

ARTICLE INFO

Received 10 September 2023
Revised 04 October 2023
Accepted 18 October 2023
Published 31 December 2023

DESIGN LITICO E MANIFATTURA ADDITIVA

Un connubio possibile per l'economia circolare

LITHIC DESIGN AND ADDITIVE MANUFACTURING

A feasible partnership for the circular economy

Katia Gasparini

ABSTRACT

Il contributo riporta gli esiti di una ricerca il cui obiettivo è esplicitare il valore e il ruolo delle tecnologie emergenti nell'architettura e nel design, con particolare riferimento alla manifattura additiva e alla tecnologia multimateriale per la produzione di componenti modulari e sostenibili mediante il riciclo dei rifiuti della pietra. Le ricerche nei settori dell'architettura, dell'ingegneria dei materiali e dell'ambiente sono state messe a confronto con le sperimentazioni condotte nella realizzazione di prodotti con materiale di origine lapidea, realizzati con tecnologie di manifattura additiva e con la più tradizionale manifattura sottrattiva. Le potenzialità della manifattura additiva tramite il recupero di scarti lapidei si esplicitano in prodotti e componenti visivamente e funzionalmente innovativi, poliedrici e ambientalmente compatibili.

This paper presents the results of a research aimed at elucidating the value and role of emerging technologies in architecture and design, with a particular focus on additive manufacturing and multi-material technology for the production of modular and sustainable components through the recycling of stone waste. Research in the fields of architecture, materials engineering, and the environment has been compared with experiments conducted in creating products using stone-derived material manufactured through both additive and traditional subtractive processes. The potential of additive manufacturing through the recovery of stone waste is evident in visually and functionally innovative, versatile, and environmentally friendly products and components.

KEYWORDS

tecnologia multi-materiale, design litico, scarti lapidei, manifattura additiva, stampa 3D

multi-material technology, lithic design, stone waste, additive manufacturing, 3D printing



Katia Gasparini is an Architect with a PhD, currently working as a Researcher at the Department of Architecture, Design and Urban Planning, University of Sassari (Italy). She carries out research activities mainly in the fields of technological innovation (hyper-technological facades) and environmental enhancement. Research outcomes are published in monographs and articles. E-mail: kgasparini@uniss.it

I cambiamenti climatici e taluni eventi naturali catastrofici che si sono verificati nell'ultimo ventennio hanno contribuito alla diffusione di una maggiore sensibilità ambientale, soprattutto rispetto allo sfruttamento delle risorse naturali che dalla prima Rivoluzione Industriale erano considerate pressoché illimitate. I settori economici più critici in tal senso sono quelli delle costruzioni e delle attività estrattive, che complessivamente producono il 65% dei rifiuti a scala europea (EEA, 2023). Tuttavia dopo gli anni del boom economico e le prime crisi energetiche si è sviluppata una maggiore coscienza rispetto alla limitata disponibilità delle risorse naturali, da un lato riscontrando l'incompatibilità tra le attività estrattive e la qualità ambientale (Monsù Scolaro, 2017), dall'altro con la produzione di manufatti che impiegano materiale di scarto (Baratta et alii, 2023) o a base biologica (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021).

In questo scenario si concretizza la necessità di un rinnovamento progettuale e produttivo volto al reintegro del materiale di scarto nel ciclo produttivo (Baratta, 2021) in un'ottica di flessibilità e personalizzazione del prodotto; per raggiungere l'obiettivo anche nel settore lapideo è auspicabile lo sviluppo della produzione di componenti edilizi da sfrido in una prospettiva di circolarità (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019). Questo approccio condurrebbe in prima battuta a una drastica riduzione di residui e informi in cave e discariche e, con un cambiamento di paradigma progettuale, alla riduzione e al controllo dell'attività estrattiva. La digitalizzazione della progettazione e della produzione oggi può altresì incrementare la progettazione di sistemi e processi veloci ed economici per la produzione di componenti edilizi, sistemi costruttivi e architetture a basso impatto ambientale, focalizzate sugli specifici bisogni dei singoli utenti (Weinstein, 2020).

Obiettivo della ricerca presentata nell'articolo è esplorare nuove strategie produttive di simbiosi industriale per il riutilizzo degli scarti di cava, finalizzati alla produzione di componenti per l'edilizia secondo i principi di sostenibilità, resilienza e human-centric design sanciti dall'Unione Europea (European Commission et alii, 2021). Il contributo indaga le potenzialità di un processo produttivo alternativo e complementare alla manifattura sottrattiva per i materiali lapidei, al fine di ridurre l'impatto ambientale derivante dallo sfruttamento delle cave e riutilizzare interamente gli scarti sia in estrazione che in lavorazione.

Per una valutazione oggettiva sarà analizzato un progetto realizzato sia con Manifattura Sottrattiva (MS) che con Manifattura Additiva (MA), per comparare i dati di produzione in termini temporali, ambientali e formali. Il potenziale della MA per la realizzazione di componenti e prodotti personalizzati potrebbe soddisfare le esigenze ambientali e produttive contemporanee in modo economico e senza sprechi; in particolare la produzione di componenti da polvere lapidea con il metodo della stampa 3D può consentire il riutilizzo del 100% degli scarti, con una importante flessibilità in termini di forma, funzione e circolarità.

L'articolo è strutturato in tre parti: la prima mette in connessione il contesto culturale e produttivo all'interno del quale si colloca la ricerca; la seconda analizza lo stato dell'arte in merito all'impiego della MA nel settore delle costruzioni; la terza descrive gli esiti di un lavoro di ricerca e sviluppo per

la realizzazione di alcuni componenti in materiale lapideo da scavo e da riciclo tramite MS e MA. In particolare, per l'analisi dello stato dell'arte, sono state esaminate ricerche in corso e pubblicate sull'impiego della MA in architettura per la realizzazione di moduli abitativi con materiali e tecnologie di stampa 3D.

È stata quindi approfondita la tecnologia Binder Jetting (BJ) con polvere lapidea da riciclo. Il caso studio è stato realizzato all'interno di una collaborazione di ricerca e sviluppo fra tre realtà diverse: l'azienda Desamanera srl, produttrice di stampanti 3D di grandi dimensioni (in collaborazione con Università degli Studi di Padova) per il modello realizzato con tecnologia BJ; l'Accademia di Belle Arti di Verona¹ per la parte progettuale; la Scuola del Marmo di Verona per la produzione dello stesso elemento con MS. Il metodo di lavoro e analisi si è basato sull'osservazione empirica di dati e risultati che forniscono un indicatore rispetto alle potenzialità della tecnologia BJ in architettura e design, ma i test dovranno essere approfonditi e perfezionati su casi studio di dimensioni diverse.

Il contesto culturale e produttivo | Da quando la progettazione parametrica e la stampa 3D di grande formato sono entrati prepotentemente in tutti i settori, compreso quello delle costruzioni, si sono ampliate drasticamente le variabili formali e la portata di ciò che si può costruire, riducendo il tempo e gli errori dovuti al passaggio di informazioni (Sposito and Scalisi, 2017). Da alcuni anni assistiamo alla realizzazione di moduli abitativi prodotti con la tecnica della manifattura additiva, mentre inizialmente si producevano componenti modulari di piccole dimensioni, riproducibili in poco tempo e con materiali di sintesi. Con il perfezionamento della tecnologia sono aumentate le dimensioni delle macchine e si sono moltiplicati i materiali utilizzabili, passando dai materiali di sintesi alle miscele di materiali naturali come le terre, le polveri di marmo e le miscele di sale; contestualmente sono aumentate anche le dimensioni dei moduli, divenuti vere e proprie cellule abitative.

Di fatto oggi la MA può essere applicata al settore delle costruzioni in due modi: per produrre componenti modulari da assemblare in strutture più grandi o per stampare interi moduli abitativi (Sposito and Scalisi, 2017). In questo contesto, nel binomio progettazione parametrica / stampa 3D dei componenti, il concetto di 'modulo' assume una duplice valenza: non è solo un componente riproducibile, ma è anche un codice di comunicazione uomo-macchina, dove algoritmi ripetuti (per esempio i frattali) consentono la realizzazione, strato dopo strato, di oggetti tridimensionali dalle forme e texture più disparate.

Nel passaggio al digitale la progettazione è entrata in una dimensione in cui la geometria delle forme è generata da un modello matematico, basato su 'parametri': una semplice ripetizione, che utilizza regole storicamente note come Fibonacci e simili (Jabi, 2013). Il concetto di progettazione parametrica nasce nel secolo scorso e si riconduce agli studi di Luigi Moretti (1974a, 1974b) e Bruno De Finetti, Frei Otto e più recentemente in Zaha Hadid, Gregg Lynn, ONL e altri (Premier, 2017).

Con 60 anni di anticipo rispetto le attuali istanze progettuali, Moretti ha affrontato i temi legati alla forma e ai suoi processi generativi introdu-

endo il concetto di 'modellazione matematica', antesignano della progettazione parametrica. Nel 1957 Moretti ha infatti fondato, insieme a Bruno De Finetti, l'Istituto per la Ricerca Matematica e operativa applicata all'Urbanistica (IRMoU), con il fine dichiarato di portare avanti gli studi sulla cosiddetta 'architettura parametrica' (Esposito De Vita, 2009). Il progetto, inteso come risultante di processi generativi che da Moretti si sono via via perfezionati digitalmente è quindi concepito come risultante di equilibri sistemici aperti verso il futuro (Ciribini, 1984).

Anche il lavoro di Frei Otto, considerato il padre delle tensostrutture, è stato influenzato dalla osservazione e imitazione delle strutture naturali; egli progettò strutture organiche grazie all'osservazione dei processi evolutivi che avvengono in natura e che trovano riscontro nei modelli matematici basati su parametri. In epoca più recente, Zaha Hadid è stata riconosciuta come interprete dell'architettura parametrica che ha saputo concretizzare in architetture dalle forme sia fluide che decostruite, mettendo a sistema la formazione accademica in matematica e quella in architettura. Nel XXI secolo lo sviluppo degli strumenti informatici ha quindi trasformato il progetto in un sistema complesso di interazioni e di aggregazioni successive di moduli tridimensionali geometrici che si uniscono formando strutture spaziali (Marcolli, 1978), fornendo ai progettisti gli strumenti per simulare la complessità osservata in natura e applicarla a scale diverse, contribuendo 'dal cucchiaino alla città, all'edificazione di una nuova cultura'² (Lidinger, 1986; Erhoff, 1986).

Lo sviluppo parallelo delle tecnologie di stampa tridimensionale dell'ultimo ventennio ha dato un ulteriore impulso all'applicazione della progettazione parametrica, consentendo la realizzazione di moduli dalle forme fluide e complesse che con i sistemi costruttivi tradizionali richiederebbero tempi e costi di realizzazione notevoli; ciò ha favorito la sperimentazione di nuovi materiali di derivazione artificiale e naturale, ad esempio biomateriali e materiali da riciclo come gli scarti di cava.

La ricerca e introduzione di materiali alternativi e ad alto grado di innovazione anche nel settore lapideo è stata spinta negli ultimi anni da alcuni fattori determinanti: dalla riduzione delle risorse naturali alla maggiore sensibilità ambientale rispetto allo sfruttamento delle cave di pietra, fino all'aumento dei costi della materia prima. I processi estrattivi e produttivi che fino ad oggi hanno caratterizzato i prodotti lapidei presentano ancora un'alta percentuale di sfridi e informi, che per talune pietre è ragguardevole e ha ricadute ambientali importanti, sia sullo sfruttamento dei siti naturali che sullo smaltimento degli stessi.

Dai report sull'industria lapidea mondiale (Tab. 1) emerge che la produzione lorda di cava è più che raddoppiata in 15 anni (2003-2018) raggiungendo 313.000 tonnellate nel 2018; parimenti, al netto da scarti di estrazione e lavorazione, il totale netto lavorato e finito di prodotti di lapideo si è attestato a circa 90.000 tonnellate nel 2018. Per la precisione, ben il 71% del materiale si trasforma in scarto, in due fasi distinte: lo sfrido di estrazione costituisce il 51% mentre lo sfrido di lavorazione costituisce il 41% sulla quantità di produzione grezza (Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017). Nella Tabella 1 si evidenzia che in 15 anni la proporzione fra scavo e sfrido si

Year	Gross Quarrying	Quarrying Waste	Raw Production	Processing Waste	Processed Production
2003	153,750	78,750	75,000	30,750	44,250
2004	166,500	85,250	81,250	33,300	47,950
2005	174,750	89,500	85,250	34,950	50,300
2006	190,250	87,500	92,750	38,000	54,750
2007	212,000	108,500	103,500	42,500	61,000
2008	215,000	110,000	105,000	43,000	62,000
2009	213,750	100,250	104,500	42,850	61,650
2010	228,000	116,500	111,500	45,715	65,785
2011	237,200	121,200	116,000	47,560	68,440
2012	252,500	129,000	123,500	50,630	72,870
2013	265,800	135,800	130,000	53,300	76,700
2014	279,000	142,400	136,500	56,000	80,500
2015	286,200	146,200	140,000	57,400	82,600
2016	296,400	151,400	145,000	59,400	85,600
2017	310,700	158,700	152,000	62,300	89,700
2018	313,000	160,000	153,000	62,750	90,250

Tab. 1 | World Stone Industry: net production and waste ratio (tons data); waste materials destined for granules, powders and similar uses are included (credits: Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017).

Project	Year	Materials	Technology	Dimensions (m)	Days Hours
Tecla	2019	Raw local land, straw and rice	L.D.M	6.6 x 3.0	25 days 200 h
Future Pavilion	2016	Concrete, fiberglass, fiber-reinforced polymers	F.D.M.	36.0 x 6.0	17 days
EU Pavilion	2015	Biopolymers	F.D.M.	2.0 x 2.0 x 3.5	
Saltygloo	2013	Salt, polymers	F.D.M.		
Radiolaria Pavilion	2009	Sand or mineral powder, liquid binder	B.J.	3.0 x 3.0 x 3.0	

Tab. 2 | Case studies comparison.

è mantenuta costante, quindi è presumibile che non siano state attuate politiche ambientali e produttive che prevedano l'introduzione di nuove tecnologie di estrazione e lavorazione, in sinergia con strategie progettuali volte a minimizzare lo scarto. Ad oggi il processo produttivo prevalente nel settore lapideo è legato alla manifattura sottrattiva del CNC, una tecnica 'scultorea' che rimuove il materiale da un blocco di pietra e che ha contribuito a realizzare molti progetti complessi (Turunen, 2016). Tuttavia tale tecnica ha dei limiti legati all'aspetto formale dei prodotti (difficoltà a produrre forme cave e complesse) e alla produzione di una alta percentuale di sfrido. Le

attività di ricerca e sviluppo degli ultimi 15 anni negli ambiti del digitale e dell'ingegneria dei materiali hanno contribuito alla progressiva integrazione di alcuni processi MA anche nell'architettura e nel design.

Diversamente dalla MS la MA non spreca materiale e già da molti anni è utilizzata nel settore meccanico e del design di prodotto con diverse tecniche: se Fused Filament Fabrication (FFF), stereolitografia e bracci robotici sono le tecniche di produzione additiva più comuni quando sono stampati oggetti legati all'architettura su larga scala³, il Binder Jetting (BJ) prevale nel comparto dei ceramici, mentre Direct Ink Writing (DIW), Liquid De-

position Modelling (LDM), Fused Deposition Modeling (FDM), Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), il Digital Light Processing (DLP), ecc. sono applicati a diversi tipi di materiali (Gobbin et alii, 2021). L'introduzione di alcuni di questi processi anche nel settore lapideo, consentirebbe un totale recupero degli scarti di cava tramite un processo di stampa flessibile e adattivo.

La stampa 3D in Architettura | Le più recenti sperimentazioni nel settore delle costruzioni spaziano dalla stampa sul sito dell'intero modulo (Russo and Moretti, 2020) all'assemblaggio di componenti prodotti in stabilimento, con deposizione di strati di miscele cementizie, calcestruzzo, terra cruda, materiali di sintesi, ecc. (Tab. 2). Fra le realizzazioni più note il modulo abitativo TECLA⁴, progettato da Mario Cucinella (Figg. 1, 2): è stato realizzato nel 2019 con un impasto a base di terra cruda e prodotto con tecnologia digitale (Crane di Wasp) tramite una stampante assemblabile in diverse configurazioni. Un singolo modulo, dal diametro di 6,60 metri e altezza di 3 metri, può essere realizzato con impasti di cemento, biocemento e terra / argilla. La realizzazione di un modulo TECLA ha impiegato 200 ore di stampa, 7.000 codici macchina (G-code), 350 strati di 12 mm di materiale, 150 km di estrusione, 60 mc di materiali naturali per un consumo medio inferiore di 6 kW, altamente innovativo non solo nel processo produttivo, ma anche nella concezione strutturale.

Altre sperimentazioni recenti con la medesima tecnologia hanno prodotto moduli in calcestruzzo che possono essere assemblati in cantiere. Tra queste il prototipo che è stato costruito nel 2021 da una collaborazione fra la Eindhoven University, la Municipalità e imprese di costruzioni (Jongsma, 2021). Nel 2016 invece Killa Design ha progettato a Dubai un edificio stampato in 3D⁵ alto 6 metri e lungo 36 producendolo in 17 giorni, attraverso un braccio robotico automatizzato e installandolo in 2 giorni. La miscela di materiale utilizzato è composta di cemento, fibra di vetro e polimeri fibrorinforzati⁶, il costo della manodopera è stato ridotto del 50% rispetto agli edifici costruiti con tecnologie convenzionali e di dimensioni simili e gli sprechi in loco sono stati minimi, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale complessivo del progetto.

Le criticità che emergono in questi moduli, indipendentemente dal materiale, sono legate alle prestazioni energetiche e all'aspetto. Sono da indagare quindi i requisiti legati al contenimento dei consumi energetici in termini di involucro e la texture superficiale che, per caratteristiche intrinseche della stampa 3D, mantiene visibile la lettura degli strati di deposizione delle miscele e una finitura apparentemente grezza.

Esistono poi altre sperimentazioni di moduli stampati per FDM con materiale polimerico, di riciclo e bio-polimeri, come i moduli del Padiglione Europe Building⁷ di DUS Architects ad Amsterdam, realizzati nel 2015 (Fig. 3) i cui elementi modulari (della dimensione fino a 2 x 2 x 3,5 metri) in bio-polimero sono stati completamente riciclati dopo la dismissione (Gasparini, 2017). Non meno interessante è l'esperimento chiamato Saltygloo (2013; Figg. 4, 5), che utilizza sale raccolto localmente dalla Baia di San Francisco miscelato con un legante di sintesi (colla) per dare vita a un materiale resistente, impermeabile, leggero, traslucido ed economico. Il modulo abitativo è composto da 336

pannelli traslucidi, ognuno dei quali ricorda la forma cristallina del sale, assemblati con rotazioni e aggregazioni apparentemente casuali e collegati tra loro da aste di alluminio tensoflesse, che rendono la struttura estremamente leggera, trasportabile e assemblabile; la traslucenza del materiale consente alla luce naturale di permeare lo spazio e mettere in evidenza la struttura (Mattioli, 2014).

È da rilevare tuttavia che se le potenzialità di queste sperimentazioni risiedono nell'impiego di materiale da riciclo, la composizione multimaterica delle miscele (a base di bioplastiche o argilla o sale) solleva qualche dubbio sulla separabilità delle materie prime e sul loro riciclo, soprattutto per il modulo Saltygloo che utilizza la colla come matrice.

Infine risale al 2009 il primo esperimento di stampa di miscele di polveri tramite tecnologia BJ. Radiolaria Pavilion sviluppato da Shiro Studio con D-Shape è una microarchitettura che impiega una miscela di stampa composta da un materiale inorganico, sabbia o polvere minerale e un legante in forma liquida, conferendo al prodotto finale compattezza e un effetto simil lapideo (Turner, 2009): nonostante la sperimentazione non abbia avuto sviluppi ulteriori, di recente è stata ripresa da gruppi di ricerca e produttori di stampanti 3D di grandi dimensioni. Questi sistemi di stampa e miscele in via di sperimentazione riescono a esprimere al meglio le loro potenzialità nella produzione di elementi scultorei e di arredo anche di notevoli dimensioni, oppure in moduli replicabili a scale e quantità diverse, senza necessariamente svilupparsi lungo una filiera industrializzata.

La stampa multimateriale con gli scarti di cava

La stampa multimateriale (Multi Material Additive Manufacturing – MMAM) è un processo produttivo emergente legato alla tecnica della MA che consiste nella formulazione di miscele di polvere di due o più materiali, aventi proprietà diverse, da utilizzare in un processo additivo (stampa su 'letto di polvere') per realizzare oggetti e componenti in materiale composito (Pajonk et alii, 2022; Lowke et alii, 2018). Durante il processo di stampa un fluido (attivatore) è depositato selettivamente sulla miscela composta da aggregati e legante (sabbia o polvere lapidea e cemento); a reazione avvenuta, le 'polveri' solidificheranno dando luogo alla forma prestabilita del componente (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

La MA che utilizza le miscele di polveri potrebbe fornire un interessante apporto al settore lapideo, se utilizzata in affiancamento alla manifattura sottrattiva, per il recupero sia degli scarti di cava che di lavorazione. I vantaggi maggiori della MA risiedono nella possibilità di creare geometrie complesse, nel risparmio di tempo attraverso iterazioni rapide e la riduzione dei tempi di consegna, nella capacità di produrre oggetti personalizzati di massa (Pajonk et alii, 2022), nonché nel risparmio sui costi e sui consumi energetici (Horvath, Trachte and Pardoen, 2021). I principi della produzione di componenti in pietra artificiale tramite MA si basano sulla costruzione della geometria strato per strato in un processo di produzione sequenziale reso possibile dalla generazione di un modello con un software parametrico (Turunen, 2016).

A tal proposito Lowke et alii (2018) individuano tre tipi di processi a letto di polvere (particle-bed): Selective Binder Activation, in cui la miscela di polveri è costituita da un aggregato fine e da

un legante, ad esempio sabbia e cemento, a cui viene aggiunto selettivamente un attivatore liquido, come acqua con additivi; Selective Paste Intrusion, in cui il letto di particelle contiene solo l'aggregato e il fluido depositato selettivamente è una pasta legante costituita da cemento, acqua e additivi; Binder Jetting, in cui il letto di particelle è una miscela di aggregato e attivatore su cui viene applicato selettivamente un legante liquido.

In particolare la tecnologia BJ consente la produzione di componenti non strutturali in pietra artificiale anche per bassi volumi di produzione e con complessità geometrica elevata, possibilità non sempre attuabile con la MS. La scelta della tecnologia MA più idonea dipende da molti fattori: il tipo di materiale, le sue proprietà, i vincoli di progettazione e la complessità della forma, tutte funzioni di un approccio, quello del Design for Additive Manufacturing, che mira a progettare specificatamente una parte o un prodotto per una facile fabbricazione (Wiberg, Persson and Ölvander, 2019).

Negli ultimi anni le miscele di polveri di derivazione lapidea utilizzate con la tecnologia BJ sono state sempre più perfezionate, raggiungendo prestazioni meccaniche interessanti, in termini di resistenza a compressione, porosità e lavorazioni post-produzione. Durante il processo la stampante deposita a strati alterni le polveri della miscela lapidea e il fluido attivatore su aree definite dal modello digitale 3D dell'oggetto; alla fine del processo la polvere di risulta viene rimossa e conservata per il riutilizzo; l'aggregato non reattivo utilizzato è composto da sabbia di fiume e una formulazione di particelle di vetro poroso (Gobbin et alii, 2021). Recenti formulazioni della miscela hanno prodotto un netto miglioramento delle prestazioni meccaniche rispetto i primi esperimenti, ottenendo una resistenza compressione di 20 Mpa, con una porosità media del 30% (Elsayed et alii, 2022).

Il progetto della seduta Arcadia con manifattura additiva e sottrattiva

La seduta da esterni Arcadia (Fig. 6), presentata all'evento Marmomac Verona 2021, è composta da due elementi il cui progetto è stato sviluppato con il software Rhino+Lumion, modellatore parametrico utile per la fabbricazione digitale di due prototipi con tecnologia MA e MS. La prima versione del prototipo, realizzata con tecnologia BJ⁸, è stata prodotta con la Desam1 150.150 della Desamanera Srl il cui volume di stampa è pari a 1,5 x 1,4 x 1,4 mc e la 'cubic voxel resolution' è pari 5,7 x 5,7 x 5,7 mmc (Fig. 7). Il file '.stl' generato dal modellatore è stato elaborato tramite un software di slicing proprietario di Desamanera⁹ utilizzando un voxel isotropico di 5,7 x 5,7 x 5,7 mmc. Il processo di produzione complessivo è simile a quelli descritti in Gobbin et alii (2021) e in Elsayed et alii (2022). La miscela di polveri utilizzata, che può essere composta da diversi aggregati e leganti, nel progetto in esame (Tab. 3) era composta per il 67% da un aggregato lapideo ricavato da scarti di cava polverizzati (Bianco di Zandobbio – Dolomite) e per il 33% da polveri leganti (in totale circa 2.300 kg di mix di stampa, pari a 1,4 mc; Fig. 8).

La polvere legante impiegata è un mix di cemento fosfato-magnesiaco con granulometria sotto i 200 micron mentre l'aggregato non reattivo, il Bianco di Zandobbio, presenta una granulometria compresa tra 0 e 2 mm. La miscela per il letto di polvere è stata preparata mescolando tutte le



Fig. 1 | TECLA, an eco-sustainable module printed with LDM technology, designed by WASP and Mario Cucinella Architects (credit: WASP; I. Corazza).

Fig. 2 | Construction of the TECLA module (credit: WASP).

Fig. 3 | The Europe Building Pavilion, designed by DUS-Architects (credits: Aectual and DUS Architects; O. van Duivenbode).

materie prime in una betoniera per circa 20 minuti, invertendo l'inclinazione del tamburo a metà tempo (Fig. 9). Dopo lo scarico delle polveri è stata verificata la buona omogeneizzazione e stabilità della miscela. Il liquido attivante, depositato selettivamente dalla testa di stampa sul letto di polvere, è semplice acqua; per completare l'opera ne sono stati spruzzati, strato dopo strato, circa 50 litri (Fig. 10).

I tempi di lavorazione totale sono stati di 58,5 ore. Le operazioni di pre-produzione (la preparazione del materiale, la scelta della distribuzione granulometrica e la miscelazione delle polveri) hanno visto impegnate tre persone per una giornata lavorativa, mentre la fase di stampa è durata circa 2,5 ore; infine la post-produzione (relativa all'estrazione e recupero del materiale, alla pulizia e alla lucidatura dell'oggetto) ha necessitato di due giornate di lavoro e due persone (Fig. 11).

Il materiale di risulta (non attivato dal liquido e che ha svolto funzione di sostegno durante la produzione) è stato quantificato nel 72% della miscela totale ed è stato possibile reimpiegarlo in diverse stampe successive. È stata quantificata una



Fig. 4, 5 | Saltygloo, housing module: Prototype; individual printed modules to be assembled (credits: Emerging Objects / Ronald Rael + Virginia San Fratello).

Fig. 6, 7 | Arcadia: Seat made with additive manufacturing; The printer (credits: F. Lasala and L. Favaron).

bassa percentuale di scarto di materiale (5-7%) derivata dalle lavorazioni di preparazione e stampa, estrazione e recupero della polvere dal piano, pulizia superficiale del campione e post produzione¹⁰. Le potenzialità di questo processo risiedono nella replicabilità e nella possibilità di produzione contemporanea di moduli formalmente diversi, senza necessità di produrre stampi o altri supporti economicamente impattanti.

La seconda versione del prototipo è stata realizzata con tecnologia MS a partire da un blocco di Pietra di Vicenza (Fig. 12); tramite un centro di lavoro a 5 assi interpolati con annesso tornio controllato dinamico (CNC Osai, modalità Open, con interprete del codice ISO di alto livello) sono state necessarie 50 ore di lavorazione (Tab. 3). Mentre il volume del blocco lapideo era pari a circa 1,14 mc quello finale (netto) della seduta è pari a 0,232 mc, con una produzione di sfrido dell'80% circa (in linea con i dati internazionali mostrati in Tabella 1). Lo sfrido non è stato riciclato ed è stato conferito differenzialmente: l'inerte pulito è stato utilizzato per ripristini ambientali, sottofondi stradali, ecc., mentre quello con residui di sostanze inquinanti (quali resine) è stato smaltito in discariche autorizzate.¹¹

Risultati e discussione | Confrontando i dati forniti dalle aziende che hanno realizzato le due sedute emerge che i due prodotti hanno richiesto un impegno sostanzialmente diverso per le fasi produzione / formatura e post-produzione / lucidatura, con una inversione dei costi: la produzione con MS ha richiesto un elevato numero di ore di produzione, mentre quella con MA ha impegnato molte ore di post-produzione. Alcune fasi di pre e post produzione della sperimentazione sono state eseguite da personale non specializzato, pertanto è ipotizzabile un contenimento delle ore lavorative con l'impiego di personale qualificato o tramite l'ausilio del CNC. Una differenza importante nei due processi è relativa al volume di materiale impiegato: per produrre una seduta di volume pari a 232,5 dmc con la tecnologia MS è richiesto un volume di materiale di scavo pari a 5 volte il volume finale del prodotto, mentre con la MA il volume prodotto è quasi uguale al volume di materiale impiegato e l'esigua quantità di scarto può essere reimpiegata nel processo successivo; di fatto, in entrambi i processi lo scarto in prima fase è stato quantificato in circa 80% del materiale impiegato, ma nella MA il 72% di questo 80% è stato reintrodotta in produzione.

Anche il peso specifico dei materiali è diverso: la miscela utilizzata per la stampa multimateriale ha un peso specifico inferiore del 20% circa rispetto quella prodotta in marmo, perché la composizione della miscela di stampa contiene una percentuale variabile (20-40%) di altri materiali (leganti e aggregati leggeri); tuttavia è da rilevare che tali percentuali costituiscono delle variabili in funzione del materiale lapideo utilizzato sia per la miscela che per il prodotto in MS. Anche i costi del materiale e dell'oggetto prodotto sono nettamente diversi: la polvere lapidea, che è ricavata da scarto di estrazione e produzione, ha un valore di mercato inferiore rispetto al blocco intero, mentre, dal punto di vista commerciale, nella seduta di marmo realizzata con MS al prezzo di vendita viene imputato il costo dell'intero blocco estratto (quindi un volume 5 volte maggiore). In termini economici appare quindi più vantaggiosa la produzione con tecnologia MA di elementi in materiale composito lapideo, sia per i tempi di produzione che per i costi del materiale (in gran parte scarto di cava). Tuttavia gli elementi realizzati con questa tecnologia presentano due aspetti critici: il primo sulla tessitura di superficie (Fig. 13), il secondo sulla resistenza a compressione. Allo stato attuale i moduli realizzati con queste miscele sembrano idonei alla produzione di elementi di tipo non-strutturale; infatti mentre la Pietra di Vicenza ha una resistenza compressione media compresa fra 19,8 a 26,6 MPa (Uni 9724/3), la pietra artificiale resiste a compressioni fino a 20 MPa (Elsayed et alii, 2022).

La seconda criticità 'evidente' è relativa alla rugosità superficiale della seduta prodotta con MA: trattandosi di una miscela di polveri, depositata strato per strato, il risultato finale presenta una superficie molto ruvida, non lucida e compatta come la pietra, e di colore uniforme (secondo la polvere di marmo impiegata), senza le venature e le cromie tipiche dei lapidei. Per tale ragione, se la miscela è intesa come sostituzione della pietra sui prodotti realizzati con MA devono essere fatti trattamenti superficiali – che incidono ovviamente sul costo finale del prodotto – per renderli quanto più possibile lisci e uniformi come un lapideo.

Conclusioni | L'analisi fin qui condotta, seppure in modo empirico, restituisce le potenzialità applicative della Manifattura Additiva nel settore dell'Architettura e del Design, sia in termini di complessità delle forme realizzabili che di benefici economici e ambientali. La possibilità di riutilizzare gli scarti di cava e re-immetterli in un ciclo produttivo altamente tecnologico, con un basso impatto ambientale e costi ridotti, risponde alle richieste di un mercato sulla personalizzazione del prodotto, superando le logiche e i costi di una produzione industrializzata su larga scala.

I risultati conseguiti dalle ricerche recenti incoraggiano al trasferimento della sperimentazione per la produzione di elementi modulari non-strutturali, di rivestimento parietale (anche decorativo) o per l'arredo urbano, seppur con i punti di debolezza rispetto a finitura superficiale e prestazioni meccaniche della materia stampata. Un'altra criticità si potrebbe ravvisare nella riciclabilità del prodotto finale: trattandosi di un materiale composito dovranno essere valutate anche le prospettive di dismissione e trasformazione dei componenti.

Allo stato attuale le sperimentazioni per il recupero della polvere da sfridi lapidei si stanno moltiplicando, utilizzando anche altre tecnologie di stampa 3D e testando miscele diverse di materiali, anche sotto forma di impasti. Appaiono degni di nota, per esempio, il modulo in pietra artificiale prodotto da Wasp in collaborazione con il Politecnico di Bari (Fig. 14), realizzato con una miscela di calce e polvere di marmo¹² e impiegato in via sperimentale nel Da Vinci Bridge, progettato dal team del Prof. Giuseppe Fallacara¹³, così come altre sperimentazioni esposte all'interno del Marmomac Meets Academies 2023 di Verona e realizzate con formulazioni e tecnologie digitali diverse, come i prototipi Technovauld di Dustin White (Fig. 15) e Butterfly Wing di Nicola Parisi e Francesco Fieni (Fig. 16).

La ricerca si sta quindi sviluppando su diversi livelli, in termini di tecnologie e materiali, con aspettative di applicazioni e replicabilità a scale diverse: dai piccoli moduli replicabili agli elementi unici e fino ai componenti strutturali, utilizzando miscele con polvere di lavorazione o fanghi dalle migliorate prestazioni meccaniche. Tuttavia si rende necessario approfondire ulteriori questioni che potrebbero riguardare, da un lato, la LCA di prodotti e componenti (di diversa foggia e utilizzo) realizzati con MA e riciclo degli scarti di cava, dall'altro, in assenza di norme di riferimento, lo studio di norme specifiche su formulazioni e prestazioni.

In conclusione si può ipotizzare che in un futuro prossimo il riciclo degli scarti lapidei possa svilupparsi lungo tutta la filiera, con impasti e miscele che consentono di utilizzare sfridi, polveri e fanghi reimpiegando il materiale di scarto in diversi settori produttivi e per diverse applicazioni, partendo dal presupposto che questi prodotti non devono essere considerati sostituti degli elementi lapidei, ma complementari e finalizzati al recupero dei quell'80% di materiale di scarto in un'ottica di innovazione e circolarità.

Climate change and certain catastrophic natural events in the last two decades have contributed to the spread of greater environmental awareness, especially with respect to the exploitation of nat-

ural resources that, since the first Industrial Revolution, were considered almost unlimited. The most critical economic sectors in this regard are construction and mining, which together produce 65% of waste on a European scale (EEA, 2023). However, after the years of the economic boom and the first energy crises, a greater awareness developed with respect to the limited availability of natural resources, on the one hand thus finding the incompatibility between extractive activities and environmental quality (Monsù Scolaro, 2017), and on the other hand with the production of manufactured goods using waste material (Baratta et alii, 2023) or bio-based (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021).

In this scenario, the need for a design and production renewal to reintegrate scrap material into the production cycle (Baratta, 2021) in a product flexibility and customisation perspective becomes concrete. To achieve the goal even in the stone sector, the development of the production of building components from scrap in a circularity perspective is desirable (Di Roma, Scarcelli and Minenna, 2019). This approach would first lead to a drastic reduction of waste and shapelessness in quarries and landfills and, with a design paradigm shift, to the reduction and control of mining. The digitisation of design and manufacturing today can also increase the design of fast and cost-effective systems and processes for producing building components, building systems and architectures with low environmental impact, focused on the specific needs of individual users (Weinstein, 2020). The objective of the research presented in the article is to explore new industrial symbiosis production strategies for the reuse of quarry waste, aimed at the production of building components by the principles of sustainability, resilience, and human-centric-design sanctioned by the European Union (European Commission et alii, 2021). The paper investigates the potential of an alternative and complementary production process to subtractive manufacturing for stone materials in order to reduce the environmental impact from quarry exploitation and fully reuse waste in both extraction and processing.

For objective evaluation, a project made with both Subtractive Manufacturing (SM) and Additive Manufacturing (AM) will be analysed to compare production data in terms of time, environment, and form. The potential of AM for making customised components and products could meet contemporary environmental and production needs economically and without waste; in particular, the production of components from stone powder using the 3D printing method can allow 100% reuse of waste, with significant flexibility in terms of form, function, and circularity.

The article is structured into three parts: the first connects the cultural and production context within which the research is situated; the second analyses the state of the art regarding the use of AM in the construction industry; and the third describes the outcomes of a research and development work on the fabrication of some components from excavated and recycled stone materials using SM and AM. In particular, ongoing and published research on using AM in architecture to fabricate housing modules using 3D printing materials and technologies was reviewed for state-of-the-art analysis.

Process	Production Step machine/hours	Processing Step men/hours	Material Waste and Volume	Weight of Waste	Weight of Arcadia
Additive Manufacturing	2.5	56.0 (30.0)* *skilled labour	2,300 kg 1.4 mc (+ 50 lt H ₂ O)	1,650 kg (reused) + 150 kg (waste)	450 kg
Subtractive Manufacturing	40.0	10.0	2,520 kg 1.14 mc	2,005 kg	520 kg

Tab. 3 | Comparison of Arcadia production with AM and SM process.

Binder Jetting (BJ) technology with recycled stone powder was explored in depth. The case study was carried out within a research and development collaboration between three different realities: the company Desamanera srl, a manufacturer of large-scale 3D printers (in collaboration with the University of Padua) for the model made with BJ technology; the Academy of Fine Arts of Verona¹ for the design part; and the Marble School of Verona for the production of the same element with SM. The method of work and analysis was based on empirical observation of data and results that provide an indicator with respect to the potential of BJ technology in architecture and design, but the tests will need to be deepened and refined on case studies of different sizes.

The cultural and manufacturing context | Since parametric design and large-format 3D printing have entered powerfully into all sectors, including the construction industry, the formal variables and scope of what can be built have expanded dramatically, reducing the time and errors due to the passage of information (Sposito and Scalisi, 2017). For several years, we have been witnessing the creation of housing modules produced using additive manufacturing techniques while initially producing small modular components that could be reproduced in a short time and with synthetic materials. As the technology has improved, the size of the machines has increased, and the materials that can be used have multiplied, moving from synthetic materials to mixtures of natural materials such as earth, marble powders, and salt mixtures; at the same time, the size of the modules has also increased, and they have become true housing cells.

Today, AM can be applied to the construction sector in two ways: to produce modular components assembled into larger structures or to print entire housing modules (Sposito and Scalisi, 2017). In this context, in the binomial parametric design / 3D printing of components, the concept of 'module' takes on a double meaning: it is not only a reproducible component, but it is also a code of human-machine communication, where repeated algorithms (e.g., fractals) allow the realisation, layer by layer, of three-dimensional objects with the most disparate shapes and textures.

In the digital shift, design has entered a dimension in which the geometry of forms is generated by a mathematical model based on 'parameters': a simple repetition using historically known rules such as Fibonacci and the like (Jabi, 2013). The concept of parametric design originated in the last century and can be traced back to the studies of Luigi Moretti (1974a, 1974b) and Bruno De Finetti,

Frei Otto and more recently in Zaha Hadid, Gregg Lynn, ONL and others (Premier, 2017).

With a pioneering approach nearly 60 years ahead of contemporary design trends, Moretti addressed issues related to form and its generative processes, introducing the concept of 'mathematical modelling', a precursor to parametric design. In 1957, Moretti, alongside Bruno De Finetti, founded the Institute for Mathematical and Operational Research Applied to Urban Planning (IR-MoU), aiming to advance studies in the so-called 'parametric architecture' (Esposito De Vita, 2009). The project, understood as the result of generative processes that Moretti has digitally perfected, is thus conceived as the result of systemic balances open to the future (Ciribini, 1984).

The work of Frei Otto, considered the father of tensile structures, was also influenced by the observation and imitation of natural structures; he designed organic structures as a result of observing the evolutionary processes occurring in nature and reflected them in parameter-based mathematical models. In more recent times, Zaha Hadid has been recognised as an interpreter of parametric architecture, which she has been able to concretise in architectures with both fluid and deconstructed forms, bringing together academic training in mathematics and that in architecture. In the 21st century, the development of computer tools has thus transformed design into a complex system of interactions and successive aggregations of three-dimensional geometric modules that come together to form spatial structures (Marcolli, 1978), providing designers with the tools to simulate the complexity observed in nature and apply it to different scales, contributing 'from the spoon to the city, to the building of a new culture'² (Lidinger, 1986; Erhoff, 1986).

The parallel development of three-dimensional printing technologies in the last two decades has given further impetus to the application of parametric design, enabling the creation of modules with fluid and complex shapes that would require considerable time and cost to produce with traditional building systems; this has encouraged experimentation with new man-made and naturally derived materials, e.g., biomaterials and recycled materials such as quarry waste.

The search for and introduction of alternative and highly innovative materials even in the stone industry has been driven in recent years by a number of determining factors: from the reduction of natural resources to the increased environmental sensitivity with respect to the exploitation of stone quarries, to the rising cost of raw materials. The mining and production processes that have char-

acterised stone products to date still have a high percentage of waste and shapelessness, which for some stones is considerable and has major environmental repercussions, both on the exploitation of natural sites and their disposal.

Reports on the global stone industry (Tab. 1) show that gross quarry production more than doubled in 15 years (2003-2018) reaching 313,000



Fig. 8 | Arcadia: selection and dosing of printing powders (credit: F. Lasala and L. Favaron).

Fig. 9 | Arcadia: powder mixing stage (credit: F. Lasala and L. Favaron).

tons in 2018; likewise, net of mining and processing waste, the net total processed and finished stone products stood at about 90,000 tons in 2018. To be precise, as much as 71% of the material is transformed into waste, in two distinct stages: mining waste constitutes 51%, while processing waste constitutes 41% on the raw production quantity (Italian Trade Agency, 2020, 2021; Montani, 2017). Table 1 shows that over 15 years the proportion of excavation to waste has remained constant, so it is presumable that environmental and production policies still need to be implemented, including introducing new extraction and processing technologies, in synergy with design strategies aimed at minimising waste.

To date, the prevailing production process in the stone industry is related to CNC subtractive manufacturing; this 'sculptural' technique removes material from a stone block and has contributed to many complex designs (Turunen, 2016). However, this technique has limitations related to the formal aspect of the products (difficulty in producing hollow and complex shapes) and the production of a high percentage of scrap. Research and development activities over the past 15 years in the areas of digital and materials engineering have contributed to the gradual integration of some AM processes in architecture and design as well.

Unlike SM, AM does not waste material and has already been used in mechanical and product design for many years with different techniques: If Fused Filament Fabrication (FFF), stereolithography, and robotic arms are the most common additive manufacturing techniques when large-scale architecture-related objects are printed³, Binder Jetting (BJ) prevails in the ceramics sector, while Direct Ink Writing (DIW), Liquid Deposition Modelling (LDM), Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Digital Light Processing (DLP), etc. are applied to different types of materials (Gobbin et alii, 2021). Introducing some of these processes to the stone industry would also allow total recovery of quarry waste through a flexible and adaptive printing process.

3D printing in Architecture | The most recent experiments in the construction sector range from on-site printing of the entire module (Russo and Moretti, 2020) to the assembly of factory-produced components, with deposition of layers of cement mixtures, concrete, unfired earth, synthetic materials, etc. (Tab. 2). Among the best-known realisations, the housing module TECLA⁴, designed by Mario Cucinella (Figg. 1, 2), was made in 2019 with a raw earth-based mixture and produced with digital technology (Crane by Wasp) through a printer that can be assembled in different configurations. A single module with a diameter of 6.60 meters and a height of 3 meters can be made with cement, biocement, and earth/clay mixtures. The fabrication of a TECLA module took 200 hours of printing, 7,000 machine codes (G-codes), 350 layers of 12 mm material, 150 km of extrusion, and 60 cubic metres of natural materials for an average consumption of less than 6 kW. The module was highly innovative not only in the production process but also in structural design.

Other recent experiments with the same technology have produced concrete modules that can be assembled on-site. These include the prototype that was built in 2021 by a collaboration be-

tween Eindhoven University, the Municipality and construction companies (Jongsma, 2021). In 2016, on the other hand, Killa Design designed a 3D-printed building in Dubai⁵, 6 meters high and 36 meters long, producing it in 17 days through an automated robotic arm, and installing it in 2 days. The material mixture used is composed of cement, fibreglass, and fibre-reinforced polymers⁶, and labour costs were reduced by 50% compared to buildings constructed with conventional technologies of similar size, and on-site waste was minimal, helping to reduce the project's overall environmental impact.

The critical issues that arise in these modules, regardless of the material, are related to energy performance and appearance. Thus, the requirements associated with the containment of energy consumption in terms of the envelope and the surface texture are to be investigated, which, due to inherent characteristics of 3D printing, the reading of the layers of mixture deposition and a seemingly rough texture is kept visible. Then there are other experiments of FDM-printed modules with polymeric, recycled and bio-polymer materials, such as the modules of the Europe Building Pavilion⁷ by DUS Architects in Amsterdam, made in 2015 (Fig. 3), whose modular elements (sized up to 2 x 2 x 3.5 meters) made of bio-polymer were completely recycled after decommissioning (Gasparini, 2017). No less interesting is the experiment called Saltygloo (2013; Figg. 4, 5), which uses locally harvested salt from the San Francisco Bay mixed with a synthetic binder (glue) to create a lightweight, durable, waterproof, translucent, and inexpensive material. The housing module is composed of 336 translucent panels, each reminiscent of the crystalline shape of salt, assembled with seemingly random rotations and aggregations and connected by tensoflexed aluminium rods, which make the structure extremely lightweight, transportable, and assemblable; the translucency of the material allows natural light to permeate the space and highlight the structure (Mattioli, 2014).

It should be noted, however, that while the potential of these experiments lies in the use of recycled material, the multi-material composition of the mixtures (based on bioplastics or clay or salt) raises some doubts about the separability of raw materials and their recycling, especially for the Saltygloo module that uses glue as a matrix.

Finally, the first experiment in powder mixture printing using BJ technology dates back to 2009. Radiolaria Pavillion, developed by Shiro Studio with D-Shape, is a microarchitecture that employs a printing mixture composed of an inorganic material, sand or mineral powder, and a binder in liquid form, giving the final product compactness and a stone-like effect (Turner, 2009); however, the experiment has not been further developed, it has recently been taken up by research groups and manufacturers of large-scale 3D printers. These experimental printing systems and blends manage to express their potential best in the production of sculptural and furniture elements, even of considerable size or in modules that can be replicated at different scales and quantities, without necessarily developing along an industrialised supply chain.

Multimaterial printing with quarry waste | Multi-Material Additive Manufacturing (MMAM) is

an emerging manufacturing process related to the AM technique that involves the formulation of powder mixtures of two or more materials, having different properties, to be used in an additive process (printing on a 'bed of powder') to make composite objects and components (Pajonk et alii, 2022; Lowke et alii, 2018). During the printing process, a fluid (activator) is selectively deposited on the mixture consisting of aggregates and binder (sand or stone powder and cement); upon reaction, the 'powders' will solidify, resulting in the pre-determined shape of the component (Paolini, Kollmannsberger and Rank, 2019).

The use of AM with powder mixtures could significantly contribute to the stone industry when used alongside subtractive manufacturing, enabling the recovery of quarry and processing waste. The primary advantages of AM lie in its ability to create complex geometries, save time through rapid iterations and reduced delivery times, produce mass-customized objects (Pajonk et alii, 2022), and cost and energy savings (Horvath, Trachte and Pardoen, 2021). The principles of manufacturing artificial stone components using AM are based on building the geometry layer by layer in a sequential manufacturing process made possible by generating a model with parametric software (Turunen, 2016).

In this regard, Lowke et alii (2018) identify three types of particle-bed processes: Selective Binder Activation, in which the particle-bed mixture consists of a fine aggregate and a binder, such as sand and cement, to which a liquid activator, such as water with additives, is selectively added; Selective Paste Intrusion, in which the particle-bed contains only the aggregate and the fluid selectively deposited is a binder paste consisting of cement, water and additives; and Binder Jetting, in which the particle-bed is a mixture of aggregate and activator. A liquid binder is selectively applied to it. In particular, BJ technology enables the production of non-structural components from artificial stone even for low production volumes and with high geometric complexity, a possibility only sometimes feasible with MS. The choice of the most suitable AM technology depends on many factors, including the type of material, its properties, design constraints, and shape complexity, all functions of an approach, that of Design for Additive Manufacturing, which aims to specifically design a part or product for easy fabrication (Wiberg, Persson and Ölvander, 2019).

In recent years, the stone-derived powder mixtures used with BJ technology have been increasingly refined, achieving attractive mechanical performance in terms of compressive strength, porosity and post-production processing. During the process, the printer deposits the stone mixture powders and activator fluid in alternating layers over areas defined by the 3D digital model of the object; at the end of the process, the resulting powder is removed and stored for reuse. The nonreactive aggregate used consists of river sand and a formulation of porous glass particles (Gobbin et alii, 2021). Recent formulations of the mixture have produced a marked improvement in mechanical performance over early experiments, achieving a compressive strength of 20 Mpa, with an average porosity of 30% (Elsayed et alii, 2022).

The design of the Arcadia seat with additive and subtractive manufacturing | The Arcadia

outdoor seat (Fig. 6), presented at the Marmomac Verona 2021 event, consists of two elements whose design was developed with Rhino+Lumion software, a parametric modeller useful for digital fabrication of two prototypes, with AM and SM technology.

The first version of the prototype, made with BJ technology⁸, was produced with Desa1 150,150 from Desamanera Srl, whose print volume is 1.5 x 1.4 x 1.4 cubic metres and the 'cubic voxel resolution' is 5.7 x 5.7 x 5.7 cubic millimetres (Fig. 7). The '.stl' file generated by the modeller was processed through Desamanera's proprietary slicing software⁹ using an isotropic voxel of 5.7 x 5.7 x 5.7 cubic millimetres. The overall manufacturing process is similar to those described in Gobbin et alii (2021) and Elsayed et alii (2022). The powder mix used, which can be composed of different aggregates and binders, in the project under review (Tab. 3) was composed of 67% stone aggregate from pulverised quarry waste (Bianco di Zandobbio – Dolomite) and 33% binder powders (in total about 2,300 kg of press mix, equal to 1.4 cubic metres; Fig. 8).

The binding powder used is a phosphate-magnesium cement mix with a particle size below 200 microns while the nonreactive aggregate, Zandobbio White, has a particle size between 0 and 2 mm. The mixture for the powder bed was prepared by mixing all the raw materials in a concrete mixer for about 20 minutes, reversing the drum inclination halfway through (Fig. 9). After the powders were discharged, the mixture was checked for good homogenisation and stability. The activating liquid, selectively deposited by the printing head on the powder bed, is simple water; about 50 litres were sprayed layer by layer to complete the work (Fig. 10).

The total processing time was 58.5 hours. Pre-production operations (the preparation of the material, the choice of particle size distribution and the mixing of powders) took three people one working day, while the printing phase took about 2.5 hours; finally, post-production (related to the extraction and recovery of the material, cleaning and polishing of the object) required two working days and two people (Fig. 11).

The waste material (which was not activated by the liquid and served as a support function during production) was quantified as 72% of the total mixture and could be reused in several subsequent prints. A low percentage of material waste was quantified (5-7%) from the preparation and printing processes, extraction and recovery of the powder from the plane, surface cleaning of the sample and post-production¹⁰. The potential of this process lies in replicability and the possibility of simultaneous production of formally different forms without the need to produce moulds or other economically impactful media.

The second version of the prototype was made with SM technology from a block of Vicenza Stone (Fig. 12); using a 5-axis interpolated machining center with an attached dynamic controlled lathe (Osai CNC, Open mode, with high-level ISO code

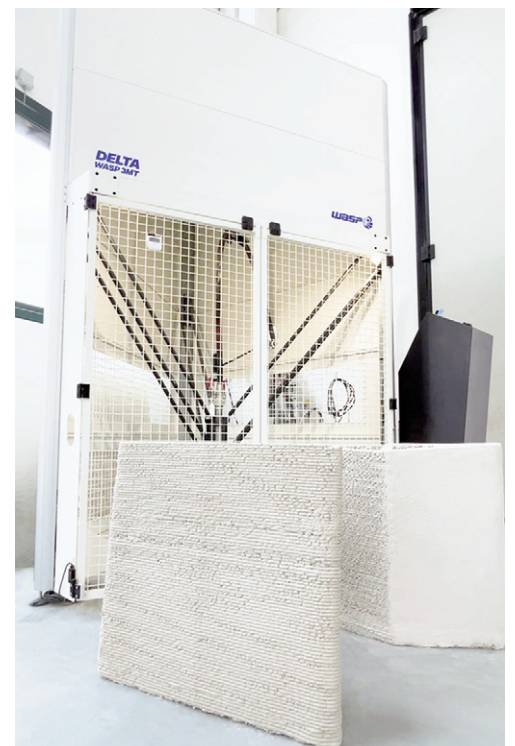


Fig. 10-13 | Arcadia: Printing stage; Post-production polishing stage; Seat made with subtractive manufacture; Detail of the surface texture (credits: F. Lasala and L. Favaron).

Fig. 14 | An ashlar of the Da Vinci Bridge (credit: WASP).



Fig. 15 | TechnoVault, designed by Dustin White, prototype displayed at the Marmomac Meets Academies 2023 event (credit: K. Gasparini).

Fig. 16 | Butterfly Wing, designed by Nicola Parisi and Francesco Fieni, prototype exhibited at the Marmomac Meets Academies 2023 event (credit: K. Gasparini).

interpreter), 50 hours of machining were required (Tab. 3). While the volume of the stone block was about 1.14 cubic meters the final (net) volume of the session was 0.232 cubic meters, producing about 80% scrap (in line with international data shown in Table 1). The scrap was not recycled and was conferred differentially: clean aggregate was used for environmental restoration, road subgrade, etc., while that with pollutant residues (such as resins) was disposed of in licensed landfills.¹¹

Results and discussion | Comparing the data provided by the companies that produced the two seats, it is evident that the two products required substantially different efforts for the production / forming and post-production/polishing phases, with a cost reversal: production with SM required a high number of production hours, while production with AM involved many hours of post-production. Some pre- and post-production phases of the experimentation were carried out by non-specialized personnel; therefore, working hours could be reduced with qualified personnel or through CNC technology. An important difference between the two processes is related to the volume of material used: to produce a seat with a volume of 232.5 cubic decimeters using SM technology, a volume of excavation material five times the final product's volume is required, whereas with AM, the produced volume is nearly equal to the volume of material used, and the minimal waste can be reintroduced into the subsequent process. In fact, in both processes, the initial waste was quantified at approximately 80% of the material used, but in AM, 72% of this 80% was reintroduced into production.

Furthermore, the specific weight of the materials is also different: the mixture used for multi-material printing has a specific weight approximately 20% lower than that produced in marble. This is because the composition of the printing mixture contains a variable percentage (20-40%) of other materials (binders and lightweight aggregates). However, it is worth noting that these percentages are variables depending on the type of stone material used, both for the mixture and the product in SM.

Material and product costs are also significantly different: the stone powder, which is derived from extraction and production waste, has a lower market value compared to the entire block. From a commercial standpoint, the cost of the entire extracted block is included in the selling price of the marble seat produced with SM (which is five times the volume). In economic terms, the production of composite stone elements using AM technology appears more advantageous, both in terms of production times and material costs (which are largely quarry waste). However, elements made with this technology have two critical aspects: the first on surface texture (Fig. 13) and the second on compressive strength. Currently, modules produced with these mixtures are suitable for creating non-structural elements. While Pietra di Vicenza has an average compressive strength ranging from 19.8 to 26.6 MPa (Uni 9724/3), artificial stone can withstand compressive forces up to 20 MPa (Elsayed et alii, 2022).

The second 'evident' critical aspect concerns the surface roughness of the seat produced with MA: as it is a layer-by-layer deposition of a powder mixture, the final result has a very rough, non-glossy, and compact surface compared to natural stone. It has a uniform colour (according to the marble powder used) and lacks natural stone's typical veins and hues. For this reason, if the mixture is intended as a substitute for stone in products produced with MA, surface treatments must be applied – which, of course, affect the final cost of the product – to make them as smooth and uniform as natural stone.

Conclusions | The analysis conducted thus far, although empirical in nature, reveals the potential applications of Additive Manufacturing in the fields

of Architecture and Design. This potential is evident in the complexity of achievable forms and the economic and environmental benefits they offer. The ability to reuse quarry waste and reintegrate it into a highly technological production cycle with low environmental impact and reduced costs aligns with the market demands for product customisation, surpassing the logic and costs associated with large-scale industrial production.

The results obtained from recent research encourage the transfer of experimentation to the production of non-structural modular elements, wall cladding (including decorative), or urban furnishings. However, there are areas for improvement concerning surface finish and mechanical performance of the printed material. Another critical aspect to consider is the recyclability of the final product, given that it is a composite material. The prospects for the disposal and transformation of components should also be evaluated.

At present, experiments for powder recovery from stone waste are multiplying, also using other 3D printing technologies and testing different mixtures of materials, including in the form of slurries. Appearing noteworthy, for example, is the artificial stone module produced by Wasp in collaboration with the Polytechnic University of Bari (Fig. 14), made with a mixture of lime and marble powder¹² and used experimentally in the Da Vinci Bridge, designed by the team of Prof. Giuseppe Fallacara¹³, as well as other experiments exhibited within Marmomac Meets Academies 2023 in Verona and made with different formulations and digital technologies, such as Dustin White's Technovault prototypes (Fig. 15) and Butterfly Wing by Nicola Parisi and Francesco Fieni (Fig. 16).

Research is developing on multiple levels, involving different technologies and materials, with expectations of applications and replicability at various scales. This ranges from small replicable modules to unique elements and even structural components, using mixtures containing processing powder or sludge with improved mechanical performance. Nevertheless, further exploration is required to address issues related to the Life Cycle Assessment (LCA) of products and components (of varying shapes and uses) manufactured using Additive Manufacturing and quarry waste recycling. Additionally, in the absence of reference standards, the study of specific regulations for formulations and performance is needed.

In conclusion, it can be hypothesised that in the near future, quarry waste recycling can evolve throughout the entire supply chain, with blends and mixtures that allow for the use of waste, dust, and sludge in various production sectors and applications. It should be emphasised that these products should not be viewed as substitutes for stone elements but rather as complementary, serving the purpose of recovering 80% of waste material with an outlook of innovation and circularity.

Acknowledgements

For the Arcadia project, we would like to express our gratitude to: F. Lasala and L. Favaron, the designers for the photos; A. Italiano (Desamanera Srl) and F. Gobbin (University of Padova) for technical information, production data, texts, and technical-scientific consultation; D. Marconi for the SM production data (Scuola del Marmo, Verona); Wasp, the company, for the images and technical texts related to Tecla and the DaVinci Bridge voussoir; DUS Architect studio for the images of the EU Pavilion; and finally, Emerging Objects / Ronald Rael + Virginia San Fratello for the images of Saltygloo.

Notes

- 1) Project D.A.M.N. Design: F. Lasala and L. Favaron; Lecturers: K. Gasparini, F. Piccolino Boniforti, L. Palmeri and S. Papadopoulos.
- 2) The concept was expounded by Max Bill in his speech at the opening of the academic year at the ULM School in 1953, within the programmatic objectives (Lindinger, 1988; Erlhoff, 1988).
- 3) For more information, see the webpage on ‘marble quarry waste recovery plants’: sinopesrl.com/plant-recovery-slugde-quarries-marble [Accessed 06 October 2023].
- 4) Information about TECLA Press Kit can be found at: 3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/ [Accessed 06 October 2023].
- 5) More information can be found at: archilovers.com/projects/183950/dubai-s-museum-of-the-future-office-building.html#info [Accessed 06 October 2023].
- 6) More information about the first 3D printed building can be found at: archiportale.com/news/2016/05/architettura/inaugurato-a-dubai-il-primo-edificio-stampato-in-3d_52177_3.html [Accessed on 06 October 2023].
- 7) More information about the Pavilion Europe Building (2015) can be found at: houseofdus.com/work/#project-europe-building [Accessed on 06 October 2023].
- 8) The process is described very comprehensively in the contribution of Elsayed et alii (2022); the research group at the University of Padua tested a powder mixture consisting of magnesium oxide and monopotassium phosphate with different aggregates, with varying sizes of particles depending on the type of printer used (Gobbin et alii, 2021).
- 9) D-slicing, Desamanera srl, Rovigo (IT).
- 10) Reports provided by Filippo Gobbin (University of Padua) and Antonino Italiano (Desamanera Srl) to the Author on the dates of 16/02/2023 and 10/10/2023.
- 11) Information and data were provided by Dario Marconi (Marble School Verona) to the Author on 12/01/2023.
- 12) Information provided by Wasp to the Author on 09/10/23.
- 13) The project team, coordinated by Prof. G. Fallacara, consists of N. Parisi, I. Cavaliere and A. V. Graziano.

References

- Baratta, A. F. L. (2021), “Dalle politiche per la circolarità delle risorse alla strategia zero rifiuti | From resource circularity policies to the zero-waste strategy”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 32-41. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/932021 [Accessed 06 October 2023].
- Baratta, A. F. L., Andreotti, J., Trulli, L. and Calcagnini, L. (2023), “L’innovazione di prodotto per la transizione ecologica – Il riciclo del laterizio e del vetro | Product innovation for the ecological transition – Brick and glass recycling”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 227-236. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13192023 [Accessed 06 October 2023].
- Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e progetto – Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid, Torino.
- Di Roma, A., Scarcelli, A. and Minenna, V. (2019), “RE-STONED – Dalla Polvere di Scarto alla Pietra Sostenibile | RESTONED – From Waste Material to Sustainable Stone”,

in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 183-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5212019 [Accessed 06 October 2023].

EEA – European Environment Agency (2023), *Tracking waste prevention progress – A narrative-based waste prevention monitoring framework at the EU level*, EEA Report no 2. [Online] Available at: eea.europa.eu/publications/tracking-waste-prevention-progress [Accessed 06 October 2023].

Esposito De Vita, G. (ed.) (2009), *Luigi Moretti e la Fondazione de La Rocca – Urbanistica e Ricerca Operativa*, Plan, Roma.

Elsayed, H., Gobbin, F., Picicco, M., Italiano, A. and Colombo, P. (2022), “Additive manufacturing of inorganic components using a geopolymer and binder jetting”, in *Additive Manufacturing*, vol. 56, article 102909, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2022.102909 [Accessed 06 October 2023].

Erlhoff, M. (1988), “Conversazione con Max Bill”, in Lindinger, H. (ed.), *La Scuola di Ulm – Una nuova cultura del progetto (1953-1968)*, Costa & Nolan, Genova, pp. 65-68.

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A. (2021), *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2777/308407 [Accessed 06 October 2023].

Gasparini, K. (2017), “Adattività e innovazione nei nuovi sistemi per architetture tessili”, in *Tenda In&Out*, vol. 3, pp. 38-45. [Online] Available at: issuu.com/katiagaspariniarchitetto/docs/tenda3-2017 [Accessed 06 October 2023].

Gobbin, F., Elsayed, H., Italiano, A., Adriani, J., Colombo, P. and Maire, E. (2021), “Large scale additive manufacturing of artificial stone components using binder jetting and their X-ray microtomography investigations”, in *Open Ceramics*, vol. 7, article 100162, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100162 [Accessed 06 October 2023].

Horvath, M., Trachte, S. and Pardoen, T. (2021), “New circular building composite material to upcycle building wastes”, in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 2042, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012167 [Accessed 06 October 2023].

Italian Trade Agency (2021), *Nota di mercato – Settore lapideo*, Miami (US). [Online] Available at: ice.it/it/sites/default/files/inline-files/Nota%20di%20Mercato%20-%20Lapideo%20-%20June%202021.pdf [Accessed 06 October 2023].

Italian Trade Agency (2020), *Nota di mercato – Settore lapideo*, Miami (US). [Online] Available at: ice.it/it/sites/default/files/inline-files/Nota%20di%20Mercato%20-%20Lapideo%20-%20Aprile%202020.pdf [Accessed 06 October 2023].

Jabi, W. (2013), *Parametric Design for Architecture*, Laurence King, London. [Online] Available at: softschool.ac/wp-content/uploads/2019/10/Parametric-Design-for-Architecture-SoftSchool.pdf [Accessed 06 October 2023].

Jongsma, I. (2021), “First resident of 3D-printed concrete house in Eindhoven receives key”, in *tue.nl*, 30/04/2021. [Online] Available at: tue.nl/en/news/news-overview/30-04-2021-first-resident-of-3d-printed-concrete-house-in-eindhoven-receives-key [Accessed 06 October 2023].

Lindinger, H. (1988), “Ulm – Leggenda e idea vitale”, in Lindinger, H. (ed.), *La Scuola di Ulm – Una nuova cultura del progetto (1953-1968)*, Costa & Nolan, Genova, pp. 10-15.

Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C. and Dillenburger, B. (2018), “Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges”, in *Cement and Concrete Research*, issue 112, pp. 50-65. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018 [Accessed 06 October 2023].

Marcollari, A. (1978), *Teoria del campo*, vol. 2, Sansoni, Bologna.

Mattioli, G. (2014), “Saltygloo, una scultura di sale”, in *La Stampa*, 17/01/2014. [Online] Available at: lastampa.it/cultura/2014/01/17/news/saltygloo-una-scultura-di-sale-1.35936042/ [Accessed 06 October 2023].

Monsù Scolaro, A. (2017), *Progettare con l’esistente – Riuso di edifici, componenti e materiali per un processo edilizio circolare*, FrancoAngeli, Milano.

Montani, C. (2017), *XXVIII Rapporto Marmi e Pietre nel Mondo – 2017 – Marble and Stone in the world*, Aldus, Carrara. [Online] Available at: issuu.com/marmonews/docs/rapporto_2017_screen [Accessed 10 October 2023].

Moretti, L. (1974a), “Structures and Sequences of Spaces”, in *Opposition*, vol. 4, pp. 123-139. [Online] Available at: usmodernist.org/OPP/OPP-1974-4.pdf [Accessed 06 October 2023].

Moretti, L. (1974b), “The Value of Profiles”, in *Opposition*, vol. 4, pp. 112-122. [Online] Available at: usmodernist.org/OPP/OPP-1974-4.pdf [Accessed 06 October 2023].

Pajonk, A., Prieto, A., Blum, U. and Knaack, U. (2022), “Multi-material additive manufacturing in architecture and construction – A review”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 45, article 103603, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103603 [Accessed 06 October 2023].

Paolini, A., Kollmannsberger, S. and Rank, E. (2019), “Additive manufacturing in construction – A review on processes, applications, and digital planning methods”, in *Additive Manufacturing*, vol. 30, article 100894, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894 [Accessed 09 October 2023].

Russo, D. and Moretti, M. (2020), “Shamballa, il Paradiso può attendere – Come la stampa 3D sostiene il futuro | Shamballa, Heaven can wait – How 3D printing will sustain the future”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 32-43. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/832020 [Accessed 06 October 2023].

Premier, A. (2017), “Il design parametrico per il progetto dei tessuti schermanti”, in *TeSS | Tende e Schermature Solari*, n. 2, pp. 8-17. [Online] Available at: issuu.com/alepremier/docs/teSS.02.2017_-_premier [Accessed 06 October 2023].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2017), “Strumenti e materiali per la fabbricazione digitale in architettura | Instruments and materials for digital manufacturing in architecture”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 1, pp. 143-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1222017 [Accessed 06 October 2023].

Turner, B. (2009), “Radiolaria Pavilion by Shiro Studio”, in *Dezeen*, 22/06/2009. [Online] Available at: dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio/ [Accessed 06 October 2023].

Turunen, H. (2016), “Additive Manufacturing and Value Creation in Architectural Design, Design Process and End-products”, in Herneoja, A., Österlund, T. and Markkanen, P. (eds), *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, University of Oulu, vol. 1, pp. 103-111. [Online] Available at: doi.org/10.52842/conf.ecaade.2016.1.103 [Accessed 06 October 2023].

Violano, A., Cannaviello, M. and Del Prete, S. (2021), “Materiali rigenerativi bio-based – Una proposta innovativa per il packaging e i prodotti da costruzione | Bio-based circular materials – Innovative packaging and construction products”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 244-253. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9242021.

Weinstein, A. (2020), “Creating Superior Customer Value in the Now Economy”, in *Journal of Creating Value*, vol. 6, issue 1, pp. 20-33. [Online] Available at: doi.org/10.1177/2394964319898962 [Accessed 06 October 2023].

Wiberg, A., Persson, J. and Ölvander, J. (2019), “Design for additive manufacturing – A review of available design methods and software”, in *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, issue 6, pp. 1080-1094. [Online] Available at: doi.org/10.1108/RPJ-10-2018-0262 [Accessed 06 October 2023].