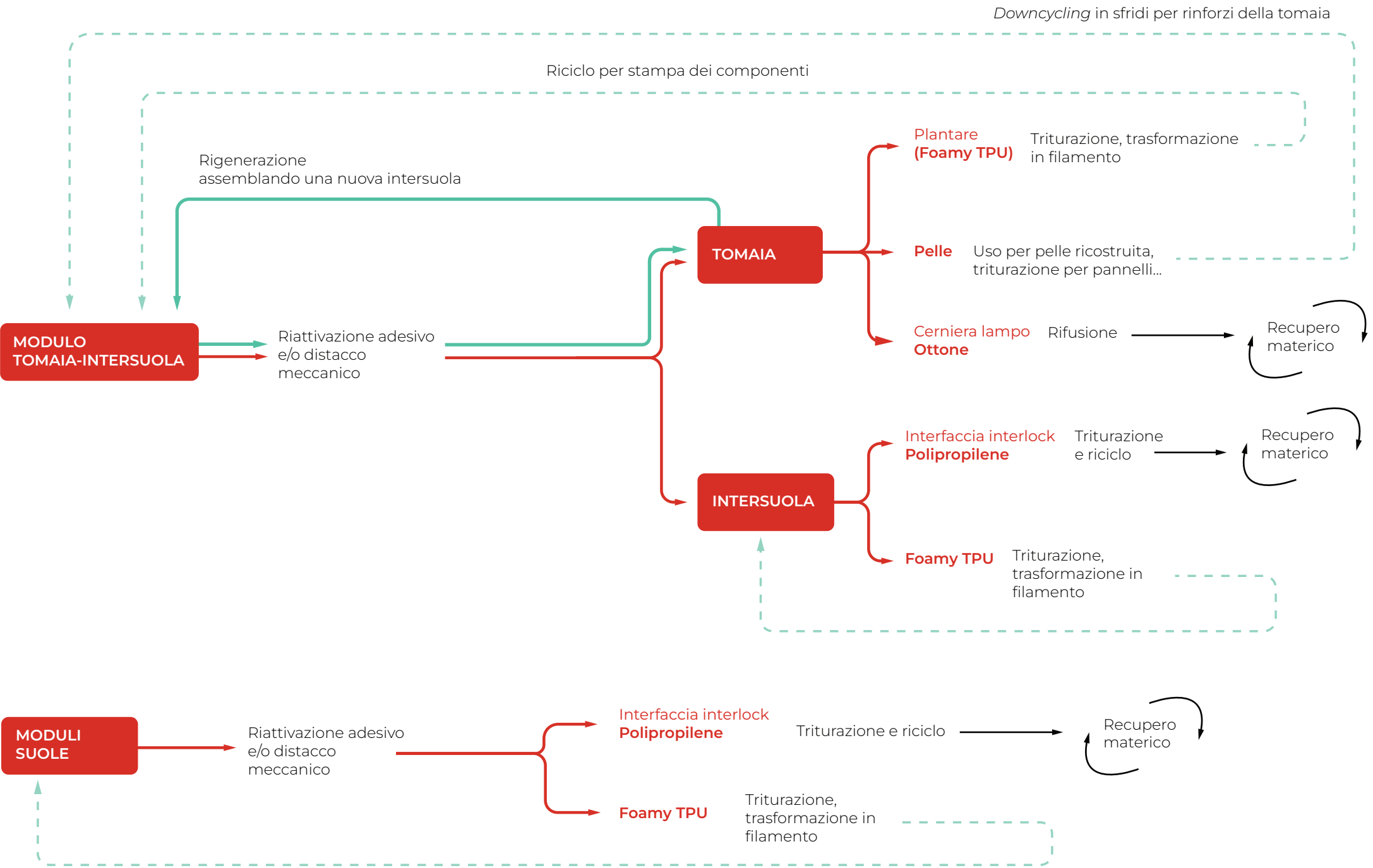


Figura 7.28
Schematizzazione dei possibili processi di recupero dei moduli del sistema.

Alla luce delle differenti possibilità perseguibili, la produzione in AM permetterebbe un maggior grado di innovazione dei componenti, sia facilitando il riciclo, impiegando suole in TPU a riempimento differenziato [fig. 7.29] rispetto ad architetture multimateriale tipiche delle suole tradizionali, sia consentendo maggior libertà formale ed una varietà di moduli meno onerosa dal punto di vista produttivo, non dovendo realizzare stampi *ad hoc* per ogni nuova geometria e decoro [fig. 7.30].



Figura 7.29

Sezione di un modulo della suola con riempimento differenziato giroidale (visualizzato dallo *slicer*)

Figura 7.30

La produzione in AM abilita la personalizzazione dei moduli senza elevati incrementi dei costi. Oltre a delle varianti minimali e visivamente pulite, l'utente può avere a disposizione anche moduli decorati con disegni e *texture*, sulla base delle proprie preferenze.



SFIDE FUTURE E CONCLUSIONI

Il progetto individua una possibile direzione per l'applicazione della modularità alle calzature in fabbricazione additiva, evidenziandone opportunità ed elementi che necessitano di maggior indagine. Le prospettive di sviluppo riguardano l'evoluzione dei materiali, delle tecnologie produttive e dei sistemi di collegamento, ma anche il valore simbolico che questa tipologia di prodotti potrà assumere per un'utenza generalista.

08



8.1 Verso la monomatericità

La proposta progettuale ha tenuto in considerazione l'adozione di archetipi formali ed espressivi consolidati all'interno del mercato, per favorire l'adozione da parte dell'utenza. Ciò ha tuttavia determinato il mantenimento di un certo grado di eterogeneità dei materiali, benché, dove possibile, siano state messe in pratica accortezze volte a limitarne la varietà.

In particolare, ad oggi l'adozione di tomaie in AM per modelli "classici" non è ancora contemplata dalla maggioranza dei potenziali consumatori, date le differenze di proprietà fisiche, estetiche e sensoriali tra i materiali elastomerici e materiali tradizionali come tessuti o cuoio. Si possono osservare i primi tentativi di avvicinare questa tecnologia a modelli di scarpa formali, ma una diffusione significativa potrà probabilmente essere apprezzata solo nel medio-lungo periodo [Fig. 8.1].

In generale, lo sviluppo di calzature in AM, benché già ricco di sperimentazioni anche in ambito autoproduttivo, potrà essere ulteriormente accelerato dalla diminuzione dei costi delle tecnologie *desktop* capaci di lavorare materiali a basse durezza *Shore* e dalla diffusione di filamenti specificamente ottimizzati per l'impiego nelle calzature.

Negli ultimi anni questi materiali stanno progressivamente raggiungendo una distribuzione più ampia, ma non competono ancora, in termini di durabilità e proprietà meccaniche, con i filamenti proprietari destinati all'ambito industriale, ancora esclusivi di un numero ristretto di aziende.

Infine, il potrebbe vedere una maggior ricerca nella definizione di sistemi interbloccanti di collegamento in AM, comparabili con quelli realizzati da *Velcro* o da *3M Dual Lock*. Queste soluzioni consentirebbero un'ulteriore diminuzione della varietà di materiali presenti nel sistema; ad oggi sono già state compiute alcune sperimentazioni in TPU, ma persistono dei limiti in termini di rigidità ottenibile e di controllo dimensionale (un requisito fondamentale per garantire precisione nel collegamento).

Figura 8.1
In alto: alcuni dei primi esempi di scarpe interamente in TPU vicine ad un linguaggio classico o formale (Zellerfeld Fomaru e Astra) [240,241].

In basso: sperimentazioni di sistemi richiudibili con testine in AM, realizzati in TPU, PEEK e polimeri siliconici, pensati per molti ambiti, dall'edilizia al biomedicale [242, 243].



8.2 Il fine vita

Come già riportato, ad oggi l'incollaggio dei componenti rimane l'opzione più largamente impiegata dai produttori di calzature, dati la semplicità ed i costi contenuti; inoltre, i sistemi di cucitura maggiormente orientati al disassemblaggio e alla riparazione impongono spesso vincoli formali più marcati al prodotto.

Tra gli sviluppi più interessanti legati all'ottimizzazione del fine vita delle calzature, si può citare la tecnologia degli adesivi *"De-Bond on Demand"*. Con questo termine si definiscono tipologie di adesivi che a seguito di uno stimolo esterno di disattivazione perdono il loro potere adesivo, consentendo una separazione agevole dei substrati; questo input può essere di natura termica, magnetica (con l'applicazione di un campo magnetico per riscaldare le nanoparticelle contenute nell'adesivo), chimica (ad esempio attraverso l'idrolisi) o luminosa (tramite l'esposizione a radiazioni UV) [Fig. 8.2].

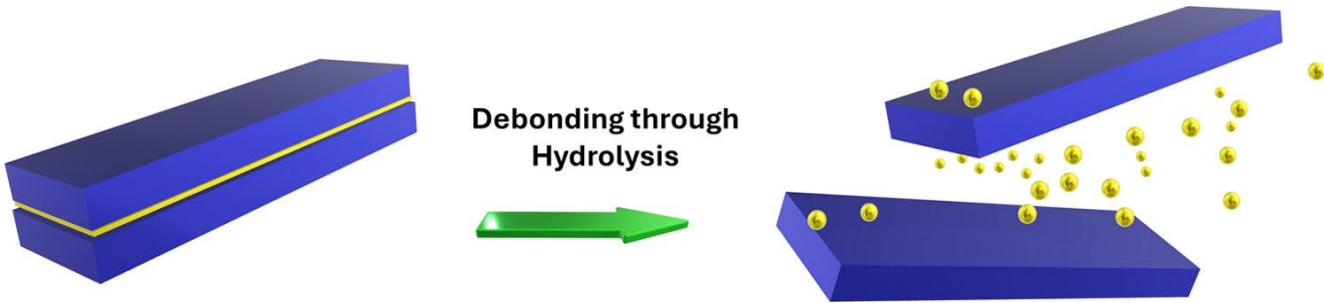


Figura 8.2
Tra le diverse modalità di *debonding* dei due substrati, lo sfruttamento dei processi di idrolisi risulta una delle possibilità più promettenti [246].

Molti di questi adesivi sono di natura poliuretanica, additivati con molecole di diversa composizione per innescare tali reazioni [244, 245].

Ad oggi si tratta di una tecnologia in fase sperimentale, non ancora adatta ad applicazioni commerciali a causa dei limiti che caratterizzano ogni metodo di de-attivazione (come le elevate temperature di reazione richieste). Tuttavia, oltre ai settori aerospaziale, biomedicale ed elettronico, anche il *footwear* rientra tra gli ambiti applicativi considerati più promettenti.

8.3 Educazione alla sostenibilità

L'interesse crescente verso prodotti a minor impatto ambientale, oltre alla sempre più urgente necessità di affrontare tali tematiche, porterà progressivamente a nuove modalità di consumo e relazione con gli oggetti d'uso quotidiano. Nel caso del sistema modulare presentato, sarà necessario agire su tre principali aspetti:

■ Accrescere la consapevolezza

Sarà necessario comunicare con più chiarezza i costi e le risorse implicate nella realizzazione di prodotti durevoli ed attenti al proprio impatto, evidenziando i vantaggi di un maggior investimento iniziale in termini di qualità, manutenzione e durata nel lungo periodo, rispetto a prodotti più economici ma caratterizzati da cicli di vita ridotti e fortemente legati alle logiche della moda.

■ Favorire un rapporto più diretto con il produttore

L'incentivazione dell'acquisto fisico rispetto all'ordine *online*, supportata da una distribuzione sufficientemente capillare, potrebbe facilitare non solo la diffusione del prodotto, ma anche una relazione più continuativa con il produttore, abituando l'utente a questa interazione [Fig. 8.3]. Ciò renderebbe più naturale per il consumatore tornare nuovamente per la sostituzione dei moduli, il conferimento di moduli usurati e dei componenti da rigenerare.

■ Disincentivare l'overconsumption

Come già evidenziato, un sistema modulare rischia di ricadere nelle stesse logiche consumistiche basate sulle mode o su impulsi dettati dal *marketing* che caratterizzano il *footwear* tradizionale. Per far fronte a questo aspetto, oltre a comunicare in modo trasparente il ciclo di vita del prodotto, può risultare utile evitare espressività eccessivamente *"trend-driven"*, ridurre la frequenza dei lanci annuali e accompagnare gli aggiornamenti estetici con innovazioni funzionali concrete.

Figura 8.3
L'azienda di scarpe francese Veja propone, all'interno di alcuni dei propri store, un servizio di riparazione a prezzi accessibili, incoraggiando il contatto diretto e la frequentazione del negozio anche dopo l'acquisto [247].



8.4 Sintesi dei risultati

Il percorso di tesi ha permesso di approfondire il panorama delle calzature realizzate tramite fabbricazione additiva, esplorandone sia le implicazioni tecnologiche sia le possibilità progettuali. È stata poi sperimentata una proposta modulare che integri sistemi di collegamento poco indagati nel settore *footwear*, definendo un possibile percorso di sviluppo progettuale e mettendo in evidenza le principali criticità tecniche ed espressive da affrontare. Infine, da questa proposta è stato ipotizzato uno scenario di consumo che si discosti dal modello classico di acquisto e sostituzione integrale del prodotto, introducendo logiche di aggiornamento e rigenerazione dei componenti nel corso della vita utile della calzatura.

Dai risultati emersi si può osservare come:

- La fabbricazione additiva di scarpe rappresenta una nicchia in forte crescita, che sta progressivamente consolidando la propria presenza nei contesti in cui le sue peculiarità risultano realmente vantaggiose, come il *running* e il settore ortopedico. Allo stesso tempo, stanno emergendo sperimentazioni anche in ambiti differenti, sia tecnici sia *lifestyle*, suggerendo un'espansione progressiva delle possibilità applicative. Benché allo stato attuale risulti improbabile una sostituzione completa dei processi produttivi convenzionali, appare plausibile una coesistenza tra manifattura tradizionale e AM, ricorrendo a quest'ultima soprattutto nei casi in cui la minore efficienza produttiva venga compensata dalla libertà geometrica ottenibile, dalla personalizzazione, dall'integrazione funzionale dei componenti o dalla possibilità di produrre piccoli lotti in modo economicamente sostenibile.

- L'impiego dell'AM nel *footwear* apre molti scenari interessanti sul piano della sostenibilità ambientale, con la possibilità di realizzare componenti e interi prodotti monomaterici, controllando localmente con precisione le proprietà [fig. 8.4]. Parallelamente, l'accettazione di queste tecnologie da parte dell'utenza generalista non dipenderà esclusivamente dalle prestazioni funzionali ottenibili, ma anche dalla capacità dei prodotti di integrarsi all'interno di codici estetici e archetipi formali già consolidati nella percezione comune della scarpa [fig. 8.5].

- Uno degli sviluppi più rilevanti risiederà nella formulazione di elastomeri sempre più performanti in termini di durabilità, specialmente in termini di resistenza all'abrasione e comportamento nel lungo periodo.

Ad oggi diversi *player* privati hanno sviluppato materiali capaci di competere con i corrispettivi tradizionali, ma tali soluzioni rimangono spesso circoscritte a ecosistemi produttivi proprietari. Parallelamente, la progressiva accessibilità di *software* di modellazione e *slicing* specializzati, insieme alla diffusione di stampanti multi-materiale (soprattutto se dotate di più teste di stampa) potrebbe alimentare ulteriormente la sperimentazione indipendente e il dibattito *open-source* legato alla progettazione di calzature.

- Anche la modularità rappresenta un ambito ricco di prospettive future. Sebbene le scarpe abbiano già conosciuto numerosi approcci modulari nel corso del tempo, le tecnologie di AM non possono che incentivare la sperimentazione, rappresentando strumenti di prototipazione fisica rapidi, sufficientemente fedeli e relativamente accessibili.

Figura 8.4
Il riempimento dei prototipi è stato impostato dal *software* di *slicing* mediante l'uso di modificatori.



■ Riguardo all'utilizzo di sistemi interblocanti "simil-Velcro", la commercializzazione di interfacce che siano più affidabili dei sistemi tradizionali *hook and loop*, senza però raggiungere i livelli delle varianti tecniche per utilizzi industriali, potrà aprire nuove indagini per un utilizzo nel *footwear*. Allo stesso tempo, il breve e medio periodo sembrano destinati a vedere ulteriori sviluppi nel campo degli adesivi reversibili e delle tecnologie orientate al disassemblaggio, affrontando una delle criticità più significative del fine vita delle calzature.

■ La progettazione di sistemi modulari richiede inoltre di confrontarsi con la complessità della biomeccanica del piede e delle sollecitazioni generate nel ciclo di camminata. Le diverse aree anatomiche sono infatti caratterizzate da carichi di varia natura (tra cui trazione, compressione, *peel* e torsione), distribuiti in modo variabile durante l'utilizzo della scarpa; in special modo, la regione del mesopiede e quella al termine delle ossa metatarsali risultano di maggior interesse.

Ogni sistema di collegamento utilizzabile presenta specifici vantaggi e limiti in termini di stabilità, flessibilità, ingombro, facilità di utilizzo o impatto sull'espressività del prodotto. In generale, assume particolare rilievo la ridondanza dei collegamenti, al fine di distribuire le sollecitazioni in modo ottimale evitando concentrazioni localizzate di tensioni e stress.

■ Considerando la quantità di ricerca scientifica, materiali sperimentali e tecnologie già disponibili in ambito accademico e industriale, si può infine affermare che un cambiamento realmente significativo nell'impatto ambientale del *footwear* dipenderà soprattutto dalla volontà dei grandi *player* di trasferire queste innovazioni in produzioni ad alti volumi, oltre che dalla capacità dei consumatori di mettere in discussione le proprie abitudini di acquisto, utilizzo e smaltimento, ridefinendo i criteri con cui attribuiscono valore a un prodotto calzaturiero.

Figura 8.5

Lo studio Formism mira a favorire la diffusione delle calzature stampate in 3D, proponendo modelli adatti a contesti d'uso differenti e caratterizzati da linguaggi estetici che spaziano da soluzioni futuristiche a profili più tradizionali.

La ricerca si concentra sul raggiungimento di prestazioni comparabili a quelle delle calzature convenzionali, contribuendo a superare la percezione della scarpa in AM come semplice esercizio di design concettuale. I modelli sviluppati sono producibili su stampanti *dekstop* accessibili [248].



BIBLIOGRAFIA

09



CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

[1] Doppiozero, 2018, Cento di questi giorni / Il centenario di Achille Castiglioni [consultato il 22/6/2026]
https://www.doppiozero.com/il-centenario-di-achille-castiglioni

[2] Makerworld, 3D printed shoes https://makerworld.com/en/collections/6050951-3d-printed-shoes

[3] Reddit/r/3Dprinting
https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/1kif96n/3d_printed_shoes/

[4] Jakub Zerdzicki, Pexels
https://www.pexels.com/photo/colorful-3d-printing-threads-on-spools-19376296/

[5] Tong Zhan, C., Rafiu King, R., et al., 2024, Application of 3D Printing Technology in Footwear Design and Manufacture – A Review of Developing Trends, Textile e Leather review, vol.7

CAPITOLO 2: IL CONSUMO DI CALZATURE

[6] Rodriguez-Macua, C. et al., 2025, *Increasing footwear durability to reduce environmental impact through the addition of graphene in shoe soles*. Int J Adv Manuf Technol

[7] Chrobot, P. et al, 2018, Measuring Fashion 2018 Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries, Study Full Report and Methodological Considerations

[8] World Footwear, 2023, The World Footwear Yearbook [consultato il 6/4/2026] https://share.google/5LiFJBGI mZnc4wsh5

[9] Market Research Intellect, 2026, Footwear Market Report [consultato il 6/4/2026] https://www.linkedin.com/pulse/download-eu-rope-footwear-market-report-ywyge/

[10] Van Rensburg, M., s'Phumelele, N. et al., 2020, Life cycle and End-of-Life management options in the footwear industry: A review, Waste Management & Research, vol.38

[11] Kuru Footwear, 2023, American Footwear Spending: A 2023 Survey [consultato il 6/4/2026]
https://www.kurufootwear.com/blogs/articles/footwear-survey-2023?srltid=AfmBOorXL5I672UVTG2jBcHKVvwGzzN_acLb-FJfER8k3H6TkIZG5L5I0

[12] Rahimfard S., 2014, Recycling materials from worn shoes, World Footwear, may-june 2014

[13] Gottfridsson M., Zhang Y.,2015, Environmental impacts of shoe consumption-Combining product flow analysis with an LCA model for Sweden, Tesi di laurea, Chalmers University of Technology, Tomas Rydberg and Jenny Lexén

[14] Business Insider, 2023, How Adidas, Asics, and Other Shoemakers Deal With Waste, [consultato il 6/4/2026]
https://www.youtube.com/watch?v=C032oem5eaY

[15]Halfort M., 2024, Cutting up shoes to measure their carbon footprint, Carbon Fact [consultato il 6/4/2026]
https://www.carbonfact.com/blog/knowledge/measuring-foot-print-shoes

[16] Cheah, L., Ciceri, ND., et al.. 2013, Manufacturing-focused emissions reductions in footwear production, Journal of Cleaner Production, Vol 44, pp.18-29,

[17] Suston Magazine, Stepping into circular economy https://sustonmagazine.com/tag/soex/

[18] Yanko Design, Mosaic-like stools are made from the soles of discarded rubber shoes https://www.yankodesign.com/2024/09/03/mosaic-like-stools-are-made-from-the-soles-of-discarded-rubber-shoes/

[19] Nicekiks, New Company Producing Cake-Inspired Sneaker Soles from Recycled Materials https://www.nicekicks.com/new-company-producing-cake-inspired-sneaker-soles-from-recycled-materials/

[20] Happy Walk blog, 2024, Average expiration duration of a footwear? Or determine the age of footwear? [consultato il 6/4/2026]
https://happywalk.in/blogs/news/average-expiration-duration-of-a-footwear-or-determine-the-age-of-footwear?srltid=Afm-BOoo6tHOKa7EOcCu7vNtrBK63NfoqcEGLLoNLfzTGeBw6sTdLiB_LD

[21] Magnorsky B., 2025, How Long Should Shoes Last If You Wear Them Everyday: Expert Insights, Dance Shoes Adore [consultato il 6/4/2026]
https://adoredanceshoes.com/blogs/dance-shoes/how-long-should-shoes-last-if-you-wear-them-everyday-expert-insights?srltid=AfmBOOpZZRWIt4UcBX0BR3Xsw7z7Ac9rlrV1TJn5oT4b0XTh-gecv-V5M

[22] Doing Footwear, n.d, How long do shoes last [consultato il 6/4/2026]
https://www.doingfootwear.com/how-long-do-shoes-last-2/

[23] YDA Uk Blog, n.d, Why Replace Shoes Regularly for Foot Health [consultato il 6/4/2026]
https://ydauk.com/blogs/blog/why-replace-shoes-regularly

[24] Product Sustainability Directory, n.d, Premature Disposal [consultato il 6/4/2026]
https://product.sustainability-directory.com/area/premature-disposal/

[25] Sneaker Cushioning: What's Best for You?, https://bestuadjvl.click/product_details/341l6524.html

[26] Reddit, How to fix the hole in a mesh shoe? https://www.reddit.com/r/howto/comments/1rwy8kt/how_to_fix_the_hole_in_a_mesh_shoe/

[27] Unsplash

[28] Reddit, After 6 years of wear, I finally got a new pair of hiking boots https://www.reddit.com/r/hiking/comments/vi3shn/after_6_years_of_wear_i_finally_got_a_new_pair_of/

[29] Pixabay, pcdazero, Worn out consumed shoe sole https://pixabay.com/zh/photos/worn-out-consumed-shoe-sole-old-1569639/

[30] Reddit, Why does this part of my shoe always get worn out so quickly? https://www.reddit.com/r/Sneakers/comments/18fvl05/why_does_this_part_of_my_shoe_always_get_worn_out/

[31] Screenshot dall'applicazione del portale di e-commerce Zalando

[32] Brooks N., 2026, Marketing In The Shoe Industry Statistics, Wifi Talents [consultato il 6/4/2026]
https://wifitalents.com/marketing-in-the-shoe-industry-statistics/?utm

[33] StockX, Nike SB Dunk Low Travis Scott https://stockx.com/it-it/nike-sb-dunk-low-travis-scott

[34] TikTok, iamsaraouardi, 2024-8-4, Neutral Trendy Sneakers for this fall https://www.tiktok.com/@iamsaraouardi/video/7399285358745160992

[35] European Council-Council of European Union, 2026, Right to repair products [consultato il 6/4/2026]
https://www.consilium.europa.eu/en/policies/right-to-repair-products/#why

[36] Recycle technologies, How to Recycle Large and Small Appliances, https://www.recycletechnologies.com/appliance-recycling/

[37] ESG News Editorial Team, 2026, EU Moves To Ban Destruction Of Unsold Clothing Under New Circular Economy Rules [consultato il 6/4/2026]
https://esgnews.com/eu-moves-to-ban-destruction-of-unsold-clothing-under-new-circular-economy-rules/

[38] Ifixit, How to Repair a Tear in a Knitted Upper (using a self-adhesive patch) https://it.ifixit.com/Guida/How+to+Repair+a+Tear+in+a+Knitted+Upper+(using+a+self-adhesive+patch)/171320

[39] Love your shoes, What is the Best Glue for Shoe Sole Repair https://www.loveyourshoes.ca/finding-the-best-glue-for-shoes/

[40] Reddit, I've changed teams. No longer teams zip tie laces. Joined team Hot glue. https://www.reddit.com/r/OldSkaters/comments/151j1lh/ive_changed_teams_no_longer_teams_zip_tie_laces/

[41] Skate Warehouse, How To Apply Shoe Goo To Your Skate Shoes, https://www.skatewarehouse.com/learning-center/how-to-apply-shoe-goo-to-your-skate-shoes.html

[42] Confartigianato Imprese Bergamo, 2023, Moda – Calzaturieri & calzalai: oltre 11mila imprese e 72mila addetti, il 60% in MPI ed esportazioni per 12,8 miliardi di euro [consultato il 6/4/2026]
https://confartigianatobergamo.it/moda-calzaturieri-calzalai-numeri-ed-export-in-crescita/

[43] Assocalzaturifici-Centro Studi Confindustria Accessori Moda, 2024, L'industria calzaturiera italiana. Lineamenti Principali 2024

[44] https://www.assocalzaturifici.it/wp-content/uploads/2025/10/Schede-Statistiche-Assocalzaturifici-2024_Dati-di-sintesi-e-commento_ITA.pdf

[45] Carreducker, Cutting a channel, https://carreducker.blogspot.com/2010/07/cutting-channel.html

[46] Nike, Scarpe AirMax Plus TN da donna, https://www.nike.com/it/w/donna-air-max-plus-scarpe-5elx6zahvdnzy7ok

[47] The boot repair, Walking & Hiking Boot Vibram Resole https://bootrepaircompany.co.uk/products/vibram-resole-sports-outdoor

[48] Vibram, Repair if you care https://www.vibram.com/it/brand/campagne/br_repair_if_you_care.html

CAPITOLO 3: ANATOMIA DI UNA CALZATURA

[49] Rath, L., 2024, Anatomy of the Foot, Arthritis Foundation <https://www.arthritis.org/health-wellness/about-arthritis/where-it-hurts/anatomy-of-the-foot> [consultato il 25/4/2026]

[50] Griguolo A.,2020, Com'è fatto il piede e quali funzioni svolge?, My personal trainer <https://www.my-personaltrainer.it/salute-benessere/piede.html> [consultato il 25/4/2026]

[51] ASICS, Gel-1130 Sneaker <https://www.altitude-sports.com/p/asics-gel1130-sneaker-uni-sex-acs-1203a609?srsltid=AfmBOoraXZSziT54lchy-WJU-zXtvxYXK-9soOVPTHyDpwwKCBhs5lJwc>

[52] Podoattiva Clinica podologica Milano, Ossa del piede. Nomi, parti e funzioni di questa anatomia ossea <https://www.podoactiva.it/news/ossa-del-piede-nomi-parti-e-funzioni-di-questa-anatomia-ossea> [consultato il 25/4/2026]

[53] Paiva, RM., Marques, EA., et al., 2016, Adhesives in the footwear industry, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications

[54] Nike, 2022, What Are the Parts of a Shoe? <https://www.nike.com/a/parts-of-shoe-anatomy> [consultato il 25/4/2026]

[55] Staikos, T., Rahimifard, S., 2007, An End-of-Life Decision Support Tool for Product Recovery Considerations in the Footwear Industry, Int. J. Computer Integrated Manufacturing. 20. 602-615

[56] Albert Muzquiz, Heddels, 2018, The Cut Down – All the Shoe Cross-Sections We Could Find <https://www.heddels.com/2017/11/the-cut-down-all-the-shoe-cross-sections-we-could-find/>

[57] Nelson, L., 2022, Shoe rocker: what is it & who is it useful for? <https://www.healthhp.com.au/post/shoe-rocker-what-is-it-who-is-it-useful-for> [consultato il 25/4/2026]

[58] Griffiths, I., 2018, What is ‘Shoe Drop’ and Why is it Important? <https://puresportsmed.com/blog/posts/what-is-shoe-drop-and-why-is-it-important/> [consultato il 25/4/2026]

[59] Nike, Vomero Plus <https://www.nike.com/it/t/scarpa-da-running-su-strada-vomero-plus-ZaR7ZyEh>

[60] Lenka Barefoot, Entice Neo https://www.belenka.it/barefoot-scarpe-be-lenka-entice-neo-all-black/?variant=10483&gad_source=1&gad_campaignid=21123459283&gbraid=0AAAAAoIG9L5eg7CHjcgAyVFF-NiNSf9IU&gclid=CjwKCAjw8arQBhB9EiwAfIKdQi0N7nn4Yzky4NrPy-Q5vcnPTf_FEQr_QfcC-Ylcto3Z6lxMTWb4rQBoCpKoQAvD_BwE

[61] Ahmad, N., Muhammad, TR., 2019, Design of Piezoelectricity Harvester using Footwear, EEE 6th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)

[62] Wang, Yan, Wong et al, 2019, Total ankle arthroplasty and ankle arthrodesis affect the biomechanics of the inner foot differently, Scientific Reports. 9

[63] Kopelovich A., 2020, Ground Reaction Force During the Gait Cycle, <https://www.youtube.com/watch?v=Y2RHvicAM2o> [consultato il 25/4/2026]

[64] Uhlenberg, L., Derungs, A. et al., 2023, Co-simulation of human digital twins and wearable inertial sensors to analyse gait event estimation, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11

[65] Royer, B., 2021, Foot Biomechanics: How You Walk Affects Everything, Harmony Chiropractic Center <https://harmonychiro.com/foot-biomechanics/> [consultato il 25/4/2026]

[66] Takano, M., Noguchi, H. et al., 2014, Development and evaluation of a system to assess the effect of footwear on the in shoe plantar pressure and shear during gait, ROBOMECH Journal

[67] Wang, Y, Wong, D., et al., 2019, Total ankle arthroplasty and ankle arthrodesis affect the biomechanics of the inner foot differently, Scientific Reports, vol.9

[68] Takano, M., Noguchi, H., 2014, Development and evaluation of a system to assess the effect of footwear on the in shoe plantar pressure and shear during gait, Robomech Journal, vol.1

[68] Centro podologico, 2021, Pronazione e Supinazione del piede <https://www.centropodologicomagenta.it/pronazione-e-supinazione-del-piede/> [consultato il 25/4/2026]

CAPITOLO 4: LA FABBRICAZIONE ADDITIVA DI SCARPE

[69] Castaneda, F., 2022, The complete history of 3D printing, Ultimaker <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/> [consultato il 25/4/2026]

[70] Cui, T.C., Raji, R.K., et al., 2024, Application of 3D Printing Technology in Footwear Design and Manufacture – A Review of Developing Trends, Textile & Leather Review

[71] Mc Clements D., Tewolde M., 2024, 3D Printing History – When Was 3D Printing Invented?, Xometry <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/3d-printing-history/> [consultato il 25/4/2026]

[72] Mc Clements D., 2022, All About Flex 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition, Xometry, <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/flex-3d-printing-filament/> [consultato il 25/4/2026]

[73] Green, J., Walder, A., 2025, A Polymer Invented in 1959 Is Still Enabling Innovation Across Multiple Markets, Plastics Today, <https://www.plasticstoday.com/medical/a-polymer-invented-in-1959-is-still-enabling-innovation-across-multiple-markets> [consultato il 25/4/2026]

[74] Valorep, Meet Zellerfeld, <https://www.valorep.com/zellerfeld-company-profile> [consultato il 9/5/2026]

[75] 3DPrint, 2015, You Can Now See the First Ever 3D Printer Invented by Chuck Hull In the National Inventors Hall of Fame <https://3d-print.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>

[76] Dezeen, Warmann, C., 2010, Rapidprototypedshoe by Marloes ten Bhömer <https://www.dezeen.com/2010/12/13/rapidprototyped-shoe-by-marloes-ten-bhomer/>

[77] Arkky, 2025, History of 3D Printed Shoes: From Concept to Mainstream, https://arkky.com/blogs/knowledge/history-of-3d-printed-shoes-from-concept-to-mainstream?srsltid=AfmBOorzYN3GO-QyFI1oyM23GbWu_7u2gvzfgn6SlendKHRlh5VXli_6_ [consultato il 25/4/2026]

[78] Dezeen, Fairs, M., 2013, 3D printed shoes by Iris van Herpen and Rem D Koolhaas <https://www.dezeen.com/2013/07/02/3d-printed-shoes-by-iris-van-herpen-and-rem-d-koolhaas/>

[79] Dezeen, Tucker, E., 2015, New Balance partners with Nervous System to design personalised 3D-printed trainer soles <https://www.dezeen.com/2015/12/06/new-balance-nervous-system-3d-printed-personalised-soles-trainers-footwear/>

[80] Shapewys Blog, 2013, Nike Use 3D Printing to Manufacture the Vapor Laser Talon Football Shoe, <https://www.shapeways.com/blog/nike-use-3d-printing-to-manufacture-the-vapor-laser-talon-football-shoe?srsltid=AfmBOorPbfkSTwb66YFC9xesGiRf2j8k-4p7evnV4S2bE2q9RNC56Uoa> [consultato il 25/4/2026]

[81] Carbon, What is Carbon Digital Light Synthesis? <https://www.carbon3d.com/carbon-dls-technology>

[82] 3D Printing Industry, Everett, H., 2021, Adidas and Carbon unveil latest 4D midsole 4DFWD to bolster running performance <https://3dprintingindustry.com/news/adidas-and-carbon-unveil-latest-4d-midsole-4dfwd-to-bolster-running-performance-189558/>

[83] VoxelMatters, Sher, D., 2023, Louis Vuitton unveils LV Cobra 3D printed sneaker with Zellerfeld <https://www.voxelmatters.com/louis-vuitton-unveils-lv-cobra-3d-printed-sneaker-with-zellerfeld/>

[84] Hadag Magazine, HUGO, the younger of the two HUGO BOSS brands, is collaborating with 3D printing shoe producer, Zellerfeld, to create a first-of-its-kind, fully 3D-printed loafer. <https://hadag-magazine.com/the-future-of-footwear/>

[85] 3D Printing Industry, Duran, P., 2025, Zellerfeld's GEN3 Printer Targets Mass Production of 3D Printed Shoes <https://3dprintingindustry.com/news/zellerfelds-gen3-printer-targets-mass-production-of-3d-printed-shoes-244432/>

[86] Arkky, 2025, ARKKY AI-HALS Technology Boosts 3D Printed Shoes Speed by 20-100X <https://arkky.com/blogs/news/arkky-ai-hals-technology-boosts-3d-printed-shoes-speed-by-20-100x?srsltid=AfmBOopPwnScsXY-HTpTL-hT5-0UkD5Li2aNip2rohuNFBQI53s3Po8-E>

[87] Balena Science - Product- Roots, https://balena.science/products/roots?srsltid=AfmBOooap6g-BvngGslbvzuw_X3s83C-jy-pm-iTR3M3Z6NwyhkS0Tbld

[88] GrandViewResearch, 3D Printed Shoes Market (2024 - 2030)

[89] Statista, Footwear - Worldwide

[90] Zavodna, L., Trejtnarová, L., 2023, ADDITIVE MANUFACTURING IN THE FOOTWEAR INDUSTRY

[91] Kiska, Parametric Design tunes the rules of possibility.<https://kiska.com/exchange/parametric-design/>

[92] Mayo Podiatry Foot & Ankle Clinic, 3D Footscan <https://mayopodiatry.ie/footscan>

[93] 3D Printing Industry, Michael Molitch-Hou, 5 Pairs of 3D Printed Shoes You'll See at Milan Design Week 2015 <https://3dprintingindustry.com/news/5-pairs-of-3d-printed-shoes-youll-see-at-milan-design-week-2015-46689/>

[94] Financial Model, 2025, What Are the Startup Costs for Shoe Manufacturing? <https://financialmodel.net/blogs/cost-open/stylish-ethical-ly-made-shoes> [consultato il 25/4/2026]

[95] 3DPrint.com, Peels, J., 2026: The Year of the Low Cost Print Farm <https://3dprint.com/322953/2026-the-year-of-the-low-cost-print-farm/>

[96] MarkForged, Understanding 3D Printer Cost <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-costs> [consultato il 25/4/2026]

[97] Formlabs, How Much Does a 3D Printer Cost? <https://formlabs.com/blog/how-to-calculate-3d-printer-cost/> [consultato il 25/4/2026]

[98] Fused Footwear, Shado https://fusedfootwear.com/products/fused-shado-3d-printed-footwear?srsId=AfmBOop_vX4lXqKV4j6hYxFdQXu3wshHB-MNECrN3M6baMdRlQRroE5Qy

[99] Designboom, under armour unveil 3D-printed 'architech futurist' sneaker with lattice sole <https://www.designboom.com/technology/under-armour-architech-futurist-sneaker-03-23-2017/>

[100] 3D Natives, 2018, Adidas Release their 3D Printed Shoes: The Futurecraft 4D <https://www.3dnatives.com/en/adidas-future-craft-4d-220120184/>

[101] Primante 3D, 2018, Adidas revient avec une nouvelle chaussure imprimée en 3D <https://www.primante3d.com/adidas-alphaedge-3d-27112018/>

[102] VoxelMatters, 2023, Kicking it up with 3D printing in the textile industry at ITMA 2023 <https://www.voxelmatters.com/kicking-it-up-with-3d-printing-in-the-textile-industry-at-itma-2023/>

[103] Thingiverse, thinger, 2025, Hiking Shoe Spikes Version 2 <https://www.thingiverse.com/thing:6897488>

[104] Printables, Crampons for Ice 3D printed <https://www.printables.com/model/1098295-crampons-for-ice-3d-printed-traction-for-hiking-bo>

[105] Instructables, Zero to infinity outside, Strap-On Cleats for Ice and Snow Traction <https://www.instructables.com/Strap-On-Cleats-for-Ice-and-Snow-Traction/>

[106] 3D Natives, Clemens, M., 2022, The Earth Moc Has Unveiled a Biomimetic 3D Printed Shoe <https://www.3dnatives.com/en/earth-moc-biomimetic-3d-printed-shoe-070520224/>

[107] VoxelMatters, 2022, ATHOS is Climbing the Future with HP <https://www.voxelmatters.com/athos-is-climbing-the-future-with-hp/>

[108] Designboom, ATHOS collaborates with HP and sculpteo to launch world's first 3D printed climbing shoes <https://www.designboom.com/technology/athos-worlds-first-3d-printed-climbing-shoes-hp-sculpteo-10-13-2022/>

[109] 3Druck, 2015, Easystand: il primo scarpone da sci stampato in 3D <https://3druck.com/it/oggetti/easystand-primo-scarpone-da-sci-stampato-in-3d-5529843/>

[110] VoxelMatters, 2017, Digital Supply Chain for Custom Ski Boots Developed by Materialise and Tailored Fits <https://www.voxelmatters.com/digital-supply-chain-custom-ski-boots-developed-materialise-tailored-fits/>

[111] Printables, Jil, G1 barefoot shoes <https://www.printables.com/model/934689-g1-barefoot-shoes>

[112] Youtube, Jil, 2024, G1 - 3D Printed Barefoot Shoes <https://www.youtube.com/watch?v=f9mXzkwcT4M>

[113] Dezeen, Ravenscroft, T., 2024, Vivobarefoot unveils "scan-to-print-to-soil" compostable trainers <https://www.dezeen.com/2024/01/11/vivobarefoot-3d-printed-compostable-trainers-balena/>

[114] Balena, 2024, Balena's new partnership VivoBiome featured in The Guardian <https://balena.science/blogs/spotlights/balenas-new-partnership-viobiome-featured-in-the-guardian?srsId=AfmBOopCScsIMbH-zL8oG8f93-iSjHTzcHSfH27cKF0gC2dQCtT0h65tKT>

[115] Rhino3Dzine, 2024, Pedorthic Information Modeling: Revolutionizing Orthopedic Footwear with 3D Printing and Computational Design <https://rhino3dzine.com/stories/advanced-forms/pedorthic-information-modeling-revolutionizing-orthopedic-footwear-with-3d-printing-and-computational-design/>

[116] Mesago Messe Frankfurt GmbH, 3D-printed lasts simplify production of orthopedic shoes https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/industry-insights/fonmag/fonmag_articles/articles/trinckle.html

[117] Eth Zurich, Ruegg, P., 2023, 3D-printed insoles measure sole pressure directly in the shoe <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2023/03/3d-printed-insoles-measure-sole-pressure-directly-in-the-shoe.html>

[118] Jeep Footwear, Eagle LL <https://safety.jeep-footwear.com/en/product/eagle-2-en/eagle-ll-size-36-41-yl690bx/>

[119] The cryptide sito web <https://www.thecryptide.com/>

[120] Hamburg business, 2025, Zellerfeld R&D produces 3D printed shoes <https://hamburg-business.com/en/news/hamburg-startup-produces-3d-printed-shoes>

[121] VoxelMatters, Sher, D., 2024, Zellerfeld is closing beta phase and opening up to all designers <https://www.voxelmatters.com/zellerfeld-is-closing-beta-phase-and-opening-up-to-all-designers/>

[122] Youtube, Rose Anvil, 2024, The truth about 3D printed shoes - Zellerfeld [youtube.com/watch?v=hoKaSfiNzKQ&pp=ygUQemVsbGVyZmVsZCBzaG9lcw%3D%3D](https://www.youtube.com/watch?v=hoKaSfiNzKQ&pp=ygUQemVsbGVyZmVsZCBzaG9lcw%3D%3D)

[123] https://edge9.hwupgrade.it/news/startup/servati-la-startup-che-stampa-in-3d-le-sneaker-rappresentera-l-italia-all-expo-di-osa-ka_139739.html

[124] Startup9, Falchi A., 2025, Servati, la startup che stampa in 3D le sneaker, rappresenterà l'Italia all'Expo di Osaka <https://fashionunited.it/news/moda/la-startup-servati-realizza-scarpe-in-3d-riciclabili/2024101525941>

[125] Wertel Oberfell projects, Auxetic Wear <https://www.werteloberfell.com/projects/wo-auxetic-wear>

[126] Makerworld, Cloudberry, Bubbleberry - a 3D printed round-toe casual shoe <https://makerworld.com/it/models/1236494-bubbleberry-a-3d-printed-round-toe-casual-shoe#profileId-1268724>

[127] Makerworld, Cloudberry, Whaleberry - a 3D printed thick-soled casual shoe <https://makerworld.com/it/models/1229146-whale->

[berry-a-3d-printed-thick-soled-casual-shoe?from=search#profileId-1251096](https://makerworld.com/it/models/1229146-whale-berry-a-3d-printed-thick-soled-casual-shoe?from=search#profileId-1251096)

[128] Hilos Studio <https://www.hilos.studio/>

[129] 3DPrint, Molitch Hou, M., 2924, HILOS Launches Studio OS for AI-Driven 3D Printed Shoe Design <https://3dprint.com/309119/hilos-launches-studio-os-for-ai-driven-3d-printed-shoe-design/>

[130] Facfox, ASICS Releases ACTIBREEZE 3D (Printed) SANDAL <https://facfox.com/news/asics-releases-actibreeze-3d-printed-sandal-consumer-products/>

[131] 3D Printing Industry, Tryer Jones, A., 2024, Asics and LuxCreo launch second generation ACTIBREEZE HYBRID 3D printed sandal <https://3dprintingindustry.com/news/asics-and-luxcreo-launch-second-generation-actibreeze-hybrid-3d-printed-sandal-224285/>

[132] Designboom, dior reveals a detailed look at its newly unveiled set of 3D-printed shoes <https://www.designboom.com/design/dior-3d-printed-shoes-carlo-derby-boots-footwear-01-23-2023/>

[133] Voxelmatters, Boissonneault T., 2026, Alexander Wang debuts Griphoria, the first 3D printed stiletto <https://www.voxelmatters.com/alexander-wang-steps-it-up-with-first-3d-printed-stiletto/>

[134] The Guardian, 2014, The world's first 3D-printed shoe collection – in pictures <https://www.theguardian.com/artanddesign/gallery/2014/jul/03/worlds-first-3d-printed-shoe-collection-continuum-fashion-in-pictures>

[135] Protolabs Network, What is SLS 3D printing? A guide to selective laser sintering, <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/> [consultato il 25/4/2026]

[136] Sher D., 2020, Five footwear industry leaders using 3D printing for production today, Voxel Matters, <https://www.voxelmatters.com/five-footwear-industry-leaders-using-3d-printing-for-production-today/> [consultato il 25/4/2026]

[137] Protolabs Network, What is SLS 3D printing? <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/> [consultato il 25/4/2026]

[138] Robots.co.uk, Hanton, J., 2015, 3D printed trainer soles <https://www.robots.co.uk/?p=484>

[139] Lava 3D Printing, Understanding Industrial-Grade SLS 3D Printing for Functional Nylon Parts <https://www.lava3dp.com/3d-printing-technologies/sls-3d-printing-service/>

[140] The 3D News, Walls, W., 2025, SLS 3D Printing: Precision Engineering at Its Finest <https://the3dnews.com/blog/sls-3d-printing-precision-engineering-at-its-finest/>

[141] Protolabs Network, What is SLA printing? The original resin 3D print method, <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/> [consultato il 25/4/2026]

[142] DWS, 2024, Revolutionizing Footwear: Yaze and the Power of 3D Printing <https://www.dwssystems.com/success-stories/revolutionizing-footwear-yaze-and-the-power-of-3d-printing/>

[143] Additive Manufacturing, 2018, Carbon Releases Epoxy (EPX) 82 and Elastomeric Polyurethane (EPU) 41 <https://www.additivemanufacturing.media/products/carbon-releases-epoxy-epx-82-and-elastomeric-polyurethane-epu-41>

[144] Ame3D, MJF 3D Printing <https://ame-3d.co.uk/technologies/multi-jet-fusion-mjf-3d-printing>

[145] MarkForged, What is Multijet Printing (MJP)?, <https://markforged.com/it/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-multijet-printing-mjp> [consultato il 25/4/2026]

[146] Inkbit, Vision-Controlled Jetting™ Technology, <https://www.inkbit3d.com/technology> [consultato il 25/4/2026]

[147] Jaws Tech, Holt, L., 2026, Vision Controlled Jetting (VCJ): Process Breakdown and Overview https://www.jawstec.com/vision-controlled-jetting-vcj-process-breakdown-and-overview/?srsltid=AfmBOoo66Nxr6sVn8Sg23nDKmsm5rBFuWLYnf_ZHJ75Urh_A2Lr-wmKM

[148] Protolabs Network, What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?, <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/> [consultato il 25/4/2026]

[149] Protolabs Network, How important is layer height for 3D printing? 3D print better parts with the right layer thickness <https://www.hubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print/>

[150] Trapp, M., Kreutz, M., 2022, Improving Sustainability of Footwear Production through 3D Printing of Shoes

[151] Kijung, K., Hyunji, K., et al., 2025, A multidisciplinary review on footwear 3D printing: From biomechanics to therapeutics, International Journal of Bioprinting

[152] Prusa Research, Prusa Pro HT90 <https://www.prusa3d.com/it/prodotto/prusa-pro-ht90-eu-230v-2/>

[153] Laserlines, Fortus 450mc <https://3dprinting.co.uk/fdm-3d-printers/fortus-450mc/>

[154] 01Factory, 2025, Stratasys lancia la nuova versione della stampante 3D Fortus 450mc <https://www.01factory.it/stratasys-lancia-la-nuova-versione-della-stampante-3d-fortus-450mc/>

[155] Bambu Store, Bambu Lab A1 https://eu.store.bambulab.com/it/products/a1-mini?id=599117891173982224&skr=yes&gad_source=1&gad_campaignid=23945471012&g-braid=0AAAAqFjFZ0EuoZK5aoABMDuyKbnbRvTR&gclid=Cj0KC-Qjw9ZLSBhCcARIsAEhGKgMhoDBERof2Dg99uj-SI2ZW5BWZqwbnunB-lvB8cX_aEtQhulR2u3MaArhHEALw_wcB

[156] Unionfab, 2024, What is TPU Filament? Your Complete Guide <https://www.unionfab.com/blog/2024/09/tpu-filament>

[157] X3D, 2020, Ranking of the Best TPU Filaments According to Shore Hardness <https://x3d.com.au/blogs/tips-and-tricks/ranking-of-the-best-tpu-filaments-according-to-shore-hardness?srsltid=AfmBOoqUbi0VHN-3zixkpMnNx7F6doGEFRCH3HPQUSJgDtHUDuRhSGbN9>

[158] 3D Jake, Recreus Filaflex 95a Foamy natural <https://www.3djake.it/recreus/filaflex-95a-foamy-natural> [consultato il 25/4/2026]

[159] https://colorfabb.com/it/varioshore-tpu-natural?srsltid=AfmBOoo4cncjXuiO9O4j-csFrJlx9pGMYfIlITH22krqAZ9ny7_vG2EZB [consultato il 25/4/2026]

[160] Bambu Lab Community Forum, Printing foaming TPU (Filaflex Foamy) - my first experiences <https://forum.bambulab.com/t/printing-foaming-tpu-filaflex-foamy-my-first-experiences/63886>

[161] https://fiberlogy.com/en_US/c/FiberFlex-CF/160 [consultato il 25/4/2026]

[162] <https://recreus.com/it/products/filaflex-purifier?variant=45927379730691> [consultato il 25/4/2026]

[163] All3DP, Vicnair, A., Renganathan, S., 2023, Flexible 3D Printer Filament: 7 Types Compared <https://all3dp.com/2/flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose/>

[164] Formfutura, TPU vs TPC vs PP – Which flexible filament is right for me? <https://www.formfutura.com/blog/blogs-1/tpu-vs-tpc-vs-pp-which-flexible-filament-is-right-for-me-38>

[165] Kitto C, 2026, Which Flexible 3D Printing Material Should You Choose?, Sainsmart https://www.sainsmart.com/blogs/news/peba-vs-light-weight-tpu-lw-tpu?srsltid=AfmBOopvRbl2bWLHT_ciDdbjnuGgh-VmrFNbDjPGR-KPMYuveRls77gzw [consultato il 25/4/2026]

[166] Voxelijet, Peba 3D Printing solutions <https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/3d-printing-materials/3d-printing-material-peba/>

[167] Balena, BioCirFlex https://balena.science/pages/biocirflex-1?srsltid=AfmBOoph4jXcX-INo5f8bPKFc66554_O3XWyBMuEaqgnigzJ6cIS6EyXj [consultato il 25/4/2026]

[168] Stella Mc Cartney, 2024, BioCir® Flex: Compostable, recyclable, biobased plastic alternative <https://www.stellamccartney.com/gb/en/sustainability/BioCir-Flex-Compostable-recyclable-biobased-plastic-alternative.html?srsltid=AfmBOopZ8E2a2BlavPhwTbHdxbFe1CXtjzsrPqw8SOu-TeigFMH8lQl4l> [consultato il 25/4/2026]

[169] Zyphor, 2025, HALS Lattice Cushioning: Inside the Future of Footwear <https://zyphor.io/blogs/zyphor-blog-updates-stories?srsltid=AfmBOopb6qWZpiSs5Qhu3BMEj6Vlss4lGWMr8hBu-VOFRW3e-jO-4xTVi>

[170] Prusa research, Infill patterns https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130 [consultato il 25/4/2026]

[171] Bambu lab Wiki, Fill pattern Introduction <https://wiki.bambulab.com/en/software/bambu-studio/fill-patterns> [consultato il 25/4/2026]

[172] Weyhaupt, A., 2011, Meet the gyroid, +Plus, <https://plus.maths.org/meet-gyroid> [consultato il 25/4/2026]

[173] Chatpun, S., Dissaneewate, T., et al., 2025, Infill Pattern and Density of 3D-Printed Insoles Alter Energy and Pressure Distribution in Gait. Appl. Sci.

[174] Strecs3D Wiki <https://github.com/tomohiron907/Strecs3D/wiki>

[175] Creality, 2026, What Is G Code 3D Printing? A Simple Guide for Beginners <https://www.creality.com/blog/what-is-g-code-3d-print> [consultato il 25/4/2026]

[176] Reddit/3D Printing https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/1osnm59/strange_things_with_custom_gcode_5/

[177] Makerworld, Onda Barefoot shoes <https://makerworld.com/en/models/1620268-onda-barefoot-shoes#profileId-1710256>

[178] Bambu lab Community Forum, Modifier modifies suboptimal <https://forum.bambulab.com/t/modifier-modifies-suboptimal/58111>

[179] Prusa Research, Střiteský O., 2019, “Modeling” with PrusaSlicer – Modifier meshes tutorial https://blog.prusa3d.com/mod-el-with-prusaslicer-modifier-meshes-tutorial_30438/

CAPITOLO 5: FOOTWEAR MODULARE

[180] Cambridge Dictionary, Modularity https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/modularity#google_vignette [consultato il 7/5/2026]

[181] Vividworks, Modular product glossary <https://www.vividworks.com/glossary/modular-product> [consultato il 7/5/2026]

[182] Unsplash, Quintal, R., 2019, <https://unsplash.com/it/foto/cubo-blu-giocattolo-lotto-fotografia-ravvicinata-US9Tc9pKNBU>

[183] Moncler, Loveform, 2024 <https://www.moncler.com/en-us/stories/lovefrom-moncler-collection>

[184] GSMArena, 2025, Fairphone 6 official, gets expanded modular design with accessories https://www.gsmaarena.com/fairphone_6_gets_updated_specs_and_expanded_modular_design_with_accessories-news-68393.php

[185] Hans Ramzan, Modular Industrial Design: Adaptable Products, Lasting Value <https://hansramzan.com/blog?post=modular-industrial-design-adaptable-products-lasting-value#:~:text=From%20a%20manufacturing%20perspective%2C%20modular,on%20innovation%20and%20product%20development.> [consultato il 7/5/2026]

[186] Easyclosets, All around reach closet <https://www.easyclosets.com/gallery/all-around-reach-closet/>

[187] Pavia, R., Marques, E. et al., 2015, Adhesives in the footwear industry, Institution of Mechanical Engineers, Vol. 230, I. 2

[188] Sondaggio OpinionMatters divulgato da Vivobarefoot, 2020 https://www.vivobarefoot.com/media/wysiwyg/pdf/black_friday_re-vivo.pdf

[189] Camper, collezione Thelma https://www.camper.com/it_IT/search?searchTerm=thelma&page=2

[190] Yankodesign, Sood, G., 2023, A viable solution to footwear industry's waste is this pair of recyclable modular shoe you'll never get tired of
<https://www.yankodesign.com/2023/02/24/a-viable-solution-to-footwear-industrys-waste-is-this-pair-of-recyclable-modular-shoe-youll-never-get-tired-of/>

[191] Core77, Modular Self-assembled Footwear Designed to Put the Kibosh on Sweatshops
<https://www.core77.com/projects/66888/Modular-Self-assembled-Footwear-Designed-to-Put-the-Kibosh-on-Sweatshops>

[192] Dezeen, Ravenscrotf, T., 2024, Camper unveils modular trainer “simple enough to assemble and disassemble by customers
<https://www.dezeen.com/2024/03/26/camper-roku-modular-trainer/>

[193] Youtube, Societe Anonime Firenze, Roku, the newest modular shoe by Camper
<https://www.youtube.com/watch?v=gMEyQFbPLT8>

[194] Marc Newson, Zvezdochka Sneaker
<https://marc-newson.com/zvezdochka-sneaker/>

[195] Designboom, joon shoe's glue-free modular assembly system enhances recyclability
<https://www.designboom.com/design/joon-shoe-glue-free-modular-assembly-system-recyclability-clement-de-cooman-11-07-2024/>

[196] Muvez Shoes
<https://muvez-shoes.com/>

[197] Hypebeast, 1017 ALYX 9SM Revitalizes the Derby Silhouette With Removable Vibram Sole
<https://hypebeast.com/2019/9/1017-alyx-9sm-black-lace-up-leather-sneakers-vibram-sole-release-info>

[198] NotJustaLabel, Glide <https://notjustalabel.com/glide-soles?srsltid=AfmBOoqPvQ9umVlVrVe9zeCJ1gX-EfKb7sdw-Dql471QJ-PGupqKg4Frt>

[199] Pashion Footwear <https://pashionfootwear.com/pages/about-pashion-footwear?srsltid=AfmBOopQ4xHxyzMNqQ3-INwB-bChn2wCT2wTFFyVuhEwEAGLgLF7KwQb>

[200] Brevetto EP3427602A1, Fully convertible high heel-to-flat shoe, 2018
<https://patents.google.com/patent/EP3427602A1/en>

[201] Nss Magazine, Salamone, L., 2020, ACBC's modular sneakers
<https://www.nssmag.com/en/fashion/24269/zip-shoe-acbc>

[202] Brevetto US3846919A, Transformable footwear, 1973
<https://patents.google.com/patent/US3846919A/un>

[203] Modscape+Modbotics, Things We Love: Modular Shoe, 2018
<https://modscape.com.au/things-love-modular-shoe/>

[204] Brevetto EP0153136A2, Shoe with recessed removable sole, 1985
<https://patents.google.com/patent/EP0153136A2/en>

CAPITOLO 6: SPERIMENTAZIONE PROGETTUALE

[205] Pexels, Standsome Worklifestyle
<https://www.pexels.com/photo/man-sitting-in-a-van-and-working-on-a-laptop-10321964/>

[206] Magnific, Wirestock, Beautiful view of bed inside a vintage wooden van
https://www.magnific.com/free-photo/beautiful-view-bed-inside-vintage-wooden-van_25003071.htm#fromView=key-word&page=1&position=0&uuid=f9d70024-8162-4abf-8e30-4add025b2553&query=Inside+van

[207] Pexels, Jimmy Boos
<https://www.pexels.com/photo/a-person-tying-shoe-lace-12347941/>

[208] Scarpe Demonia Swing-105
<https://demoniacult.com/products/swing-105bvl?srsltid=AfmBOopN-5tR2diPKOW9XKtrvsFFcGbforUFka3OqOCpxJbbDmHSyuCU>

[209] Pexels, cottonbro studios
<https://www.pexels.com/photo/woman-in-a-plaid-shirt-holding-a-vinyl-record-6875728/>

[210] Via della Paglia, MABEL Stivaletti
<https://www.viadellapaglia.com/shop/stivaletti-da-donna-eleganti/calzature-donna-stivaletto-mabel-pelle-made-in-italy/>

[211] Camper, Wanda
https://www.camper.com/it_IT/donna/scarpe/wanda/camper-wanda-K400228-004

[212] Ernesto Dolani, Komono 01
https://www.ernestodolani.it/prodotto/komono-01-sneaker-alta-in-pelle-nera/?srsltid=AfmBOop17E5p0grFSbS9Ky80rTkWBoyiox-MDsP3M-zrpSkQ_YfRQIUa9E

[213] Dr. Martens, Stivaletti 1460 FZ Zip up
<https://www.drmartens.com/it/it/stivali-1460-in-pelle-morbida-con>

zip-nero/p/42352001?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=&gad_source=1&gad_campaignid=22876240705&g-braid=0AAAAACybT-YR8BW6AR3amc5706h3SeYxT&gclid=CjwKCA-jwgO7RBhBKEiwAZNP85kGivxz7nOIMaNcl76CRywTHhcilG0hCT-JE3Zg3oLYvdG1MW8W578hoC0IEQAvD_BwE#PLA/_GGL_IT_B_Boots/Shoes/Sandals/Accessories

[214] Officine creative, BULLA DD 103
https://it.officinecreative.store/products/ocubuld103no-vak1000?change_store=true&_gl=1*lyw0viv*_ga*ODQ3NzMyOD-cxLjE3ODAxODU5NDU.*_ga_K2MG1W0ER3*cze3ODAxODU5ND-QkbzEkZzAkDE3ODAxODU5NDQkajYwJGwwJGgxMjAyNDQzM-TYx*_ga_1LDCZZCQD2*cze3ODAxODU5NDUkzbzEkZzAkDE3ODAx-ODU5NDUkajYwJGwwJGgxOTE5NzA5ODMO

[215] Camper, Dean
https://www.camper.com/it_IT/donna/scarpe/dea/camper-dean-K400761-001

CAPITOLO 7: PRESENTAZIONE DEL CONCEPT

[216] Library of CongressWho came up with the idea for Velcro? [consultato il 12/6/2026]
<https://www.loc.gov/everyday-mysteries/categories/technology/item/who-came-up-with-the-idea-for-velcro/>

[217] Hook and loop, What is hook and loop? [consultato il 12/6/2026]
https://www.hookandloop.com/what-is-hook-and-loop?srsltid=Afm-BOooNe9ZHIJkr_zAStMtQxHTkxpEryIY4TUI00uXiOlidbgxIYpqY

[218] Velcro, 2023, How do VELCRO® Brand Fasteners Work? [consultato il 12/6/2026] <https://www.velcro.com/news-and-blog/2023/02/how-do-velcro-brand-fasteners-work/>

[219] Dual Lock SJ3550, immagini del prodotto
<https://www.amazon.se/Dual-Lock-svart-SJ3550-tejp/dp/B004AQOBS2>

[220] 3M™ Dual Lock™ Reclosable Fasteners [consultato il 12/6/2026]
https://www.3m.com/3M/en_US/dual-lock-reclosable-fasteners-us/

[221] 3M SJ3506 and SJ3507 Thin Hook and Loop datasheet
https://assets.testequity.com/te1/Documents/pdf/3m_products/3M_7100007592_Technical-Data-Sheet.pdf

[222] 3M SJ3870 datasheet
<https://multimedia.3m.com/mws/media/1591580O/3m-dual-lock-reclosable-fastener-sj3870.pdf>

[223] 3M Bonding and Assembly, Common Stress Types in Adhesive Joints [consultato il 12/6/2026] https://www.3m.com/3M/en_US/bonding-and-assembly-us/resources/science-of-adhesion/common-stress-types-adhesive-joints/

[224] Pidigi, Materiali per puntali/contrafforti e il sottopiede <https://www.pidigi.com/it/calzatura/materiali-per-sottopiede/materiali-per-puntali-e-contrafforti/>

[225] HzCorck, 2022, La Guida completa alla pelle a base vegetale: Cos'è la pelle a base vegetale [consultato il 12/6/2026] <https://hzcork.com/it/the-complete-guide-to-plant-based-leather/>

[226] Arán-Ais, F., Ruzafa-Silvestre, C. et al., 2021, Sustainable adhesives and adhesion processes for the footwear industry, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235

[227] Orgilés-Calpena,E., Arán-Aís F., et al., 2016, Novel polyurethane reactive hot melt adhesives based on polycarbonate polyols derived from CO2 for the footwear industry, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol 70

[228] The Footwear Edge, Unlock Ultimate Comfort: Exploring Strobel Shoe Construction <https://thefootwearedge.com/unlock-ultimate-comfort-exploring-strobel-shoe-construction/>

[229] Insider, 2018, How Dr. Martens' Are Made [consultato il 12/6/2026] <https://www.youtube.com/watch?v=rO1YAx4QW1I>

[230] Orthotic printed with TPU01
<https://endeavor3d.com/8-tpu-material-3d-printing-applications-you-need-to-know/>

[231] BCN3D, BVOH vs PVA [consultato il 12/6/2026]
<https://support.bcn3d.com/knowledge/bvoh-vs-pva>

[232] Business Insider, 2018, Dr. Martens boots are sliced open by an expert to reveal what's inside [consultato il 12/6/2026] <https://www.businessinsider.com/dr-martens-boots-are-sliced-open-to-reveal-whats-inside-2022-6>

[233] Highsnobiety, Zellerfeld Made the 3D-Printed Nike Air Max of the Future <https://www.highsnobiety.com/p/zellerfeld-nike-air-max-1000/>

[234] Hamburg Business, 2025, Zellerfeld R&D produces 3D printed shoes [consultato il 12/6/2026] <https://hamburg-business.com/en/news/hamburg-startup-produces-3d-printed-shoes>

[235] Voxel Matters, Sher, D., 2020, Five footwear industry leaders using 3D printing for production today [consultato il 12/6/2026] <https://www.voxelmatters.com/five-footwear-industry-leaders-using-3d-printing-for-production-today/>

[236] New Atlas, Lavars, N., 2017, Adidas taps new manufacturing method to take 3D-printed shoes mainstream [consultato il 12/6/2026] <https://newatlas.com/adidas-3d-printed-shoes-mass/48877>

[237] Patagonia, servizio If It's broke Fix It [consultato il 12/6/2026] <https://eu.patagonia.com/it/it/repairs/?srsltid=AfmBOoonpNuHO1fP-G1EZcszgMfvH9SjlspCZQFko6EY87eefPRxdMREJ>

[238] Servizio Freitag repair [consultato il 12/6/2026] https://freitag.ch/it_CH/mission/circular-services/bag-repair?srsltid=AfmBOoplur-RIRrHQpRvxe3gu8SRKUAAzwgdGUHUpjr8QqcwiorbyiRXg

[239] Servizio Vibram repair if you care [consultato il 12/6/2026] https://www.vibram.com/it/brand/campagne/br_repair_if_you_care.html

CAPITOLO 8: SFIDE FUTURE E CONCLUSIONI

[240] Fused Footwear, Fomaru <https://www.zellerfeld.com/products/fomaru?srsltid=AfmBOoqX-S5zwBA-Gza8DiSKK6z724zwlIxMZGG5tGizBSUuB3D8Yuya5>

[241] FRYYY, Astra <https://www.zellerfeld.com/products/astra?variant=55135989956943>

[242] Fabbaloo, Stevenson, K., 2025, Velcro-Inspired 3D Printing Innovation Could Transform Reusable and Modular Construction <https://www.fabbaloo.com/news/velcro-inspired-3d-printing-innovation-could-transform-reusable-and-modular-construction>

[243] 3D Printing Industry, Hanapy, P., 2021, Dutch researchers 3D print VELCRO-like mushroom-inspired fastening material <https://3d-printingindustry.com/news/dutch-researchers-3d-print-velcro-like-mushroom-inspired-fastening-material-183135/>

[244] Hackday, Williams, A., 3D Printed Hook And Loop Fasteners <https://hackaday.com/2023/09/04/3d-printed-um-hook-and-loop-fasteners/>

[245] Turel, T., Cristadoro, A.M., 2025, Harnessing Imine Chemistry for the Debonding-on-Demand of Polyurethane Adhesives, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol 17

[246] Henkel, Debond-on-demand adhesives are unlocking progress toward a circular economy <https://www.henkel.com/our-business-es/adhesive-technologies/about-us/debond-on-demand-adhesives-are-unlocking-progress-toward-a-circular-economy-2065782>

[247] Servizio di riparazione Veja Repair https://www.veja-store.com/it_it/veja-repair.html?srsltid=AfmBOOpHTvyygGFjqWqvJNu--tVxsjJQUBo-UKIwPWYxHLUEejo01-F

[248] Bambu Lab Blog, 2026, Would you leave the house wearing a pair of 3D-printed shoes? The story behind FORMISM by SCRY <https://blog.bambulab.com/would-you-leave-the-house-wearing-a-pair-of-3d-printed-shoes/>



Negli ultimi anni la fabbricazione additiva ha progressivamente ampliato il proprio campo di applicazione nel settore calzaturiero, passando dal solo utilizzo prototipale alla realizzazione di componenti e prodotti finali destinati al mercato. Questo mutamento ha aperto nuove possibilità in termini di libertà geometrica, personalizzazione, proprietà meccaniche e riduzione dell'impatto ambientale. Inoltre, la diffusione di materiali flessibili su vasta scala e di macchine di stampa in grado di garantire buona affidabilità nel processo hanno incentivato la sperimentazione anche al di fuori dei contesti aziendali.

La tesi principia da un'analisi del rapporto tra *footwear* e *additive manufacturing*, indagando parallelamente il tema della modularità come strategia per incrementare la durabilità e la versatilità del prodotto, contrastando l'*early disposal* e permettendo di variare le caratteristiche funzionali ed espressive della scarpa. Partendo da queste premesse è stata sviluppata una proposta progettuale che metta in luce nuove possibilità per sviluppi futuri in questo settore, dal punto di vista della produzione, dell'acquisto e dell'interazione con il prodotto durante il ciclo di vita.