

ARTICLE INFO

Received	10 September 2023
Revised	16 October 2023
Accepted	22 October 2023
Published	31 December 2023

MODA E DESIGN MODULARE

Modularità come strategia di design per la sostenibilità

FASHION AND MODULAR DESIGN

Modularity as a design strategy for sustainability

Daria Casciani

ABSTRACT

La moda occupa un posto importante nella società odierna non solo per la produzione di indumenti e del loro impatto a fine vita, ma anche per le dinamiche economiche, culturali e sociali che determina. La progettazione modulare è una strategia utile per creare sistemi complessi a partire da moduli configurabili, separabili e adattabili che può influenzare la sostenibilità. Attraverso la revisione della letteratura scientifica integrata con lo studio di casi provenienti dal mondo professionale, il contributo presenta una categorizzazione delle attuali implementazioni del design di moda modulare, evidenziandone l'architettura di sistema e descrivendo opportunità e limiti in termini di sostenibilità ambientale, economica, culturale e sociale. Dall'analisi emerge la necessità di un approfondimento multidisciplinare del tema attraverso lo studio di nuovi modelli di business e tecnologie dell'Industria 4.0 tramite un approccio guidato dal design che si occupi della progettazione di prodotti e servizi ma anche dei comportamenti di consumo.

Fashion occupies an essential place in today's society not only because of the production of garments and their impact at the end of their life but also because of the economic, cultural and social dynamics it determines. Modular design is a valuable strategy for creating complex systems from configurable, separable and adaptable modules that can influence sustainability. Through the review of scientific literature integrated with case studies from the professional world, this paper categorises current implementations of modular fashion design, highlighting the system architecture and describing opportunities and limitations regarding environmental, economic, cultural and social sustainability. From the analysis emerges the need for a multidisciplinary investigation of the topic through the study of new business models and Industry 4.0 technologies employing a design-led approach that deals with the design of products and services and consumption behaviour.

KEYWORDS

moda modulare, moda e tecnologia, Industria 4.0, modularità, sostenibilità

modular fashion, fashion and technology, Industry 4.0, modularity, sustainability



Daria Casciani, Designer and PhD, is a Researcher at the Department of Design of the Politecnico di Milano (Italy), where she teaches Fashion-Tech Design and Advanced Manufacturing for Sustainable Fashion. Her research activity investigates the influence of advanced manufacturing and technology integration in new sustainable fashion scenarios, systems and solutions. E-mail: daria.casciani@polimi.it

L'industria della moda, e in particolare la produzione di abbigliamento, rappresenta uno dei settori a più alta intensità di risorse, con un forte impatto nella gestione dei consumi e del fine vita degli indumenti. Nella sua attuale configurazione lineare il sistema moda crea flussi di rifiuti, uno dei quali è costituito dai rifiuti tessili post-consumo (indumenti scartati dal consumatore) che finisce in discarica (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Il fenomeno della sovrapproduzione e del sovraconsumo di risorse nella produzione e vendita di capi di abbigliamento impatta severamente le quattro dimensioni interconnesse della sostenibilità ambientale, sociale, culturale ed economica (Brown and Vacca, 2022). Se alcuni studi dimostrano che il 65% dell'impatto ambientale di un abito deriva dalla produzione del tessuto, considerando filo, fibra e tessuto compresi tutti i trattamenti superficiali relativi, Fletcher (2014) ha dimostrato che l'impatto maggiore nella vita di un capo di abbigliamento è generato dopo il suo acquisto, durante l'uso, la manutenzione e lo smaltimento.

In particolare il fine vita di un abito attraverso riuso o riciclo è ad oggi ancora limitato a iniziative locali e servizi specifici volti ad attuare modelli aziendali positivi per la circolarità e per rigenerare le economie locali (Kasper and Stroomer, 2021); in tal senso estendere la vita attiva di un capo e fare in modo che sia facilmente disassemblabile e riciclabile a fine vita è considerata una delle più efficienti strategie per ridurre gli impatti ambientali della moda (McLaren et alii, 2016; Kasper and Stroomer, 2021). Di conseguenza è chiaro che le scelte attuate durante le fasi di progettazione siano la causa dell'80% dell'impatto ambientale dei prodotti moda, influenzando profondamente la catena di fornitura e valore (Ballie and Woods, 2018).

Per guidare un cambiamento positivo nel settore moda, la Ellen MacArthur Foundation (2013) ha sottolineato che le strategie progettuali verso la moda trasformabile possano essere considerate estremamente utili per lo sviluppo sostenibile e circolare del settore. Il 'design trasformabile' consente di operare modifiche funzionali e/o estetiche ai capi, favorendo la multifunzionalità degli stessi, potenziando le caratteristiche esistenti o favorendone di nuove (Lee, Tufail and Kim, 2016), attraverso attività di decostruzione e ricostruzione che rendono il capo continuamente plasmabile. All'interno della categoria degli abiti trasformabili Koo (2012) identifica elementi modificabili quali colore e modello, taglia e vestibilità, silhouette, tipo di capo e dettagli e definisce il 'design modulare' una delle possibili modalità con cui rendere trasformabile un capo. L'abbigliamento modulare è costruito utilizzando parti che, combinate in vario modo tra di loro, offrono la possibilità al consumatore di trasformare il capo durante il suo utilizzo.

Alla luce di quanto premesso, il contributo vuole proporre una sistematizzazione del design della modularità nel sistema moda per come è stato applicato all'interno dei contesti di ricerca e nel mondo industriale, attraverso una ricostruzione delle caratteristiche principali dell'architettura modulare adottata (moduli, configurabilità e organizzazione, interdipendenza di sistema e interfaccia), del livello di attuazione e scalabilità raggiunto e, infine, dei materiali e delle tecnologie di produzione utilizzate.

Delineando lo stato dell'arte della ricerca in ambito accademico e industriale si vuole evidenziare quali siano stati i maggiori approcci alla progetta-

zione modulare e soprattutto i relativi limiti e opportunità, comparando studi teorici e applicazioni pratiche e ampliando i confini della progettazione dal prodotto al sistema / servizio attraverso il supporto derivato dall'utilizzo di tecnologie proprie dell'Industria 4.0. Le potenzialità per sviluppi futuri della moda modulare individuate in questo contributo possono fornire indicazioni su percorsi di innovazione nei processi di design e produzione di capi di abbigliamento di interesse per l'accademia e l'industria, facilitando il dialogo multidisciplinare tra gli operatori del settore verso una trasformazione più sostenibile.

La progettazione modulare | La modularità è una strategia progettuale utilizzata per creare sistemi complessi utilizzando componenti e sottosistemi indipendenti (moduli), configurabili tra di loro attraverso interfacce standard tali per cui la modifica di un modulo non implichi alcun danno o criticità agli altri, ma anzi determini più funzionalità alternative nel corso del tempo (Tseng and Wang, 2014). La funzionalità complessiva di un prodotto modulare è infatti suddivisa in sottofunzioni dei singoli componenti la cui assemblabilità e disassemblabilità non deve alterare l'operatività del prodotto.

La progettazione modulare garantisce la generazione di una varietà / diversità di prodotti le cui componenti modulari possano essere facilmente sostituite e aggiornate nel tempo: ciò richiede quindi una progettazione strategica sia delle fasi di produzione che di consumo e una organizzazione più efficiente di progetti e processi complessi. Di conseguenza, un prodotto modulare deve essere concepito nelle prime fasi di ideazione e sviluppo considerando le implicazioni nei suoi quattro stadi successivi fondamentali, ovvero pre-produzione, produzione, uso e fine vita. Al contempo, Bonvoisin, Halstenberg, Buchert e Stark (2016) suggeriscono che la progettazione modulare possa influenzare positivamente le tre dimensioni della sostenibilità economica, ecologica e sociale, influenzando l'intero ciclo di vita del prodotto.

L'architettura di un prodotto modulare è definita sostanzialmente dai moduli e dalle relazioni funzionali, fisiche ed estetiche tra gli stessi (Ulrich, Eppinger and Yang, 1995); inoltre il sistema di interfacce volte a offrire configurabilità e varietà determina la capacità di formare una famiglia / sistema di prodotti sviluppabili aventi una piattaforma comune (Meyer and Lehnerd, 1997). Il design modulare nella moda caratterizza un capo d'abbigliamento composto da moduli (parti / unità elementari) che possono essere assemblati / disassemblati attraverso diverse interfacce o sistemi di connessione per formare una collezione (sistema / famiglia) di capi facilmente modificabili per adattarsi a esigenze funzionali-performative e/o estetiche che riguardino i gusti soggettivi oppure derivate dalle tendenze del momento (Niinimäki and Hassi, 2011; Koo, Dunne and Bye, 2014).

Obiettivi della ricerca e approccio metodologico | Il presente contributo presenta una categorizzazione delle realizzazioni del design modulare applicato alla moda, evidenziando quali approcci progettuali alla modularità sono stati attuati, a partire dalla ricerca di Nadasbas e Cileroglu (2017); i due studiosi hanno individuato sei diversi approcci alla progettazione modulare: modularità per condivisione di componenti, modularità per

scambio di componenti, modularità 'cut-to-fit', modularità 'bus', modularità sezionale e modularità 'mix' (Fig. 1). Sebbene siano largamente impiegati in altri settori, questi approcci progettuali alla modularità risultano ancora poco esplorati in maniera sistemica nel settore moda.

L'analisi condotta mira a comprendere l'architettura principale del sistema modulare adottato, costituito principalmente da componenti (moduli), interfacce e standard di configurabilità ovvero elementi di connessione che consentono la relazione di assemblaggio e disassemblaggio. A tale scopo la relazione sistemica di interdipendenza tra gli elementi geometrici è analizzata per comprendere il livello di comunanza e varietà volto a creare una famiglia di capi o collezione con particolari caratteristiche funzionali ed estetiche. Inoltre lo studio indaga sul rapporto utente / capo d'abbigliamento, focalizzandosi sull'usabilità / praticità del sistema modulare e sulle modalità di interazione previste in fase progettuale.

Lo studio si basa su una ricerca desk che prevede una revisione della letteratura sul tema della progettazione modulare nell'ambito moda con integrazione di casi di studio multipli provenienti dal mondo professionale (Yin, 2014; Gustafsson, 2017). L'integrazione della ricerca in ambito accademico con i casi studio mira a mappare le pratiche esistenti nella progettazione di sistemi modulari di prodotti, servizi correlati e processi di progettazione, prototipazione e produzione di capi di abbigliamento moda. Dal confronto di prototipi di studio, prototipi di ricerca e prodotti industrializzati si vuole quindi mettere in evidenza la potenzialità del design modulare a livello di creatività e di trasformazione nei processi dall'ideazione alla produzione, i limiti attuali e le barriere allo sviluppo come pure l'apporto di nuove tecnologie di produzione per lo sviluppo di capi modulari. Al contempo lo studio descrive le opportunità e i limiti in termini di sostenibilità in una dimensione olistica. La ricerca, condotta tra giugno e settembre 2023, ha revisionato la letteratura utilizzando i motori di ricerca di Scopus e Science Direct attraverso una gamma specifica di parole chiave in inglese: 'Industry 4.0', '4IR', 'Fashion-Tech', combinate con almeno uno dei termini settoriali 'fashion', 'textile', 'clothing', 'apparel', e con termini specifici relativi alla modularità 'transformative', 'trasformable', 'adaptable', 'modular', 'modular design', 'modularity', e 'sustainability'. Dalla ricerca sono emersi 46 articoli su riviste scientifiche e tesi di laurea o di dottorato. I criteri di selezione e scrematura di questa preliminare raccolta sono stati la coerenza con il tema della modularità nel settore moda, la solidità metodologica del contributo presentato e i riferimenti impliciti o espliciti al tema della sostenibilità.

La ricerca di casi multipli è stata condotta sul web, attraverso la combinazione delle stesse parole chiave sui motori di ricerca di Google e Google Scholar. Dei 31 casi studio trovati sono stati selezionati soltanto gli esempi prodotti, messi in commercio e rilevanti rispetto a originalità, importanza e innovazione di prodotto / servizio apportata. Infine i testi scientifici e i casi studio più importanti sono stati raggruppati per tipologia modulare secondo la classificazione di Nadasbas e Cileroglu (2017) e riportati in Tabella 1.

Il capo come modulo trasformabile in collezioni continue | Una collezione continua e modulare

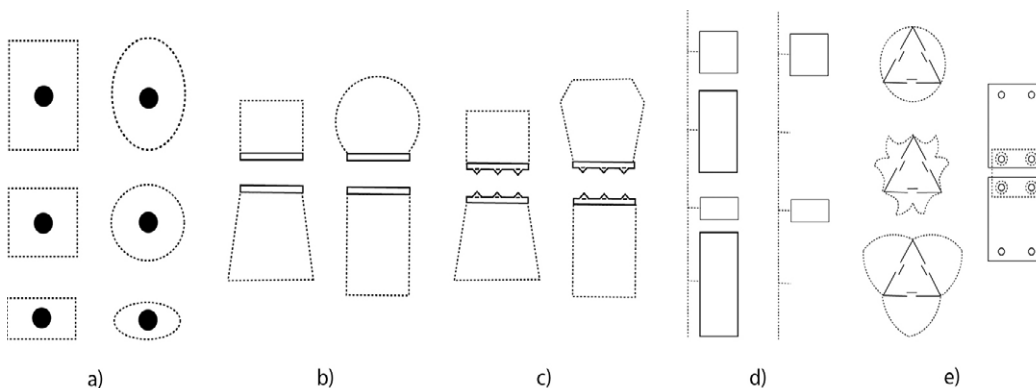


Fig. 1 | Approaches and models of modularity in fashion: a) Modularity by sharing components; b) Modularity model by exchanging components; c) Modularity model by exchanging components; d) Bus-type modularity model; e) Sectional modularity model.

considera ogni capo di abbigliamento progettato come parte di un unico sistema aggiornabile, seguendo il modello di modularità per condivisione di componenti. I moduli / capi possono essere trasformati e abbinati offrendo due o più stili funzionali e/o estetici attraverso vari metodi di manipolazione da parte dell'utente come stratificazione, avvolgimento, legatura, arrotolamento, torsione, piegatura e raccolta. In un sistema modulare di questo tipo non c'è connessione o interfaccia fisica delle componenti, mentre la trasformabilità e multifunzionalità di questi abiti sono demandate al consumatore. La personalizzazione è quindi parzialmente pre-progettata ma può essere creativamente manipolata dal consumatore finale, il quale può accrescere la propria individualità tramite la diversificazione della modalità di vestire.

Un esempio di questa tipologia di modularità è Units / Multiples di Sandra Garratt¹, costituita da moduli / capi adattivi e in taglia unica implementati recentemente in SGDBOX, attraverso l'uso di jersey di cotone biologico più facilmente riciclabile a fine vita (Fig. 2). Lo stesso approccio è adottato nella 'capsule collection' Omdanne² (2016) di Solve Studio composta da tre capi di abbigliamento (T, R ed E) che possono essere trasformati in dieci stili e capi differenti, ovvero tute, abiti, bluse, giacche e pantaloni per supportare diverse occasioni d'uso: la trasformabilità è garantita attraverso avvolgimento e piegatura dei capi che vengono fermati attraverso l'uso di bottoni metallici. L'utente è supportato da un video tutorial esplicativo per ottenere i diversi stili progettati e da suggerimenti per la cura, il lavaggio e la manutenzione del capo. Interamente realizzati con Lyocell Tencel®, i capi risultano totalmente biodegradabili, e quindi circolari. Uno sviluppo dello stesso concetto è Refashion CDS, un sistema che si avvale di tre blocchi di tessuto multifunzionali che sono compatibili tra loro per creare circa undici stili riutilizzando il tessuto stesso attraverso lo smontaggio e il rimontaggio dei capi (Dan et alii, 2023; Figg. 3, 4).

La modularità funzionale di parti di cartamodello tradizionale | Fondato sul concetto di modularità per scambio di componenti, il progetto di capo modulare funzionale è caratterizzato dalla sostituibilità di parti di cartamodello (moduli) la cui assemblabilità e configurabilità è completamente predefinita in fase di progettazione per assolvere diverse funzioni prestabilite, definire stili intercambiabili o adattarsi a diverse occasioni d'uso.

La configurabilità delle parti avviene attraverso un'interazione semplificata dell'utente mediante cerniere o bottoni quali sistemi di interfaccia di separazione e assemblaggio di maniche, cappucci o fodere removibili allo scopo di adattare i capi a diverse condizioni climatiche e atmosferiche o ottenere una diversificazione della lunghezza di gonne, giacche, abiti e pantaloni per diversificare stile o indossabilità in relazione a diverse occasioni d'uso (Peter, n.d.).

La modularità funzionale nel settore moda non è un concetto moderno ma una pratica antica utilizzata per la produzione di abiti più longevi e trasformabili. Le giacche da uomo imbottite comunemente indossate dal XIV al XVII secolo erano spesso caratterizzate da maniche e peplò separabili e modificabili per ottenere una maggiore decorazione (Watt, 2012), mentre il corpetto della metà del XVII secolo aveva maniche staccabili a seconda del desiderio stilistico o delle necessità funzionali. Ulteriori elementi rimovibili fanno parte degli abiti di inizio XVIII secolo, quando divenne di moda abbinare il modello del gilet con i polsini del cappotto, quest'ultimi progettati come separabili dal cappotto attraverso ganci e occhielli, rendendo così possibile il disassemblaggio per lavaggi più frequenti, per sostituzione causa usura o per ragioni estetiche (Gwilt, 2014).

Esempi contemporanei di questa tipologia di modularità sono alcune giacche trasformabili e inclusive come le giacche e cappotti di EDIT+³ (2020) per cui si possono ottenere 8 modelli diversi a seconda delle dimensioni del corpo di chi lo indossa (Fig. 5). Anche nelle collezioni di Flavia La Rocca⁴ i capi sono configurabili grazie all'uso di cerniere nascoste per creare abiti, tute, top e gonne, stando attenti alla coerenza delle taglie delle varie componenti selezionate: lo scopo è ottenere 'un guardaroba senza fine' che travalichi le stagionalità (Fig. 6). Infine Cramer (2014) presenta un top in maglia trasformabile attraverso la separabilità delle maniche fissate alle spalle con bottoni a pressione. Il top è dotato di protezioni sotto le ascelle per le macchie causate da sudore e deodorante ed è rifinito con colletto, polsini e orlo di un tessuto a contrasto rimovibili e sostituibili quando usurati mediante macchine da cucire domestiche. In questo caso la disassemblabilità implica abilità degli utenti nel cucito.

La modularità basata su autoassemblaggio di parti di cartamodello tradizionale | Un approccio

di modularità di parti di cartamodello che implichi una maggiore interazione con l'utente è proposto attraverso interfacce e meccanismi di interconnessione costituiti da tessuto direttamente ricavato nel modulo che il consumatore può assemblare manualmente per confezionare il capo desiderato. Tale scelta deriva dal voler ingaggiare attivamente l'utente nella realizzazione del capo, creando un legame emotivo con lo stesso, allo scopo di influire positivamente sul suo attaccamento e quindi aumentare l'uso e la durata di vita.

Un esempio pionieristico è The Post-Couture Collective⁵ (2015), collezione di abiti modulari costituiti da parti di cartamodello da assemblare autonomamente senza il bisogno di macchine da cucire ma mediante connettori in tessuto ricavati sul modulo stesso: il prodotto è realizzato su richiesta dell'utente, quindi personalizzabile sulle sue misure corporee, scaricabile digitalmente dal sito, realizzabile in kit da assemblare poi manualmente, e prodotto tramite taglio laser di un materiale simile al neoprene realizzato in PET da bottiglie riciclate (Fig. 7).

Self-Assembly⁶ (2022) disegna e produce in maniera completamente automatizzata e digitale un kit per la costruzione di indumenti pronti per l'assemblaggio manuale da parte degli utenti grazie ad una speciale tecnica di legatura dei connettori ricavati dal taglio laser del cartamodello. Simile, ma con un intento ludico ed educativo, è poi l'approccio di Puzzleware / Convertibles di Almaborealis⁷ (2021), un sistema modulare di capi in maglia di lana colorata che i bambini possono cucire manualmente inserendo l'ago nei fori presenti sulle diverse porzioni di cartamodello (Figg. 8, 9).

Gli abiti derivati da blocchi destrutturati modulari | La separazione e ricomposizione di moduli destrutturati per qualità geometriche e capacità di riconfigurarsi in funzioni alternative e non costanti è un altro esempio sperimentale di modularità. L'approccio progettuale è molteplice e può essere caratterizzato da un elemento base fisso che si interfaccia con gli altri elementi (modularità di tipo 'bus') oppure attraverso blocchi modulari che possano essere separati e ricomposti con uguale e diversa funzionalità (modularità 'mix'). La configurabilità non richiede competenze di cucito, ma si basa su interfacce meccaniche come zip, bottoni o connettori che assicurano un'interazione semplificata per promuovere la sperimentazione creativa da parte del consumatore; la configurabilità è dunque progettata dal designer affinché ci sia maggiore potenzialità creativa nella ricomposizione dei moduli da parte dell'utente.

Rahman e Gong (2016) presentano un prototipo trasformabile esemplificativo di questo approccio, composto da 39 componenti modulari configurabili in diversi stili e secondo diverse funzionalità attraverso l'interfaccia meccanica metallica delle cerniere, ritenute più pratiche e sicure (Fig. 10). Diversamente, la collezione autunno-inverno 2020 di Anrealage⁸ (2020) è descritta come 'pick 'n' mix hybrids' ed è caratterizzata da blocchi colorati, modulari e assemblabili. Il processo creativo ha prima lavorato sulla composizione attraverso abbinamenti cromatici e morfologici senza considerare il corpo e, in una seconda fase, le combinazioni sono state sovrapposte all'anatomia umana per generare dei capi di abbigliamento.

Resources	Authors	Year	Title	Sharing Components Modularity	Swapping Components Modularity	Cut-to-Fit Modularity	Bus Modularity	Sectional Modularity	Mix Modularity
Scientific papers	Hur and Thomas	2011	Transformative Modular Textile Desig			✓		✓	
	Cramer	2014	Wear, repair and remake: the evolution of fashion practice by design		✓				
	Rahman and Gong	2016	Sustainable practices and transformable fashion design: Chinese professional and consumer perspectives				✓		✓
	Li, Chen and Wang	2018	Modular design in fashion industry			✓		✓	
	Spahiu, Canaj and Shehi	2020	3D printing for clothing production			✓		✓	
	Chen	2020	Vanishing Ice					✓	
	Chen and Lapolla	2021	The Exploration of Geometric Modular System in Textile and Apparel Design			✓		✓	
	Tufan Tolmaç and Ismal	2022	A new era: 3D printing as an aesthetic language and creative tool in fashion and textile design					✓	
	Chen	2022	Modular Illusion					✓	
	Dan, Ciortea and Mayer	2023	The refashion circular design strategy: changing the way we design and manufacture clothes	✓		✓			
Case studies	Sandra Garratt	1979	Units / Multiples	✓					
	Refinity and Berber Soepboer	2009	Fragment Textiles			✓		✓	
	Danit Peleg	2015	3D-printed ready-to-wear clothing lines			✓			
	Martijn van Strien	2015	The Post Couture Collective		✓	✓			
	Bolor Amgalan	2015	Metabolism					✓	
	Sandra Garratt	2016	SGDBOX	✓					
	Solve Studio	2016	Omdanne	✓					
	Flavia La Rocca	2016	Guardaroba senza fine		✓	✓			
	Yuima Nakazato	2017	Freedom			✓		✓	
	Jean Sung	2020	EDIT+		✓				
	Anrealage	2020	'pick 'n' mix hybrids'				✓		✓
	Almaborealis	2021	Puzzleware / Convertibles		✓				
	Julia Koerner	2021	Arid			✓			
	N.d.	2022	Self-Assembly		✓				
	Fabricademy	n.d.	Open Source Circular Fashion Catalogue						✓

Tab. 1 | Synoptic table on the scientific literature and case studies selected in the contribution.

La diversa configurabilità dei moduli è determinata da un'interfaccia metallica costituita da un sistema di bottoni automatici che permette di staccare e riorganizzare i moduli. A livello progettuale è dunque necessario far coincidere la lunghezza di alcune cuciture su tutto il corpo e su vari tipi di indumenti e tessuti per garantire che tutti i pezzi possano essere spostati e ricombinati: un colletto

può diventare un polsino, mentre un corpetto si può trasformare nella parte inferiore di una gonna (Fig. 11). Infine la collezione modulare Arid⁹ (2021) di Julia Koerner è composta da 38 parti modulari combinabili tra loro per formare un abito completo oppure, grazie a diverse combinazioni configurabili, giacche e gonne di diverse lunghezze. Attraverso la tecnologia di stampa 3D Polyjet di Stra-

tasys, la resina viene depositata su un tessuto traforato e questo permette leggerezza, vestibilità, traspirabilità e comfort. La stessa tecnologia permette di variare le cromie del capo, creando estetiche contemporanee ricche e dettagliate. Il posizionamento dei moduli è basato sulla disposizione dei muscoli e sull'anatomia di un corpo femminile, mentre l'interfaccia di connessione tra i vari moduli è

costituita da connettori stampati direttamente sul tessuto in 3D. In questo caso il sistema è pensato per consentire un'adattabilità personalizzata degli indumenti grazie a un processo di ingegnerizzazione del capo a partire da scansione 3D del corpo di chi lo indosserà (Fig. 12).

Gli abiti destrutturati in microunità geometriche modulari

La modularità geometrica (Li, Chen and Wang, 2018) caratterizza capi di abbigliamento basati su tassellazione modulare ripetuta in cui l'unità modulare sia minima in forma di triangolo, quadrato o esagono la cui interconnessione avviene per mezzo di connessioni tessili che sono integrate all'interno dei moduli stessi mediante tagli e linguette. Basato su un approccio modulare sezionale, ogni elemento modulare utilizza un insieme comune di interfacce per connettersi. La configurabilità dei moduli è progettata per poter creare strutture tessili planari o tridimensionali estremamente flessibili atte a formare molteplici capi da indossare; infatti la configurabilità in uno specifico capo non è predeterminata, ma deriva dalla manipolazione e strutturazione creativa delle microunità geometriche modulari che può essere più o meno demandata al consumatore.

I materiali maggiormente utilizzati in questo approccio sono tessuti artificiali, come il feltro e la neoprene, che non tendono a sfrangiarsi dopo il taglio attraverso la tecnologia laser e in cui il sistema di interfaccia a incastro e interconnessione tra i moduli è particolarmente resistente a trazione e non si usura facilmente a seguito di frequenti fasi di assemblaggio e disassemblaggio.

Per tale tipologia modulare un primo approccio è fornito dal progetto Nomadic Wonderland (Hur and Thomas, 2011) che utilizza il modulo triangolo

lare inscritto in un cerchio e da cui vengono ricavate le fessure per il sistema di interconnessione tra i moduli. Sullo stesso tema Chen e Lapolla (2021) hanno elaborato unità modulari basate su triangolo ed esagono con interfacce geometricamente più complesse realizzabili attraverso il taglio laser; quest'ultimo permette sì di creare maggiori dettagli ma costringe all'utilizzo di materiali artificiali per limitare la sfrangiatura post-taglio (Fig. 13).

Ulteriori esplorazioni materiche sono effettuate nel progetto Metabolism¹⁰ (2015) di Bolor Amgalan, i cui materiali tessili dei moduli sono stati realizzati ad hoc incollando diversi strati per ottenere caratteristiche funzionali ed estetiche non convenzionali, coniugando comfort, estetica e struttura; tuttavia i moduli realizzati risultano più difficili da gestire a fine vita del prodotto perché difficilmente separabili. Fragment Textiles¹¹ (2009) utilizza una tassellazione formalmente duplice, quadrato e stella che si intersecano sulla base di principi matematici e geometrici realizzando molteplici composizioni formali e dimensionali.

Ulteriori esplorazioni formali sono collezionate nell'Open Source Circular Fashion Catalogue¹² (n.d.), una piattaforma di archivio di progetti concettuali sul tema della modularità geometrica e della circolarità realizzabili attraverso prototipazione e manifattura additiva e sottrattiva. A questo proposito la combinazione di compiti che possono essere svolti solo dalle macchine, come la stampa 3D, e di quelli che possono essere svolti solo dalle mani dell'uomo, come l'assemblaggio delle componenti modulari, dà vita a un tipo di abbigliamento totalmente nuovo nella collezione AW 2017-18 Freedom¹³ (2017) di Yuima Nakazato.

Il designer giapponese utilizza un approccio matematico digitale per calcolare il numero di unità

modulari necessario per costruire il capo su misura per ogni singolo individuo: le singole unità modulari vengono tagliate a macchina mentre l'abito tridimensionale viene assemblato manualmente attraverso un sistema di connessione stampato in 3D che richiede operazioni di inserimento in asole di tessuto. Tramite questo approccio si possono realizzare diversi modelli, facendo coesistere materiali diversi nello stesso capo (Fig. 14).

Infine i moduli possono essere ottenuti direttamente dalla stampa 3D come nei progetti di Danit Peleg¹⁴ (2015), Spahiu, Canaj e Shehi (2020) e Tufan Tolmaç e Ismal (2022) che sfruttano la limitata dimensione del piano di stampa 3D della tecnologia FDM e congiungono i moduli attraverso una penna da stampa 3D o mediante il calore del saldatore / ferro da stiro, rendendo i moduli indivisibili una volta assemblati (Fig. 15). Diversamente Chen (2022) propone un sistema modulare con stampa 3D e la forma di un fiore a sei petali, le cui fessure funzionano da sistema di assemblaggio e disassemblaggio manuale.

Riflessioni conclusive per una modularità supportata da creatività, tecnologia e sostenibilità

Il risultato dell'analisi condotta presenta la moda modulare come strumento strategico di ricerca e sviluppo in ambito accademico e in piccole aziende, mancando una sua diffusione su larga scala industriale. Le barriere alla diffusione e scalabilità della moda modulare sono individuate nella necessaria trasformazione dei processi di design e produzione, dell'estetica dei capi, dei comportamenti di uso e consumo dell'utente finale e dei modelli di business delle aziende (Peter, n.d.). Al contempo la ricerca rivela che le nuove tecnologie dell'Industria 4.0 possono potenziarne la fattibilità

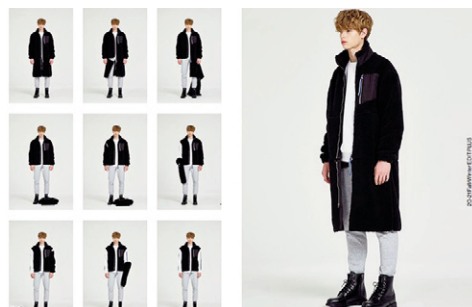
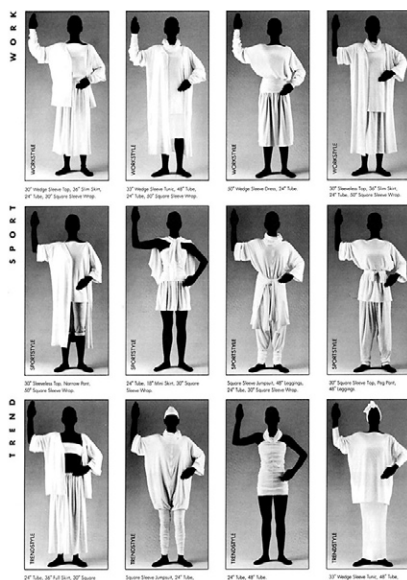


Fig. 2 | Units / Multiples by Sandra Garratt (credit: S. Garratt, 2016).

Fig. 3 | Omdanne by Solve Studio (credit: Solve Studio, 2016).

Fig. 4 | Refashion CDS (source: Dan et alii, 2023).

Fig. 5 | Transformable jacket by EDIT+ (credit: EDIT+, 2020).

produttiva e l'interoperabilità tra gli attori della catena di approvvigionamento.

In termini di sostenibilità ambientale la moda modulare risulta essere una strategia utile a sfruttare meglio le risorse tessili e a prolungare la durata di vita di tessuto e capo, migliorando il rapporto tra gli indumenti e gli utenti allo scopo di sviluppare un attaccamento emozionale contrapposto all'obsolescenza psicologica da cui deriva l'odierno sovraconsumo (Chapman, 2009). Inoltre promuovendo l'interazione prolungata con il capo durante l'uso tramite la sostituzione di componenti critiche e usurate, si attivano cicli multipli di riutilizzo che valorizzano la durata e la cura del capo prima che, in estrema ratio, lo stesso venga riciclato o conferito in discarica (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

I casi studio analizzati dimostrano che la disassemblabilità e la riciclabilità a fine vita sono possibili solo mediante una scelta oculata di tessuti mono-materici per i singoli moduli. Tuttavia, se un'interfaccia di connessione tra i moduli costituita da accessori metallici (come bottoni e zip) da un lato rende più agili e veloci i processi di configurabilità dei prodotti, dall'altro crea una più complessa gestione della fase di disassemblaggio e riciclo dell'indumento a fine vita, inficiando la circolarità del modulo e del tessile. Laddove diversamente il montaggio è manuale ed è lasciato all'utente finale attraverso kit da auto-assemblare o attraverso capi da trasformare, il sistema di interfaccia di connessione modulare risulta più sostenibile e circolare; in questi casi risulta evidente la necessità di limitare la complessità costruttiva dei capi e guidare l'utente nell'assemblaggio attraverso tutorial che rendano l'attività più gradevole per un non addetto ai lavori, anche quando non si ravvisi la necessità dell'utilizzo della macchina da cucire.

Da un punto di vista di sostenibilità sociale, alcuni casi analizzati riportano la modularità a un concetto di inclusività e personalizzazione del capo: attraverso il 'cut-to-fit', presente in quasi tutti i casi analizzati, i moduli diventano elementi modificabili a livello dimensionale per poter essere adattati alle esigenze dell'utente, sia attraverso la tassellazione matematica dei moduli in funzione delle misure antropometriche del singolo sia attraverso una ridefinizione parametrica delle misure dei cartamodelli modulari.

Quindi, in una dimensione di sostenibilità sociale la modularità consente di trasformare l'abito rispetto alle modifiche del proprio corpo, eliminando lo stigma legato al cambiare o non trovare la propria taglia o un capo che si adatta correttamente alla propria fisicità, ma anche rispetto a stile, vestibilità ed ulteriori scelte estetiche. Per attuarla però è necessario che la progettazione modulare per la personalizzazione di massa trovi riscontro nell'interesse dei consumatori e sia supportata da un sistema-servizio basato sulle tecnologie dell'Industria 4.0, in particolare sull'Intelligenza Artificiale e sull'Internet of Things (IoT) per garantire interoperabilità tra i diversi attori della catena di approvvigionamento, la fattibilità a livello produttivo e distributivo e la scalabilità dell'offerta modulare personalizzabile (Bertola and Teunissen, 2018; Dan et alii, 2023).

Progettare la modularità di un capo si rivela un sistema a vantaggio della creatività dei designer perché potenzialmente consente di ottenere forme e stili sempre diversi e più facilmente aggiornabili e modificabili attraverso collezioni diversifi-

cate e flessibili ma continue negli anni e nelle stagioni. Per un effettivo sviluppo dell'approccio modulare si rende necessario un cambio di attitudine alla progettazione, sia in termini strategici che rispetto agli strumenti utilizzati, oltre che a una progressiva modifica delle modalità di prototipazione e produzione; tale cambiamento richiede anche nuove strategie di distribuzione e vendita incentrate su sistemi locali che agevolino il rapporto fidelizzato con l'utente e supportino la sua esperienza di acquisto e d'uso.

Da un punto di vista di sostenibilità culturale questo studio mostra la necessità che il design si occupi anche della progettazione del post-vendita di un capo modulare: è necessario progettare le attività di interazione dell'utente con l'indumento durante la sua vita utile attraverso sistemi e servizi che garantiscano continuità e fidelizzazione, ma anche attività partecipative, toolkit di istruzioni (Hur, 2015), attivando servizi di collegamento tra utente e azienda che al momento sono stati sviluppati solo a livello concettuale (Karrell, 2014; Dan et alii, 2023). In futuro si ravvisa quindi la necessità di mettere in campo strategie che possano agire sulla modifica dei comportamenti degli utenti in fase di acquisto e utilizzo dei capi per educare a una nuova cultura di consumo.

Sebbene i sondaggi sull'opinione dei consumatori rispetto alla moda modulare siano pochi, l'interesse degli intervistati evidenzia apprezzamento per strategie di sostenibilità come la riparabilità, la personalizzazione e la trasformabilità stilistica, cromatica e d'uso (Koo, Dunne and Bye, 2013; Niinimäki and Hassi, 2011); tuttavia mancano ancora studi scientifici che quantifichino i benefici in termini di impatto positivo dato da una produzione di abiti modulari rispetto a una tradizionale (Maldini and Balkenende, 2017). Quali risultanze dei sondaggi, Rahman e Gong (2016) riferiscono di commenti relativi all'estetica, alla praticità e alla complessità nella gestione della trasformazione di un capo modulare; tra i motivi di preoccupazione si segnalano un concetto troppo nuovo per gli utenti e il timore di costi elevati. Per superare tali criticità sono quindi necessari studi che validino l'attaccamento a lungo termine degli utenti a un capo e che confermino la correlazione tra modularità e riduzione dei consumi e dei volumi di produzione.

Altra prospettiva di ricerca potrebbe essere esplorare nuovi modelli di business che possano supportare l'adozione di questo approccio progettuale e produttivo da parte delle aziende moda. È evidente che il mancato sviluppo dei sistemi modulari nel settore derivi anche dalla mancanza di interesse delle aziende per strategie che riducano i consumi e il ritorno economico. Tradizionalmente basata su un sistema lineare, l'industria della moda tende a privilegiare pratiche consolidate piuttosto che a innovare radicalmente i processi che determinano sviluppo, produzione e vendita di un capo (Buchel et alii, 2018); tuttavia a livello teorico la modularità è una strategia che può fidelizzare il cliente finale, generare nuove economie di scala riducendo al contempo gli sprechi e la sovrapproduzione (Kusiak, 1999).

A questo obiettivo concorrono le tecnologie dell'Industria 4.0 che potrebbero semplificare, rendendolo più flessibile, un approccio progettuale e produttivo modulare attraverso l'impiego di strumenti digitali per una più rapida e precisa prototi-



Fig. 6 | Convertible dresses by Flavia La Rocca (credit: F. La Rocca, 2016).

pazione e per ottimizzare la gestione del ciclo di vita dei prodotti (Bertola and Teunissen, 2018); al contempo gli strumenti digitali possono contribuire allo sviluppo di nuovi business basati sulla customizzazione di massa, sia tenendo conto delle misure antropometriche degli utenti sia delle loro scelte tessili, cromatiche, formali e stilistiche, mentre i tag RFID possono essere posti sui moduli per tracciare la vita del prodotto nel tempo. L'analisi dello stato dell'arte ci conferma che non esistono pratiche di questo tipo ma solo proposte di studio e progetti concettuali che si focalizzano sullo sfruttamento delle tecnologie in ottica di modularità, interoperabilità, scambio di dati in tempo reale per promuovere il design della modularità nella moda (Dan et alii, 2023).

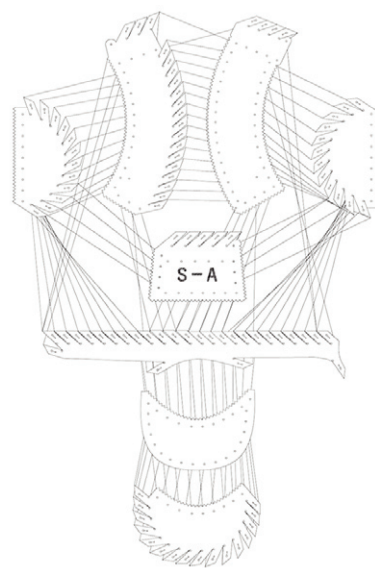
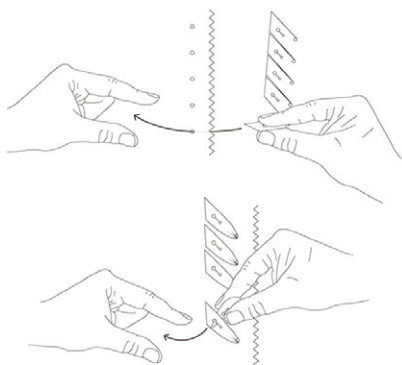
I capi modulari sviluppati, prototipati e prodotti per mezzo di stampa 3D presentano vantaggi e svantaggi. Gli elementi modulari stampati hanno maggiore resistenza e durabilità ma anche una peggiore vestibilità, risultando ancora lontani dai parametri di comfort, traspirabilità e leggerezza rag-

giunti nei tessuti tradizionali (Chen, 2020). Il taglio laser è storicamente la tecnologia che ha supportato la maggior parte dei progetti modulari basati su geometrie variabili con micro-unità assemblabili, grazie a un taglio di precisione a partire da un disegno digitale anche complesso. Il taglio laser presenta però limitazioni in quanto i tessuti che vengono tagliati al vivo senza l'uso di cuciture sono tessuti artificiali e tessuti non tessuti che non

sfrangiano dopo il taglio, il lavaggio e numerose manipolazioni. Nel caso in cui si incollino due tessuti per ottenere maggiore comfort e rifinitura dei contorni risultanti dal taglio, purtroppo si crea una criticità sulla circolarità a fine vita del prodotto che diventa poco gestibile rispetto alla disassemblabilità e riciclabilità.

La moda occupa un posto importante nella società odierna non solo per la produzione di indu-

menti e del loro impatto e gestione a fine vita, ma anche per le dinamiche culturali e sociali che influenza: un capo d'abbigliamento non è soltanto costituito da un intreccio di fili ma influenza molteplici fattori economici, etici, culturali e ambientali. In quest'ottica si rende necessario approfondire studi multidisciplinari rispetto alla fattibilità e scalabilità della modularità nel settore moda esplorando nuovi modelli di business, improntati all'uso di tecnologie dell'Industria 4.0 e a un approccio guidato dal design che si occupi della progettazione del prodotto, del servizio ma anche dell'interazione dell'utente con il prodotto durante l'uso.



The fashion industry, particularly clothing production, represents one of the most resource-intensive sectors, substantially impacting garments consumption and end-of-life management. In its current linear configuration, the fashion system creates waste streams, including post-consumer textile waste (garments discarded by the consumer) that ends up in landfills (Ellen MacArthur Foundation, 2017). The overproduction and overconsumption of resources in the production and sale of garments severely impacts the four interconnected dimensions of environmental, social, cultural and economic sustainability (Brown and Vacca, 2022). While some studies show that 65% of the environmental impact of a garment comes from the production of the fabric, considering thread, fibre, and fabric, including all related surface treatments, Fletcher (2014) showed that the most significant impact in the life of a garment is generated after its purchase, during use, maintenance and disposal. In particular, the end-of-life of a garment through reuse or recycling is to date still limited to local initiatives and specific services aimed at implementing positive business models for circularity and regenerating local economies (Kasper and Stroomer, 2021); in this sense, extending the active life of a garment and making sure that it can be easily disassembled and recycled at the end of its life is considered one of the most efficient strategies to reduce fashion's environmental impacts (McLaren et alii, 2016; Kasper and Stroomer, 2021). Consequently, the choices made during the design stages account for 80% of the environmental impact of fashion products, profoundly influencing the supply and value chain (Ballie and Woods, 2018).

To lead positive change in the fashion industry, the Ellen MacArthur Foundation (2013) emphasised that design strategies towards transformable fashion can be considered extremely useful for the sustainable and circular development of the industry. 'Transformable design' allows for functional and/or aesthetic modifications to garments, fostering their multifunctionality by enhancing existing features or encouraging new ones (Lee, Tufail and Kim, 2016) through deconstruction and reconstruction activities that make the garment continuously adaptable. Within the category of transformable clothing, Koo (2012) identifies modifiable elements such as colour and pat-

Fig. 7 | Modular project by The Post-Couture Collective (credit: The Post-Couture Collective, 2015).

Fig. 8 | Self-Assembly (credit: Self-Assembly, 2022).

Fig. 9 | Puzzleware / Convertibles (credit: Almaborealis, 2021).

tern, size and fit, silhouette, garment type and details and defines 'modular design' as one of the possible ways a garment can be modifiable. Modular clothing is constructed using parts that, combined in various ways, offer the consumer the possibility of modifying the garment during its use.

In light of the above, this paper aims to propose a systematisation of modularity design in the fashion system as it has been applied within research contexts and in the industrial world through a reconstruction of the main characteristics of the adopted modular architecture (modules, configurability and organisation, system interdependence and interface), the level of implementation and scalability achieved and, finally, the materials and production technologies used.

By outlining the state of the art in academic and industrial research, the aim is to highlight the significant approaches to modular design and, above all, their limitations and opportunities, comparing theoretical studies and practical applications and expanding the boundaries of design from product to system / service through the support derived from the use of Industry 4.0 technologies. The potential for future developments in modular fashion identified in this paper can provide insights into innovation paths in garment design and production processes of interest to academia and industry, facilitating multidisciplinary dialogue between practitioners towards a more sustainable transformation.

Modular design | Modularity is a design strategy used to create complex systems using independent components and sub-systems (modules), which can be configured with each other through standard interfaces such that modifying one module does not imply any damage or criticality to the others. Instead, it results in more alternative functionalities over time (Tseng and Wang, 2014). The overall functionality of a modular product is subdivided into sub-functions of individual components, whose assembly and disassembly should not alter the operability of the product.

Modular design ensures the generation of a variety / diversity of products in which modular components can be easily replaced and upgraded over time; this purpose requires a strategic design of both production and consumption phases and a more efficient organisation of complex projects and processes. Consequently, a modular product must be conceived in the early stages of design ideation and development by considering the implications in its four critical subsequent stages, i.e. pre-production, production, use and end-of-life. At the same time, Bonvoisin, Halstenberg, Buchert and Stark (2016) suggest that modular design can positively influence the three dimensions of economic, ecological and social sustainability by influencing the entire product life cycle.

The architecture of a modular product is essentially defined by the modules and the functional, physical and aesthetic relationships between them (Ulrich, Eppinger and Yang, 1995); furthermore, the system of interfaces designed to offer configurability and variety determines the ability to form a family / system of developable products having a common platform (Meyer and Lehnerd, 1997). Modular design in fashion characterises a garment composed of modules (elementary parts / units) that can be assembled / disassembled

through different interfaces or connection systems to form a collection (system / family) of garments that can be easily modified to suit functional performance and/or aesthetic requirements that relate to subjective tastes or derived from current trends (Niinimäki and Hassi, 2011; Koo, Dunne and Bye, 2014).

Research objectives (aims) and methodological approach | This paper presents a categorisation of modular design realisations applied to fashion, highlighting which design approaches to modularity have been implemented, starting with the research of Nadasbas and Cileroglu (2017); the two scholars identified six different approaches to modular design: sharing components modularity, swapping components modularity, 'cut-to-fit' modularity, 'bus' modularity, sectional modularity and 'mix' modularity (Fig. 1). Although widely employed in other sectors, these design approaches to modularity are still little explored systematically in the fashion industry.

The conducted analysis aims to understand the central architecture of the modular system adopted, consisting mainly of components (modules), interfaces and configurability standards, i.e. connecting elements that enable the assembly and disassembly relationship. To this end, the systemic relationship of interdependence between the geometric elements is analysed to understand the level of commonality and variety aimed at creating a family of garments or collections with particular functional and aesthetic characteristics. Furthermore, this study investigates the user / garment relationship, focusing on the usability / practicality of the modular system and the interaction modalities envisaged in the design phase.

The study is based on desk research involving a literature review on modular design in fashion, integrating multiple case studies from the professional world (Yin, 2014; Gustafsson, 2017). Integrating academic research with case studies aims to map existing practices in designing modular product systems, related services and processes for designing, prototyping and producing fashion garments. By comparing study prototypes, research prototypes and industrialised products, the aim is to highlight the potential of modular design in terms of creativity and transformation in processes from conception to production, the current limits and barriers to development, as the contribution of new production technologies for the development of modular garments. At the same time, the study describes the opportunities and limits in terms of sustainability in a holistic dimension. The search, conducted between June and September 2023, reviewed the literature using the search engines Scopus and Science Direct through a specific range of keywords: 'Industry 4.0', '4IR', 'Fashion-Tech', combined with at least one of the sector terms 'fashion', 'textile', 'clothing', 'apparel', and with specific terms related to modularity 'transformative', 'transformable', 'adaptable', 'modular', 'modular design', 'modularity', and finally 'sustainability'. The search yielded 46 articles in scientific journals and dissertations. The criteria for selecting and skimming this preliminary collection were consistency with the theme of modularity in the fashion industry, the methodological soundness of the papers, and implicit or explicit references to the theme of sustainability.



Fig. 10 | Modular Collection (source: Rahman and Gong, 2016).

The search for multiple case studies was conducted online by combining the same keywords on Google and Google Scholar search engines. Of the 31 case studies found, the examples selected were the only ones produced, marketed and relevant concerning originality, and product / service innovation provided. Finally, the most pertinent scientific texts and case studies were grouped by modular type according to Nadasbas and Cileroglu's (2017) classification and shown in Table 1.

The garment as a transformable module in continuous collections | An ongoing modular collection considers each garment designed as part of a single upgradeable system, following the modularity model by sharing components. The user can transform and combine modules / garments offering two or more functional and/or aesthetic styles through various manipulation methods, such as layering, wrapping, tying, rolling, twisting, folding and gathering. In such a modular system, there is no physical connection or interface of the components, while the transformability and multifunctionality of these garments are left to the consumer. Customisation is thus partially pre-designed but can be creatively manipulated by the end consumer, who can enhance his or her individuality through the diversification of the mode of dress.

An example of this type of modularity is Sandra Garratt's Units / Multiples¹, consisting of adaptive, one-size-fits-all modules / garments recently implemented in SGDBOX, through the use of organic cotton jersey that is more easily recyclable at the end of its life (Fig. 2). The same approach is adopted in Solve Studio's 'capsule collection' Omdanne² (2016) consisting of three garments (T, R and E) that can be transformed into ten different styles and garments, i.e. suits, dresses, blouses, jackets and trousers to support different occasions of use: transformability is ensured through wrapping and folding the garments, which are fastened through the use of metal buttons. The user is supported by an explanatory video tutorial to achieve the different styles designed and by

tips for care, washing and maintenance of the garment. Made entirely from Lyocell Tencel®, the garments are biodegradable and circular. A development of the same concept is Refashion CDS. This system uses three multifunctional fabric blocks compatible to create around eleven styles by reusing the fabric through the disassembly and reassembly of garments (Dan et alii, 2023; Figg. 3, 4).

Functional modularity of traditional paper pattern parts | Based on the concept of swapping components modularity, the functional modular garment design is characterised by the exchangeability of paper pattern parts (modules) whose assembly and configurability are completely predetermined at the design stage in order to fulfil different predetermined functions, define interchangeable styles or adapt to different occasions of use. The configurability of the parts takes place through simplified user interaction employing zips or buttons as interface systems for separating and assembling sleeves, hoods or removable linings in order to adapt the garments to different weather and atmospheric conditions or to obtain a diversification of the length of skirts, jackets, dresses and trousers in order to diversify style or wearability concerning different occasions of use (Peter, n.d.).

Functional modularity in fashion is not a modern concept but an ancient practice for producing longer-lasting and transformable clothes. Men's padded jackets from the 14th to the 17th century often featured sleeves and peplos that could be detached and altered to achieve more decoration (Watt, 2012), while the mid-17th-century bodice had detachable sleeves according to stylistic desire or functional need. Further removable elements were part of early 18th-century garments when it became fashionable to combine the waistcoat model with coat cuffs, the latter designed as separable from the coat through hooks and eyelets, thus making it possible to disassemble for

more frequent washing, replacement due to wear or for aesthetic reasons (Gwilt, 2014).

Contemporary examples of this type of modularity are some transformable and inclusive jackets such as the jackets and coats by EDIT+³ (2020), for which eight different models can be obtained depending on the size of the wearer's body (Fig. 5). Also in Flavia La Rocca's collections⁴, garments are configurable through the use of concealed zips to create dresses, jumpsuits, tops and skirts, paying attention to the consistency of the sizes of the various components selected: the aim is to obtain 'an endless wardrobe' that transcends seasonality (Fig. 6). Finally, Cramer (2014) presents a knit top that can be transformed by separating the sleeves attached to the shoulders with snap buttons. The top is equipped with underarm protectors for stains caused by sweat and deodorant and is finished with a collar, cuffs and hem of a contrasting fabric that can be removed and replaced when worn using domestic sewing machines. In this case, the disassembly implies users' sewing skills.

Modularity based on self-assembly of traditional paper pattern parts | An approach of modularity of parts of the paper pattern which involves more significant interaction with the user is proposed through interfaces and interconnection mechanisms consisting of fabric directly taken from the module, which the consumer can manually assemble to make the desired garment. This choice stems from the desire to actively engage the user in creating the garment, establishing an emotional bond with the garment to positively influence his or her attachment and thus increase its use and lifespan. A pioneering example is The Post-Couture Collective⁵ (2015), a collection of modular garments made up of parts of paper patterns to be assembled autonomously without the need for sewing machines, but employing fabric

connectors obtained on the module itself: the product is made to the user's request, thus customisable on the user's body measurements, digitally downloadable from the site, made in kits to be assembled then manually, and produced by laser cutting a material similar to neoprene made of PET from recycled bottles (Fig. 7).

Self-Assembly⁶ (2022) designs and produces in a fully automated and digital manner a kit for the construction of garments ready for manual assembly by users employing a unique technique of tying the connectors obtained by laser cutting the fabric of the pattern. Similar, but with playful and educational intent, is the approach of Puzzleware / Convertibles by Almaborealis⁷ (2021), a modular system of coloured wool knitted garments that children can sew by hand by inserting the needle into the holes on the different portions of the knitted patterns (Figg. 8, 9).

Garments derived from modular deconstructed blocks | The separation and recombination of deconstructed modules due to their geometric qualities and the ability to reconfigure into alternative and non-constant functions is another experimental example of modularity. The design approach is multifaceted and can be characterised by a fixed fundamental element that interfaces with other elements ('bus' modularity) or through modular blocks that can be separated and recombined with equal and different functionality ('mix' modularity). Configurability does not require sewing skills but is based on mechanical interfaces such as zips, buttons or connectors that ensure simplified interaction to promote creative experimentation by the consumer; configurability is therefore designed by the designer so that there is more significant creative potential in the recombination of modules by the user. Rahman and Gong (2016) present a transformable prototype exemplifying this approach, consisting of 39 modular components



Fig. 11 | Anrealage AW 2019-2020 collection (credit: Anrealage, 2020).

Fig. 12 | Arid by Julia Koerner (credit: Arid, 2021).

Next page

Fig. 13 | Modular collection (source: Chen and Lapolla, 2021).

Fig. 14 | Freedom AW 2017-18 collection by Yuima Nakazato (credit: Freedom, 2017).

Fig. 15 | Example of modularity through 3D printing (source: Spahiu, Canaj and Shehi, 2020).

that can be configured in different styles according to different functionalities through the metal mechanical interface of hinges, which are considered more practical and secure (Fig. 10). In contrast, the autumn-winter 2020 collection by Anrealage⁸ is described as 'pick 'n' mix hybrids' and is characterised by colourful, modular and assemblable blocks. The creative process first worked on the composition through colour and morphological combinations without considering the body, and, in a second phase, the combinations were superimposed on the human anatomy to generate garments.

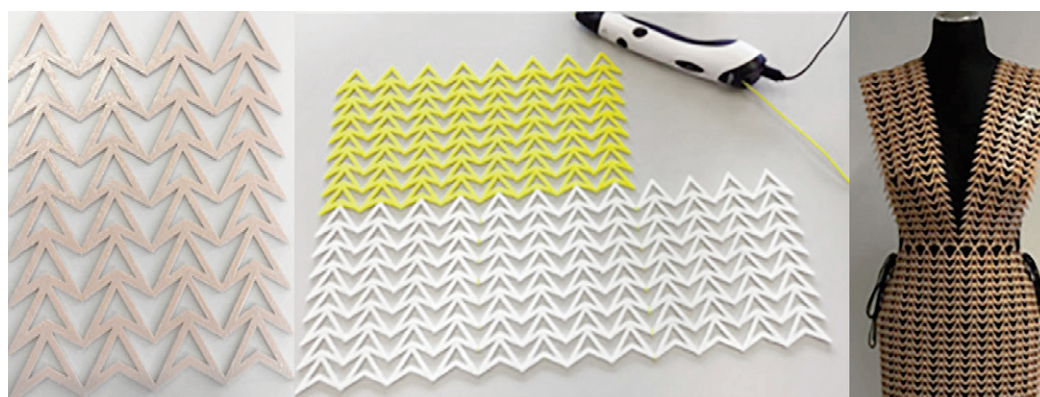
The different configurability of the modules is determined by a metal interface consisting of a system of snap fasteners that allows the modules to be detached and rearranged. At the design level, it is, therefore, necessary to match the length of certain seams on the whole body and on various types of clothing and fabrics to ensure that all pieces can be moved and recombined: a collar can become a cuff, while a bodice can be transformed into the lower part of a skirt (Fig. 11).

Finally, Julia Koerner's modular Arid⁹ collection (2021) consists of 38 modular parts that can be combined to form a complete suit or, thanks to various configurable combinations, jackets and skirts of different lengths. Using the Polyjet 3D printing technology from Stratasys, the resin is deposited on a perforated fabric, allowing lightness, wearability, breathability and comfort. The same technology allows the colours of the garment to vary, creating rich and detailed contemporary aesthetics. The positioning of the modules is based on the arrangement of muscles and the anatomy of a female body. In contrast, the connection interface between the various modules consists of connectors printed directly on the fabric in 3D. In this case, the system is designed to allow for customised garment fitting thanks to a garment engineering process based on 3D scanning of the wearer's body (Fig. 12).

Garments deconstructed into modular geometric micro-units | Geometric modularity (Li, Chen and Wang, 2018) characterises garments based on repeated modular tessellation in which the modular unit is minimal in the form of a triangle, square, or hexagon whose interconnection is achieved employing textile interlocks that are integrated within the modules themselves through cuts and tabs. Based on a sectional modular approach, each modular element uses a standard set of interfaces to connect. The configurability of the modules is designed to create highly flexible planar or three-dimensional textile structures to form multiple garments for wear; in fact, the configurability in a specific garment is not predetermined but derives from the creative manipulation and structuring of the modular geometric micro-units.

The most commonly used materials in this approach are artificial fabrics, such as felt and neoprene, which do not tend to fray after cutting by laser technology and in which the interlocking and interconnecting interface system between the modules is particularly resistant to tensile stress and does not wear out easily as a result of frequent assembly and disassembly.

For this modular typology, an initial approach is provided by the Nomadic Wonderland project (Hur and Thomas, 2011), which uses the triangu-



lar module inscribed in a circle and from which the slots for the interconnection system between the modules are obtained. On the same theme, Chen and Lapolla (2021) developed modular units based on triangles and hexagons with more geometrically complex interfaces that can be realised by laser cutting; the latter allows for more excellent detailing but forces the use of artificial materials to limit post-cutting fraying (Fig. 13).

Further material explorations are carried out in the project Metabolism¹⁰ (2015) by Bolor Amgalan, whose textile materials of the modules were made ad hoc by glueing different layers together to obtain unconventional functional and aesthetic characteristics, combining comfort, aesthetics and structure; however, the modules made are more difficult to manage at the end of the product's life because they are difficult to separate. Fragment Textiles¹¹ (2009) uses a formally dual tessellation, square and star, intersecting based on mathematical and geometric principles, creating multiple formal and dimensional compositions.

Further formal explorations are collected in the Open Source Circular Fashion Catalogue¹² (n.d.), an archive platform of conceptual projects on geometric modularity and circularity that can be realised through additive and subtractive prototyping and manufacturing. About this, the combina-

tion of tasks that can only be done by machines, such as 3D printing, and those that can only be done by human hands, such as assembling the modular components, gives rise to a new type of clothing in Yuima Nakazato's AW 2017-18 Freedom¹³ (2017) collection.

The Japanese designer uses a digital mathematical approach to calculate the modular units required to construct the custom-made garment for each individual. While the single modular units are machine-cut, the three-dimensional garment is manually assembled through a 3D-printed connection system that requires insertion into fabric slots. This approach can produce different models, allowing different materials to coexist in the same garment (Fig. 14).

Finally, the modules can be obtained directly from 3D printing as in the projects of Danit Peleg¹⁴ (2015), Spahiu, Canaj and Shehi (2020) and Tufan Tolmaç and Ismal (2022), who exploit the limited size of the 3D printing plane of FDM technology and join the modules through the 3D printing pen or the heat of the soldering iron / iron, making the modules indivisible once assembled (Fig. 15). In contrast, Chen (2022) proposes a modular system with 3D printing and the shape of a six-petaled flower, whose slots function as a manual assembly and disassembly system.

Concluding remarks for modularity supported by creativity, technology and sustainability |

The result of the conducted analysis presents modular fashion as a strategic research and development tool in academia and small companies, lacking large-scale industrial diffusion. Barriers to the diffusion and scalability of modular fashion are identified in the necessary transformation of design and production processes, garment aesthetics, end-user use and consumption behaviour and companies' business models (Peter, n.d.). At the same time, the research reveals that new Industry 4.0 technologies can enhance production feasibility and interoperability between supply chain actors. In terms of environmental sustainability, modular fashion turns out to be a helpful strategy to make better use of textile resources and to prolong the lifespan of fabric and garment, improving the relationship between garments and users in order to develop an emotional attachment as opposed to the psychological obsolescence from which today's overconsumption derives (Chapman, 2009). Furthermore, by promoting prolonged interaction with the garment during use by replacing critical and worn components, multiple cycles of reuse are activated that enhance the garment's durability and care before, in the extreme case, it is recycled or landfilled (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

The analysed case studies show that disassembly and recyclability at the end-of-life are only possible through a judicious choice of mono-material textiles for individual modules. However, on the one hand, a connection interface between modules consisting of metal accessories (such as buttons and zips) makes the product reconfigurability processes more agile and faster. On the other hand, it creates a more complex management of the disassembly and recycling phase of the garment at the end-of-life, thus invalidating the circularity of the module and the textile. Where otherwise the assembly is manual and is left to the end user through kits to be self-assembled or through garments to be transformed, the modular connection interface system is more sustainable and circular; in these cases, it is necessary to limit the constructive complexity of the garments and guide the user in the assembly through tutorials that make the activity more pleasant for a non-expert, even when it is not necessary to use a sewing machine.

From the point of view of social sustainability, some of the cases analysed bring modularity back to a concept of inclusiveness and customisation of the garment: through the 'cut-to-fit', present in almost all the cases analysed, the modules become dimensionally modifiable elements in order to be adapted to the user's needs, either through the mathematical tessellation of the modules according to the anthropometric measurements of the individual or through a parametric redefinition of the measurements of the modular paper patterns.

Hence, in a dimension of social sustainability, modularity makes it possible to transform the garment concerning changes in one's body, eliminating the stigma linked to changing or not finding one's size or a garment that fits one's body correctly, but also concerning style, wearability, and further aesthetic choices. To implement modular design for mass customisation, however, it must be matched by consumer interest and supported by

a service system based on Industry 4.0 technologies, in particular Artificial Intelligence and Internet of Things, to ensure interoperability between the different actors in the supply chain, feasibility at the production and distribution level and scalability of the customisable modular offering (Bertola and Teunissen, 2018; Dan et alii, 2023).

Designing the modularity of a garment proves to be a system that benefits designers' creativity because it potentially allows for ever-changing shapes and styles that can be more easily updated and modified through diverse and flexible collections that are continuous over the years and seasons. However, the effective development of the modular approach requires a change in design attitude, both in strategic terms and concerning the tools used, as well as a progressive modification of the prototyping and production methods; this change also requires new distribution and sales strategies centred on local systems that facilitate a loyal relationship with the user and support his or her buying and wearing experience.

From a cultural sustainability point of view, this study shows the need for design to also deal with the after-sale design of a modular garment: it is necessary to design user interaction activities with the garment during its useful life through systems and services that ensure continuity and loyalty, but also participatory activities, instructional toolkits (Hur, 2015), activating services linking user and company that have currently only been developed at a conceptual level (Karrell, 2014; Dan et alii, 2023). In the future, there is a need to deploy strategies that can act on changing user behaviour when buying and using garments to educate a new consumer culture.

Although surveys on consumer opinion concerning modular fashion are few, respondents' interest shows appreciation for sustainability strategies such as reparability, customisation and styling, colour and usage transformability (Koo, Dunne and Bye, 2013; Niinimäki and Hassi, 2011); however, there is still a lack of scientific studies quantifying the benefits in terms of positive impact given by modular versus traditional garment production (Maldini and Balkenende, 2017). As survey findings, Rahman and Gong (2016) report comments on the aesthetics, practicality and complexity of managing the transformation of a modular garment; concerns include the modular concept being too new to users and the fear of high costs. Therefore, studies validating users' long-term attachment to a garment and confirming the correlation between modularity and reduced consumption and production volumes are needed to overcome these critical issues.

Another research perspective could be to explore new business models that could support fashion companies' adoption of this design and production approach. It is clear that the lack of development of modular systems in the sector also derives from companies' lack of interest in strategies that reduce consumption and economic return. Traditionally based on a linear system, the fashion industry tends to favour established practices rather than radically innovating the processes that determine the development, production and sale of a garment (Buchel et alii, 2018); however, at a theoretical level, modularity is a strategy that can build end-customer loyalty, generate new economies of scale while reducing waste and over-

production (Kusiak, 1999). The technologies of Industry 4.0 could contribute to this objective by simplifying, toward its feasibility, a modular design and production approach through the use of digital tools for faster and more precise prototyping and by optimising product lifecycle management (Bertola and Teunissen, 2018); at the same time, digital tools can contribute to the development of new businesses based on mass customisation, both taking into account the anthropometric measurements of users and their textile, colour, formal and stylistic choices, while RFID tags can be placed on modules to track the life of the product over time. The analysis of the state of the art confirms that there are no such practices but only study proposals and conceptual projects that focus on exploiting technologies with a view to modularity, interoperability and real-time data exchange to promote modularity design in fashion (Dan et alii, 2023).

Modular garments developed, prototyped and produced employing 3D printing present advantages and disadvantages. 3D-printed modular elements have greater strength and durability but also a worse fit, still need to catch up to the parameters of comfort, breathability and lightness achieved in traditional fabrics (Chen, 2020). Laser cutting is historically the technology that has supported most modular designs based on variable geometries with micro-units that can be assembled by precision cutting from even complex digital designs. However, laser cutting has limitations because the fabrics that are cut raw without the use of seams are artificial fabrics and non-wovens that do not fray after cutting, washing and numerous manipulations. In the case where two fabrics are glued together in order to achieve greater comfort and finishing of the contours resulting from the cut, there is, unfortunately, a critical issue regarding the circularity at the end of the product's life, which becomes unmanageable concerning disassembly and recyclability.

Fashion has an important role in today's society not only for the production of garments and their impact and management at the end of their life but also for the cultural and social dynamics it influences: a garment is not only made up of a weave of threads but influences multiple economic, ethical, cultural and environmental factors. With this in mind, it is necessary to deepen multidisciplinary studies concerning the feasibility and scalability of modularity in the fashion industry by exploring new business models based on the use of Industry 4.0 technologies and a design-led approach focusing on the product, the service but also the interaction of the user with the product during use.

Notes

- 1) For more information on Garratt (2016), see the webpage: sandragarratt.com/modboxmodulars/modboxlinelist.html [Accessed 12 October 2023].
- 2) For more information on Omdanne (2016), see the webpage: solve.studio/omdanne [Accessed 12 October 2023].
- 3) For more information on Edit+ (2020), see the webpage: editplusmall.com/ [Accessed 12 October 2023].
- 4) For more information on Flavia La Rocca (2016), see the webpage: flavialarocca.com/en/content/12-the-story [Accessed 12 October 2023].
- 5) For more information on The Post-Couture Collective (2015), see the webpage: artsandculture.google.com/asset/the-post-couture-collective-the-post-couture-collective/9wFYQHnn-y5Zvw?hl=en [Accessed 9 September 2023].
- 6) For more information on Self-Assembly (2022), see the webpage: self-assembly.fi/ [Accessed 12 October 2023].
- 7) For more information on Almboreal (2021), see the webpage: almboreal.com/ [Accessed 12 October 2023].
- 8) For more information on Anrealage (2020), see the webpage: anrealage.com/collection [Accessed 12 October 2023].
- 9) For more information on Arid (2021), see the webpage: juliakoerner.com/aridcollection [Accessed 12 October 2023].
- 10) For more information on Metabolism (2015), see the webpage: boloramgala.com/metabolism-ss15 [Accessed 12 October 2023].
- 11) For more information on Fragment Textiles (2009), see the webpage: refinity.eu/fragment-textiles.html [Accessed 12 October 2023].
- 12) For more information on the Circular Fashion Catalogue (n.d.), see the webpage: oscircularfashion.com/catalogue/all [Accessed 12 October 2023].
- 13) For more information on Freedom (2017), see the webpage: yuimanakazato.com/collection/couture_aw2017-18.html [Accessed 12 October 2023].
- 14) For more information on Danit Peleg (2015), see the webpage: danitpeleg.teachable.com/ [Accessed 12 October 2023].

References

- Ballie, J. and Woods, M. (2018), "Circular by Design – A model for engaging fashion/textile SMEs with strategies for designed reuse", in Crocker, R., Saint, C., Chen, G. and Tong, Y. (eds), *Unmaking Waste in Production and Consumption – Towards the Circular Economy*, Emerald Publishing Limited, Bingley, pp. 103-121. [Online] Available at: doi.org/10.1108/978-1-78714-619-820181010 [Accessed 12 October 2023].
- Bertola, P. and Teunissen, J. (2018), "Fashion 4.0 – Innovating fashion industry through digital transformation", in *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 22, issue 4, pp. 352-369. [Online] Available at: doi.org/10.1108/rjta-03-2018-0023 [Accessed 12 October 2023].
- Bonvoisin, J., Halstenberg, F., Buchert, T. and Stark, R. (2016), "A systematic literature review on modular product design", in *Journal of Engineering Design*, vol. 27, issue 7, pp. 488-514. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09544828.2016.1166482 [Accessed 12 October 2023].
- Buchel, S., Roorda, C., Schipper, K. and Loorbach, D. (2018), *Drift for transition – The transition to good fashion*. [Online] Available at: drift.eur.nl/wp-content/uploads/2018/11/FINAL_report.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Brown, S. and Vacca, F. (2022), "Cultural sustainability in fashion – Reflections on craft and sustainable development models", in *Sustainability | Science, Practice and Policy*, vol. 18, issue 1, pp. 590-600. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15487733.2022.2100102 [Accessed 12 October 2023].
- Chapman, J. (2009), "Design for (Emotional) Durability", in *Design Issues*, vol. 25, n. 4, pp. 29-35. [Online] Available at: jstor.org/stable/20627827 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. (2022), "Modular Illusion", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 79, issue 1, pp. 1-5. [Online] Available at: doi.org/10.31274/itaa.16013 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. (2020), "Vanishing Ice", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 77, issue 1, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.31274/itaa.11743 [Accessed 12 October 2023].
- Chen, C. and Lapolla, K. (2021), "The Exploration of Geometric Modular System in Textile and Apparel Design", in *Clothing and Textiles Research Journal*, vol. 39, issue 1, pp. 39-54. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0887302X20937 [Accessed 12 October 2023].
- Cramer, J. (2014), "Wear, repair and remake – The evolution of fashion practice by design", in *Shapeshifting Conference, Auckland University of Technology, 14-16 April 2014*, Textile and Design Lab and Colab at Auckland University of Technology, Auckland (New Zealand), pp. 1-18. [Online] Available at: core.ac.uk/reader/56365031 [Accessed 12 October 2023].
- Dan, M. C., Ciorte, A. and Mayer, S. (2023), "The re-fashion circular design strategy – Changing the way we design and manufacture clothes", in *Design Studies*, vol. 88, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2023.101205 [Accessed 12 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2017), *A new textiles economy – Redesigning fashion's future*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy [Accessed 12 October 2023].
- Ellen MacArthur Foundation (2013), *Towards the Circular Economy – An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition – Vol. 1*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an [Accessed 12 October 2023].
- Fletcher, K. (2014), *Sustainable Fashion and Textiles – Design Journeys*, Routledge, New York.
- Gustafsson, J. (2017), *Single case studies vs. multiple case studies – A comparative study*, pp. 1-15. [Online] Available at: diva-portal.org/smash/get/diva2:1064378/FULLTEXT01.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Gwilt, A. (2014), *A Practical Guide to Sustainable Fashion*, Bloomsbury Publishing Plc, London.
- Hur, E. (2015), "Sustainable Fashion and Textiles through Participatory Design – A case study of modular textile design", in *The Journal of the Korean Society of Knit Design*, vol. 13, issue 3, pp. 100-109. [Online] Available at: researchgate.net/publication/304257277_Sustainable_Fashion_and_Textiles_through_Participatory_Design_A_case_study_of_modular_textile_design [Accessed 12 October 2023].
- Hur, E. S. and Thomas, B. G. (2011), "Transformative Modular Textile Design", in *Bridges Coimbra – Mathematical Connections in Art, Music and Science*, Tarquin Publications, pp. 217-224. [Online] Available at: wiki.textile-academy.org/_media/bootcamp2017paris/bridges2011-217.pdf [Accessed 12 October 2023].
- Karrel, E. (2014), *Planned Continuity – Design of sustainable clothing service concept*, Master Thesis, Aalto University Department of Design. [Online] Available at: research.aalto.fi/en/publications/planned-continuity-design-of-sustainable-clothing-service-concept [Accessed 12 October 2023].
- Kasper, M. and Stroomer, E. (2021), "Moltiplicare le vite dei tessuti – Raccolta e riciclo dei tessuti nell'Africa urbanizzata | Multiplying textile lives – Textile collection and recycling in urban Africa", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 9, pp. 224-231. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9222021 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S. (2012), *Design Functions in Transformable Garments for Sustainability*, Doctoral Thesis, University of Minnesota. [Online] Available at: conservancy.umn.edu/handle/11299/133808 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S., Dunne, L. and Bye, E. (2014), "Design functions in transformable garments for sustainability", in *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 7, issue 1, pp. 10-20. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17543266.2013.845250 [Accessed 12 October 2023].
- Koo, H. S., Dunne, L. and Bye, E. (2013), "Design Functions in Transformable Garments for Sustainability", in *International Textile and Apparel Association | Annual Conference Proceedings*, vol. 70, issue 1, pp. 38-39. [Online] Available at: iastatedigitalpress.com/itaa/article/id/1977/ [Accessed 12 October 2023].
- Kusiak, A. (1999), *Engineering Design – Products, Processes, and Systems*, Academic Press, Cambridge.
- Lee, H., Tufail, M. and Kim, K. (2016), "Difficulties in Transformable Design and its Causes", in Marjanovic, D., Storga, M., Pavkovic, N., Bojetic, N. and Skec S. (eds), *DS 84 | Proceedings of the Design 2016 14th International Design Conference*, pp. 2147-2156. [Online] Available at: design-society.org/publication/39023/DIFFICULTIES+IN+TRANSFORMABLE+DESIGN+AND+ITS+CAUSES [Accessed 12 October 2023].
- Li, M.-M., Chen, Y. and Wang, Y. (2018), "Modular design in fashion industry", in *Journal of Arts & Humanities*, vol. 7, issue 3, pp. 27-32. [Online] Available at: dx.doi.org/10.18533/journal.v7i3.1271 [Accessed 12 October 2023].
- Maldini, I. and Balkenende, A. R. (2017), "Reducing clothing production volumes by design – A critical review of sustainable fashion strategies", in Bakker, C. and Mugge, R. (eds), *Product Lifetimes and The Environment 2017 – Conference Proceedings, Delft University of Technology, 8-10 November 2017*, Delft University of Technology and IOS Press, pp. 233-237. [Online] Available at: doi.org/10.3233/978-1-61499-820-4-233 [Accessed 12 October 2023].
- McLaren, A., Goworek, H., Cooper, T., Oxborrow, L. and Hill, H. (2016), "The effect of consumer attitudes on design for product Longevity – The case of the fashion industry", in Lloyd, P. and Bohemia, E. (eds), *Future Focused Thinking – DRS International Conference 2016, Brighton (UK), June 27-30, 2016*, vol. 10, pp. 3831-3845. [Online] Available at: doi.org/10.21606/drs.2016.456 [Accessed 12 October 2023].
- Meyer, M. H. and Lehnerd, A. P. (1997), *The power of product platform – Building value and cost leadership*, Free Press, New York.
- Nadasbas, S. and Cileroglu, B. (2017), "Innovative approaches on modular apparel design", in *Global Journal of Arts Education*, vol. 7, issue 3, pp. 73-82. [Online] Available at: doi.org/10.18844/gjae.v7i3.2974 [Accessed 12 October 2023].
- Niinimäki, K. and Hassi, L. (2011), "Emerging design strategies in sustainable production and consumption of textiles and clothing", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, issue 16, pp. 1876-1883. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.020 [Accessed 12 October 2023].
- Peter, J. (n.d.), "Transformable Fashion – The Biggest Sustainable Clothing Trend That Never Was", in *Fashion Studies Journal*. [Online] Available at: fashionstudiesjournal.org/longform/2018/9/15/transformable-fashion [Accessed 12 October 2023].
- Rahman, O. and Gong, M. (2016), "Sustainable practices and transformable fashion design – Chinese professional and consumer perspectives", in *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 9, issue 3, pp. 233-247. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17543266.2016.1167256 [Accessed 12 October 2023].
- Spahiu, T., Canaj, E. and Shehi, E. (2020), "3D printing for clothing production", in *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1558925020948216 [Accessed 12 October 2023].
- Tseng, M. M. and Wang, C. (2014), "Modular Design", in Laperrière, L. and Reinhart, G. (eds), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 895-897. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6460 [Accessed 12 October 2023].
- Tufan Tolmaç, N. and İşmal, Ö. E. (2023), "A new era – 3D printing as an aesthetic language and creative tool in fashion and textile design", in *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. [Online] Available at: doi.org/10.1108/RJTA-05-2022-0058 [Accessed 12 October 2023].
- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D. and Yang, M. C. (1995), *Product design and development*, McGraw Hill, New York.
- Watt, J. (2012), *Fashion – The Ultimate Book of Costume and Style*, Dorling Kindersley.
- Yin, R. K. (2014), *Case Study Research Design and Methods*, Sage, Thousand Oaks (CA).

Printed in December 2023
by FOTOGRAF s.r.l.
viale delle Alpi n. 59 | 90144 Palermo | Italy