

Valentina Perricone



Valentina Perricone è una naturalista e biologa marina, laureata in Scienze Naturali presso l'Università Federico II di Napoli e in Biologia Marina all'Alma Mater Studiorum, Università di Bologna. Collabora con la Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli, presso i laboratori e le infrastrutture di ricerca della sezione di Biologia ed Evoluzione degli Organismi Marini (BEOM).

Attualmente è dottoranda di ricerca in Ambiente, Design e Innovazione e membro dell'Hybrid Design Lab dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Aversa (CE). Con il supporto delle professoressa Carla Langella e Maria Daniela Candia Carnevali, sperimenta l'applicazione del metodo ibrido tra design e biologia in un progetto di dottorato a caratterizzazione industriale, incentrato su uno studio approfondito dei caratteri morfologici e strutturali degli echinoidi, con lo scopo di apportare nuove conoscenze specie-specifiche e innovazione dei prodotti industriali attraverso il design biomimetico.

Gabriele Pontillo



Gabriele Pontillo è un product designer italiano nato nel 1983 a Torre del Greco, in provincia di Napoli. Attualmente sta frequentando un dottorato a caratterizzazione industriale in Ambiente, Design e Innovazione, con sede ad Aversa (CE) presso l'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", all'interno della Scuola Politecnica e delle Scienze di Base. Grazie al suo percorso accademico, triennale in Disegno Industriale e poi magistrale in Design per l'Innovazione, e alle conoscenze acquisite tramite l'esperienza lavorativa, focus della sua linea di ricerca sono i metodi della progettazione parametrica, biomedicale e bio-ispirata, e le tecniche produttive dell'Advanced Manufacturing. Il percorso di dottorato a caratterizzazione industriale gli ha dato la possibilità di far convergere la sede italiana del dottorato con una sede estera (situata a Madrid, Spagna) e con una azienda campana, con sede a Gricignano di Aversa (CE) al fine di progettare un sistema di dispositivi ortopedici innovativi customizzati su specifiche esigenze e pensato per il benessere e la salute medica di utenti eterogenei.

Ricerca biologica e ibridazione metodologica con il design

Valentina Perricone | valentina.perricone@unicampania.it
Gabriele Pontillo | gabriele.pontillo@unicampania.it



“Quello che non riesco a creare, non lo saprò mai capire”

Richard Feynman

Il modo migliore di apprezzare la natura è di sicuro studiarla. Esistono bellezze che vanno al di là di quel che è visibile all'occhio umano: dalle realtà interstellari – tra pianeti, stelle, galassie – a quelle infinitesimali – tra le particelle del nucleo atomico – esistono infiniti mondi da esplorare. La scienza si occupa di scoprirle e descriverle (almeno in parte), dilatando sempre più la conoscenza della realtà e così anche il senso di meraviglia, di mistero e di ammirazione a essa associato. Chi sono gli scienziati? Sognatori curiosi alla ricerca di nuove avventure.

Quando ero ancora una studentessa, nella mia predilezione per le scienze non era inclusa la bionica. Semplicemente studiavo la natura e a ogni nuovo sistema, funzione, organismo che imparavo a conoscere, me ne innamoravo sempre più. Anni dopo, all'insolita mostra sull'intersezione tra design e scienza Diatom De-Science, ebbi la fortuna di incontrare **Carla Langella**; lei ampliò i miei orizzonti a una nuova realtà, piantando il seme di ciò che sono oggi: un'atipica biologa appassionata di bionica. Carla è oggi la mia tutor di ricerca in un dottorato frutto dell'ibridazione tra biologia e design e assieme a **Gabriele Pontillo**, esperto designer di fabbricazione digitale e design parametrico, formiamo un team specializzato per raggiungere nuove conoscenze biologiche e innovazione dei prodotti industriali.

Gabriele e io abbiamo conosciuto **Carmelo di Bartolo**, prima i suoi scritti e poi di persona, attraverso la stretta collaborazione di Carla. Siamo rimasti esterrefatti dalla moltitudine di progetti di bionica da lui realizzati, ma soprattutto dai diversi prodotti elaborati su intuizioni di strategie adattative del riccio di mare - supportate dalla professoressa **Maria Daniela Candia Carnevali** del Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali dell'Università degli studi di Milano- che stanno venendo oggi confermate dagli studi strutturali eseguiti in collaborazione con il dottor **Francesco Marmo** e il professor **Luciano Rosati** del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli. Quel che resta impresso di Carmelo è la passione, l'esperienza e la creatività che divengono a dir poco coinvolgenti nel seguire le sue lezioni e seminari. Ringraziamo di cuore Carla e Carmelo, è per noi un piacere dedicare loro questo breve testo.





[RICERCA BIOLOGICA E IBRIDAZIONE METODOLOGICA CON IL DESIGN]

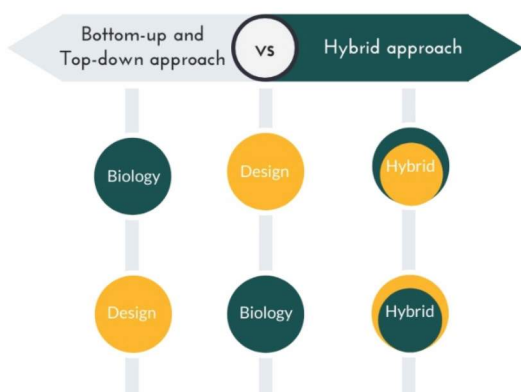
I recenti avanzamenti tecnologici ottenuti nel campo del *computational imaging*, della simulazione e della fabbricazione digitale, e la maggiore risoluzione strumentale acquisita nell'analisi di campioni biologici hanno aperto una nuova era per la biomimetica. Le strutture biologiche, finemente selezionate nel corso di centinaia di milioni di anni di evoluzione, possono oggi non solo essere analizzate nel più intimo dettaglio su scala microscopica, ma tali dettagli, che rispondono a principi adattativi quali leggerezza, stabilità, robustezza, flessibilità, resistenza, possono essere anche più efficacemente trasferiti a prodotti destinati ai più svariati settori industriali (Benyus, 2002; Hamm, 2015; Langella, 2007).

Nel processo biomimetico vi è però un'altra grande potenzialità, ancora non pienamente sfruttata, che risiede nella capacità di usufruire del diretto contributo dell'*industrial design* nella ricerca biologica. Il disegno industriale è in grado di offrire un valido apporto all'avanzamento delle conoscenze delle strutture biologiche, considerando l'organismo come un vero e proprio oggetto di *design engineering* e analizzandolo come tale. Attraverso il suo approccio metodologico e strumentale, il design è in grado di assistere l'analisi biologica nell'individuazione delle caratteristiche e delle motivazioni sottese alle morfologie, alle strutture e alla composizione degli organismi fin nei più minuti dettagli strutturali, fornendo valide tecniche di rappresentazione e interpretazione strutturale supportate dall'uso di modelli Computer-Aided Design (CAD) 3D e di tecnologie digitali. Tali tecniche consentono di figurare e analizzare strutture, motivazioni e principi altrimenti nascosti, e di combinare logiche, gerarchie e funzioni in modelli utili a visualizzare e riprodurre la struttura, distinguendone le parti potenzialmente funzionali. Una volta individuati i principi adattativi sottesi alle specifiche forme, assetti e composizioni delle biostrutture, ciò che il design propone è sperimentare e validare le conoscenze acquisite ricreandole all'interno dei prodotti industriali. All'analisi segue, dunque, una particolare sperimentazione applicativa progettuale dei risultati acquisiti valorizzando oltremodo l'avanzamento della conoscenza biologica (Langella, 2007, 2012).

[APPLICAZIONE DELLA RICERCA BIUNIVOCA E DEL METODO IBRIDO DELL'HYBRID DESIGN LAB]

La possibilità di integrare design e bioscienze è un concetto ampiamente supportato e validato dai numerosi progetti implementati dall'Hybrid Design Lab, laboratorio multidisciplinare di ricerca e didattica dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli". Dal 2006 a oggi i team interdisciplinari dell'HDL hanno maturato numerose esperienze nella sperimentazione di modi sempre nuovi per integrare la ricerca scientifica avanzata con le dimensioni della didattica, del progetto e della produzione di design, sviluppando interessanti prodotti e servizi innovativi e sostenibili. Da tali esperienze è nato un particolare metodo ibrido che sottolinea il valore e la potenzialità della ricerca biunivoca, in cui design e scienze condividono obiettivi, metodi e tecniche analitiche, allo scopo di pervenire a risultati che apportino avanzamenti e vantaggi biunivoci negli ambiti di ricerca scientifica e del design (Langella, 2007).

La ricerca biunivoca si differenzia dai tipici approcci biomimetici *bottom-up* (o *solution-based*) e *top-down* (o *problem-based*) (Helms et al., 2008; Badarnah & Kadri, 2015) in cui le diverse discipline coinvolte trasferiscono nozioni e concetti restando sempre confinati nei propri ambiti disciplinari, limitando il processo creativo e i vantaggi derivanti da un percorso congiunto.



I due approcci differiscono l'uno dall'altro per il punto di inizio del processo di sviluppo tecnologico, ossia: 1) il *bottom-up* parte da quesiti biologici e le soluzioni ritrovate vengono trasferite agli artefatti; 2) il *top-down* inizia da problematiche irrisolte di design, cercando possibili risposte nel mondo biologico. Entrambi gli approcci convergono in una applicazione tecnica delle conoscenze biologiche (principi, logiche, sistemi e processi), generando uno o diversi concept bio-ispirati. La ricerca biunivoca tra biologia e design integra tali approcci. Come per la tipologia di indagine biomimetica definita *bottom-up*, anche qui lo sviluppo tecnologico del prodotto segue la preliminare analisi biologica

degli "organismi modello". Tuttavia, a tale approccio si aggiunge una particolare componente *top-down*, per cui il design partecipa sin dalla fase iniziale di indagine biologica, indirizzando lo studio funzionale degli organismi verso dettagli e strategie che possano rispondere alle precise esigenze di prodotto (Langella, 2007, 2012).



L'organismo vivente viene, quindi, considerato come un oggetto di design engineering e scomposto in componenti funzionali (pattern, texture, forme, strutture, ecc.) per essere analizzato, a diverse scale dimensionali, con tecniche combinate biologiche e con quelle proprie del design di progettazione, modellizzazione e fabbricazione digitale. Biologi e designer analizzano assieme l'entità biologica scelta e, sulla base dello stato di conoscenza corrente, elaborano *nature model* 2D e 3D dei sistemi, strategie e funzioni adattative dell'organismo, identificando elementi congiunti di interesse da indagare approfonditamente. Viene dunque elaborato un piano progettuale volto a investigare uno o diversi elementi considerati ad alto potenziale di trasferimento biomimetico e utili ad accrescere le conoscenze specie-specifiche dell'organismo considerato. Nella sperimentazione diretta, gli organismi sono sottoposti ad analisi biologiche approfondite integrate con tecniche di modellazione CAD 3D e software di simulazione digitale, scelti in base alla tipologia di informazioni ricercate. Tali analisi e la successiva interpretazione dei dati avvengono secondo metodi rigorosamente scientifici allo scopo di raggiungere una conoscenza affidabile, verificabile e condivisibile. Dunque, una volta individuate forme, strutture e geometrie corrispondenti a strategie e principi funzionali adattativi, è possibile trasferirle nel progetto di diversi prodotti tecnici, secondo analogie di funzione ed esigenze di innovazione espresse dall'azienda e dal mercato. Le conoscenze biologiche divengono guide rigorose e modelli, dalla fase di elaborazione dei concept bio-ispirati fino a quella finale di realizzazione dei prodotti, passando attraverso gli stadi intermedi di progettazione, sviluppo e ingegnerizzazione. I prodotti bio-ispirati così sviluppati sono infine sottoposti a prototipazione, *testing* e verifica, per essere poi inseriti sul mercato.

[RISVOLTI NELLA RICERCA BIOLOGICA]

Il metodo ibrido descritto, attraverso l'aggiunta di nuovi obiettivi e modi differenti di guardare la natura, promuove diverse modalità di sviluppo, sia per il processo di progettazione di design bio-ispirato, sia per l'indagine biologica. L'approccio biunivoco inserisce tra le metodologie scientifiche proprie della ricerca biologica tradizionale diversi principi e strumenti di design, considerando tra i suoi obiettivi e risultati non solo l'avanzamento delle conoscenze biologiche, ma anche l'applicazione di tali conoscenze nella realizzazione di nuovi prodotti. Si integrano dunque concetti e modalità inusuali all'approccio biologico, ma che risultano vantaggiosi sotto diversi punti di vista.

[1. CONSIDERARE L'ORGANISMO COME UN OGGETTO DI DESIGN ENGINEERING]

Naturale e artificiale sono due entità ben differenziate dal processo di generazione: l'una cieca e l'altra cosciente. Si giudica come artificiale un oggetto frutto dell'attività consapevole dell'uomo finalizzata a uno scopo e/o ad un utilizzo concreto, e lo si distingue da un oggetto naturale che è invece il prodotto dall'attività cieca del caso e della necessità: l'evoluzione (Darwin, 1859; Monod & Busi, 1970). Tenendo a mente i postulati fondamentali del metodo scientifico, secondo cui la natura è oggettiva e non proattiva, considerare gli organismi come oggetti di design engineering non significa, dunque, attribuire una progettazione premeditata della natura, bensì facilitare il confronto con le entità artificiali per l'individuazione di strette analogie di funzioni: slegando l'organismo dalla sua origine si passa alla considerazione delle sole forme, strutture e geometrie, nonché alla qualità delle sue prestazioni. Prendendo ad esempio l'occhio di un vertebrato e una macchina fotografica, e scindendoli nelle componenti principali, si noteranno profonde analogie: lenti, diaframma, otturatore, pigmenti fotosensibili; componenti analoghe che forniscono prestazioni simili. Questo, tuttavia, non preclude il riduzionismo, ovvero la riduzione delle proprietà di un organismo molto complesso alla mera somma delle proprietà delle sue parti. Un sistema complesso esibisce proprietà macroscopiche, cosiddette emergenti (Lewes, 1875; O'Connor, 1994), che difficilmente sono deducibili dalle leggi che governano le singole componenti, e ciò è vero non solo per gli organismi, ma anche per gli artefatti avanzati: un computer non può ridursi alla somma di singole parti elettroniche, elettriche, meccaniche, magnetiche e ottiche.

Consci di tali assunti e considerazioni, nella ricerca biunivoca gli organismi vengono trattati come prodotti ingegneristici avanzati, scomponibili in elementi e sistemi funzionali e.g. pattern, texture, forme, strutture. La selezione naturale ha agito fortemente sul fenotipo del disegno dei viventi, per cui essi risultano ben adattati e costruiti per i ruoli che svolgono nello specifico habitat e nicchia ecologica (Darwin, 1859). Diviene dunque prioritario conoscere habitat, stili di vita e filogenesi dell'organismo, per poi considerare le possibili caratteristiche manifeste di adattamento all'ambiente che possano rispondere a principi quali leggerezza, stabilità, robustezza, flessibilità, resistenza. Si mira, pertanto, a individuare i cosiddetti adattamenti diretti per cui forme, strutture, geometrie e prestazioni risultano ben determinate ad assolvere particolari funzioni o azioni legate al modo di vivere dell'organismo. Così agendo è possibile individuare strategie interessanti di ottimizzazione del bauplan degli organismi, in modo da minimizzare l'energia e i materiali da utilizzare per la loro genesi, crescita e mantenimento, che sono di fatto caratteristiche molto ambite per la progettazione di prodotti efficienti e maggiormente sostenibili.



[2. NUOVE TECNICHE E METODI DI STUDIO DEGLI ORGANISMI]

Considerando l'organismo come un oggetto di design engineering, esso può essere studiato e analizzato come tale. Le entità biologiche entrano nel mondo della progettazione sotto forma di disegni bidimensionali e tridimensionali per essere attentamente investigate, verificate e testate con tecniche digitali avanzate. La funzionalità e le prestazioni delle diverse componenti possono essere evidenziate tramite le più disparate tipologie di simulazioni digitali e.g. meccaniche, fluidodinamiche, magnetiche, termiche, elettriche ecc. Seguono dunque diverse fasi, che vanno dalla descrizione e analisi digitale di dettagli ed elementi dei modelli biologici a diverse scale dimensionali, all'individuazione e traduzione della strategia biologica in uno schema fisico-matematico inferenziale, sino alla realizzazione concreta (o sintesi) di tale schema in un prodotto bio-ispirato. (Speck et al., 2017). Oggi è possibile sviluppare tali iter progettuali grazie ai recenti avanzamenti tecnologici che consentono alta fedeltà nell'acquisizione dei modelli reali, maggiore affidabilità dei risultati delle simulazioni digitali e alta riproducibilità di modelli CAD complessi con tecniche di fabbricazione anch'esse digitalizzate (Sakao et al., 2009).

Modelli CAD 3D ad alto grado di fedeltà delle strutture naturali possono essere acquisiti utilizzando diverse tecniche quali, per esempio, fotogrammetria digitale automatica, scansione laser 3D e la più dettagliata tomografia e microtomografia computerizzata. Ogni tecnica differisce nel modello restituito per grado di dettaglio di scala, di caratterizzazione geometrica e volumetrica per cui la scelta della tecnica di acquisizione varia enormemente in relazione all'indagine che si vuole eseguire. La **fotogrammetria automatica** è una tecnica di *computer vision* che consente di creare un modello approssimato del mondo reale in formato CAD 3D partendo da immagini bidimensionali, quali fotografie digitali 2D (Linder, 2009). Rispetto alla fotogrammetria tradizionale, i processi di ricostruzione dei modelli tridimensionali sono oggi tutti automatizzati da specifici software (e.g. *Agisoft PhotoScan* e *3DF Zephyr*) che restituiscono direttamente le geometrie 3D CAD con risoluzione generalmente millimetrica. I **laser scanner 3D**, tipicamente suddivisi in distanziometrici o triangolatori, sono strumenti che permettono l'acquisizione diretta di modelli geometrici tridimensionali dei campioni a scale e risoluzioni che vanno dal centimetro al sub-millimetro. Ruotando il laser scanner attorno all'oggetto, esso rileva la posizione di centinaia di migliaia di punti che ne definiscono la superficie con dettagli e misure esatte. Sulla base della velocità di rilevamento e del passo delle rotazioni, è possibile controllare e determinare la risoluzione della scansione, ovverosia la densità dei punti rilevati a distanza definita, nonché la qualità dei dati acquisiti, che risulta generalmente più alta a rotazioni eseguite più lentamente (Badarnah & Kadri, 2015). La tomografia computerizzata fornisce, invece, maggiori dettagli e informazioni sul campione in esame tramite l'acquisizione di una serie di immagini in sezione di strutture, organi e tessuti sulla base della loro densità, rilevata grazie a un fascio di raggi X che attraversa il campione da diversi punti. La micro-tomografia tridimensionale è una forma miniaturizzata usata per piccoli campioni con una risoluzione dell'ordine dei 10 micron (Fig. 1). Riunendo le varie sezioni con appositi software di ricostruzione, è possibile ottenere il modello 3D geometrico (*geometry-based reconstruction*) e volumetrico del campione analizzato (*voxel-based reconstruction*) (Cattaneo, Dalstra, & Frich, 2001 et al., 2001; Hsieh, 2009).

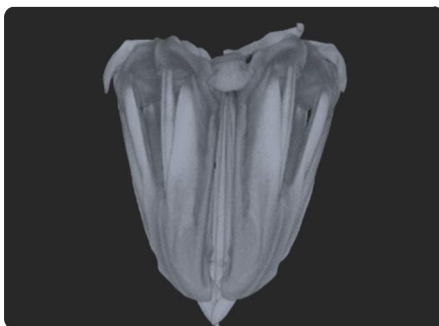


Fig 1. Microtomografia computerizzata della lanterna di Aristotele di *Paracentrotus lividus*.

Il campo della simulazione digitale, con il continuo sviluppo delle sue possibili applicazioni, sta perfezionando sempre più l'affidabilità delle sue prestazioni. Una delle tecniche fortemente promettenti per lo studio degli organismi biologici è la cosiddetta Analisi agli Elementi Finiti (FEA), che è in grado di ricostruire gli stati di sollecitazione e deformazione in strutture digitali. Sebbene tale tecnica sia altamente conosciuta e impiegata nel campo dell'ingegneria e delle scienze ortopediche da più di 30 anni, solo recentemente si è cominciato ad adottarla nel campo della zoologia e della paleontologia per rispondere a quesiti riguardanti morfologia, funzione ed evoluzione. Con l'uso di tale tecnica su modelli CAD acquisiti è possibile investigare e testare la funzione di una specifica caratteristica o dettaglio dell'organismo, nonché manipolare i modelli per esplorare l'effetto meccanico e funzionale del cambiamento morfologico virtuale effettuato. Per esempio, si può



investigare su quesiti di ottimizzazione, adattamento e costrizioni nella struttura scheletrica di un animale, testandone l'effetto di una modifica, di una aggiunta o rimozione di elementi strutturali che si sono evoluti in una linea fletica per decifrare il possibile risvolto adattativo del cambio evolutivo (Rayfield et al., 2001; Rayfield, 2007).

Il biologo aggiunge alle sue competenze l'elaborazione e la gestione di modelli digitali 3D, che sono estremamente utili alla comprensione degli organismi che indaga. Tali modelli, essendo inoltre fruibili a stampa 3D, possono essere riprodotti anche a scale ingrandite, per cui il biologo può visualizzare in maniera diretta dettagli microscopici che consentono una maggiore comprensione della possibile funzione. Tali modelli fisici risultano, inoltre, molto utili nel campo dell'attività didattica al supporto dei concetti e delle conoscenze esposte. Ulteriori tecniche disponibili in ricerca riguardano altresì i metodi del design di comunicazione, quali *sketch*, illustrazioni e modelli 2D realizzabili con software grafici che offrono supporto durante la preliminare analisi degli organismi, nella progettazione sperimentale e nella successiva fase di divulgazione dei risultati scientifici ottenuti. In particolare, i *nature model 2D* (costruzioni grafiche che riproducono dettagli e caratteristiche di elementi, di sistemi e di processi naturali) aiutano i ricercatori a schematizzare le conoscenze lungo tutta la fase di ricerca e progettazione, nonché a diffondere in modo chiaro le conoscenze acquisite nella comunità scientifica e non (Langella, La Tilla, & Perricone, 2019).

[3. VALORIZZAZIONE DEI RISULTATI DELLA RICERCA E FRUIZIONE DELLA RICERCA DI BASE]

Tramutando i risultati della ricerca biologica in prodotti funzionali, il design bio-ispirato riesce ad integrare l'attività scientifica nella vita delle persone, rendendole partecipi delle conquiste ottenute e beneficiandone in maniera diretta. La ricerca, che ha come obiettivo primario l'avanzamento della conoscenza e la comprensione della natura, viene qui convertita in ricerca applicata, concretizzandone i risultati in prodotti bio-ispirati. Grazie all'inserimento di tecnologie quali disegno digitale CAD 3D, *additive manufacturing* e simulazione con modelli matematici in grado di analizzare processo e prodotto in modo preciso, la ricerca biologica tradizionale muta in un vero e proprio motore di innovazione che risponde alle linee di sviluppo dell'Industria 4.0. Ciò ha importanti risvolti soprattutto nell'ambito dei programmi di investimenti in ricerca, per cui lo studio esplorativo, indotto dalla curiosità e dall'intuito del ricercatore, può ottenere un nuovo sviluppo e possibilità di supporto da aziende, enti e istituti pubblici e privati (Rosenberg, 2010). La ricerca biunivoca rientra, dunque, nei processi di valorizzazione e organizzazione della rete di ricerca industriale e trasferimento tecnologico, con il particolare obiettivo di massimizzare le ricadute di innovazione della ricerca di base sulla competitività produttiva e sulle effettive possibilità di industrializzazione. Su questa base, tale tipologia di ricerca mira a rispondere agli obiettivi e alle sfide prefissate dalle strategie europee (*Horizon 2020* e *Factories of the Future*) e nazionali (es. la Strategia Nazionale di Specializzazione Intelligente), rientrando nei piani di azione per la ricerca, lo sviluppo tecnologico e l'innovazione, strategici per la crescita e la competitività delle economie (https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation_it).

[4. BIOLOGIA NELL'INDUSTRIA 4.0]

Il termine Industria 4.0 indica un processo di digitalizzazione e automazione dei settori industriali che sancisce il loro passaggio nella cosiddetta quarta rivoluzione industriale. Dall'utilizzo di modelli e stampanti 3D alla programmazione di simulazione e fabbricazione dei prodotti, il digitale favorisce l'integrazione dei processi produttivi delle aziende, elevando all'ennesima potenza la qualità dei flussi produttivi e il *time to market* del loro business (Lasi et al., 2014).

Nell'Era 4.0 la biologia può, quindi, integrarsi nei processi digitalizzati e strettamente interconnessi della produzione industriale avanzata. Grazie allo sviluppo delle nuove tecnologie, i modelli biologici (dalla macro alla nanoscala) entrano nel processo digitale e si collegano al percorso di produzione divenendo essi stessi archetipi e/o guide per la genesi dei prodotti. Si viene così a creare un *continuum* logico e consequenziale nel passaggio dal reale al digitale e dal digitale al reale, coinvolgendo in maniera diretta le tecniche di acquisizione ad alta risoluzione biologiche con quelle proprie dell'Industria 4.0, e.g. la manifattura additiva, la robotica e tutte le nuove tecnologie che permettono di riprodurre in modo rigoroso, approfondito e funzionale le strategie della natura. Un esempio importante è l'*ELiSE Lightweight process*, che integra in modo automatico l'intero processo di trasferimento tecnologico dall'organismo al prodotto, ossia: screening e selezione dell'archetipo naturale, astrazione del modello, analisi FEM e ottimizzazione strutturale ed elaborazione della struttura finale del prodotto (Hamm, 2015). Bisogna tuttavia guardarsi dal cedere a un estremo automatismo bionico, distaccato e fin troppo immediato, che rischia di compromettere la progettazione creativa, propria sia del ricercatore nell'indagine biologica sia del designer nel processo generativo dei prodotti (Langella & Santulli, 2017). Ciò denota il rischio in cui biologi e designer divengono spettatori passivi del processo di trasferimento, per cui ogni automazione va regolata, salvaguardando a ogni stadio l'ingresso della componente creativa e intuitiva.



[5. BIOLOGI IBRIDI COME NUOVE FIGURE PROFESSIONALI]

Nel processo biomimetico risulta evidente come non sia sempre possibile affrontare ricerche complesse attraverso un singolo punto di vista o una sola prospettiva. La complessità progettuale è tale che risulta necessario affrontarla utilizzando una varietà di differenti approcci disciplinari. Di qui, la necessità di una cooperazione tra le discipline, ossia di interdisciplinarietà. Attualmente, lo sviluppo di progetti biomimetici è realizzato grazie alle ricerche interdisciplinari che coinvolgono più figure professionali quali biologi, designer e ingegneri. Tuttavia, le ricerche ibride ivi descritte evidenziano anche quanto non sia sufficiente esaminare il problema dall'ottica di molte discipline. Appare, piuttosto, indispensabile una integrazione delle discipline stesse, avvicinandosi sempre più al concetto di transdisciplinarietà (Nicolescu, 2003). Nella ricerca biunivoca, il biologo amplia le sue competenze scientifiche incrementando gli aspetti di prefigurazione, modellazione e simulazione digitale; così come il designer si avvicina al mondo della biologia e del metodo scientifico alla ricerca della comprensione della natura e, dunque, del trasferimento funzionale (Langella, 2018). La biunivocità richiede nuove figure professionali ibride che rispondano alle moderne esigenze, ossia superare i confini tra le discipline rendendole permeabili ed espandibili. Parafrasando le parole di Jean Piaget nel 1970, bisogna superare i limiti affinché la conoscenza possa espandersi oltre i confini disciplinari (Alvargonzález, 2011).

[CONCLUSIONE]

La ricerca biunivoca tra biologia e design offre importanti spunti di riflessione sulle metodologie attualmente riconosciute e condivise nei diversi campi del sapere, nonché ampi risvolti applicativi progettuali legati alla loro integrazione. Solo grazie alla scelta di un percorso di ricerca, progetto e sviluppo congiunto, ossia biunivoco, le due discipline hanno realmente la possibilità di lavorare insieme dal principio alla fine e ottenere risultati creativi con avanzamenti reciproci. Quella che si auspica è, tuttavia, una ibridazione disciplinare che non dovrà limitarsi alla mera collaborazione tra diverse discipline, ma che anzi dovrà procedere liberamente tra metodiche, tecniche e strumentazioni andando al di là dei confini stabili tra le discipline stesse.

Nell'era digitale, oltre al design, anche la biologia assume dunque un'ottica computazionale e produttiva. Il biologo tradizionale viene spinto in una nuova direzione progettuale creativa in cui le logiche naturali si trasformano in un prodotto fisico, validando e avvalorando le scoperte acquisite. Sorgono nuove opportunità per la ricerca di base, nuovi supporti economici, spazi e competenze, che proiettano la biologia verso un futuro sempre più promettente.

Ancor più importante è l'integrazione della biologia nei processi produttivi che intende portare nella quarta rivoluzione industriale, introducendo, oltre all'innovazione, anche un maggiore rispetto della natura. La biologia spinge a comprendere e a studiare sempre più a fondo il mondo che ci circonda, a imitarlo, ma soprattutto ad avere riguardo dei suoi limiti: sorgono domande dalle odierne necessità produttive e le risposte vanno trovate sempre più con risorse sostenibili e rinnovabili, cercando di non pretendere troppo dalla natura, utilizzando di più e meglio ciò che essa offre (Pauli, 2010). La biologia può insegnare a trarre soluzioni conformi ai sistemi naturali e ad apprezzare più a fondo l'importanza della biodiversità incoraggiandone la sua tutela. Essere capaci di vivere al meglio entro i limiti naturali è una delle grandi sfide del nostro secolo, ed è compito comune trovare le strategie più adatte a superarla.

[ECHINOIDDESIGN: RICERCA BIUNIVOCA APPLICATA AL RICCIO DI MARE]

Studio dei principi fisici e strutturali dell'endoscheletro degli echinoidi e il loro trasferimento nel settore industriale per la realizzazione di nuovi prodotti di design engineering bio-ispirati che rispondano alle linee di sviluppo dell'Industria 4.0.

Gli echinoidi, comunemente conosciuti come ricci di mare e dollari della sabbia, sono invertebrati bentonici appartenenti al phylum *Echinodermata* e diffusi in tutti gli habitat marini – dagli ambienti intertidali alle profondità oceaniche, dall'equatore ai poli – dove svolgono un ruolo ecologico chiave grazie alla loro attività di grazing (Boivin et al., 2018; Lawrence, 2001). Lo scheletro degli echinoidi si configura come una struttura complessa ad alto potenziale per il trasferimento biomimetico. La struttura è di origine mesodermica ed è composta da calcite CaCO_3 frammista a piccole quantità di MgCO_3 . Essa è contraddistinta da un arrangiamento poroso (stereoma) con spazi ripieni di cellule e fibre dermali (stroma), ed è differenziata in piastre scheletriche di varia tipologia e funzione, unite assieme a formare una teca compatta (Brusca & Brusca, 1996).

L'esclusivo design dello scheletro risponde a diversi principi quali: leggerezza, grazie all'arrangiamento poroso dello stereoma; stabilità e robustezza, dovute alla particolare disposizione delle piastre, alla maggiore densità dello stereoma e alla presenza di elementi di rinforzo e nervature nei punti in cui la sollecitazione meccanica è maggiore; flessibilità e resistenza, grazie allo stoma e ai legamenti flessibili



del tessuto connettivo tra le giunzioni che fungono anche da *stress-breaker* distribuendo le sollecitazioni fisiche e contribuendo così all'integrità dell'intero scheletro (Nebelsick et al., 2015; Knippers & Speck, 2012).

Biologicamente, la struttura risponde alle precise esigenze funzionali di questi organismi, che hanno la necessità di resistere sia a stress biotici (es. la predazione) sia abiotici (es. moto turbolento) cui sono sottoposti nell'ambiente acquatico (Lawrence, 2001). Eppure, tali strutture ottimizzate, che minimizzano l'energia e i materiali da utilizzare per la loro realizzazione, costituiscono dei nature model ideali per un trasferimento tecnologico intelligente che può trovare applicazione nei più svariati settori industriali dall'architettura all'ingegneria civile, dal biomedicale ai materiali. Lo scheletro degli echinoidi è stato fortemente considerato nel settore dell'architettura dal professor Jan Knippers. L'architetto, sulla base di studi pregressi, ha selezionato alcune caratteristiche funzionali di questi organismi e le ha tradotte in due diversi padiglioni temporanei in legno nel 2012 e nel 2015 presso l'*Institute for Computational Design* dell'Università di Stoccarda, nonché in un fabbricato realizzato con design computazionale: il *Landesgartenschau Exhibition Hall* (Knippers & Speck, 2012). Alcuni esempi interessanti di trasferimento al prodotto sono stati invece avanzati dal gruppo di ingegneri della *Jacobs School of Engineering*, Università di San Diego, in California, che, assieme a biologi marini esperti, hanno preso in considerazione la lanterna di Aristotele (l'apparato boccale) degli echinoidi regolari, per sviluppare un dispositivo utile alla raccolta di campioni di sedimento da installare su robot per l'esplorazione spaziale (Frank et al., 2016). Inoltre, la stessa lanterna è stata fonte di ispirazione anche per l'elaborazione di un dispositivo di biopsia per laparoscopia (Jelinek et al., 2014). La particolare struttura delle spine denota anch'essa rilevanti potenzialità per innovative applicazioni bio-ispirate altamente fruibili nel campo dei nuovi materiali (Moureaux et al., 2010; Presser et al., 2011; Tsafnat et al., 2012). Lo studio di Presser e dei suoi collaboratori, per esempio, effettuato sulle spine dei Cidaroidi *Phyllacanthus imperialis* e *Heterocentrotus mammillatus*, ha mostrato come lo specifico arrangiamento del materiale poroso, con diverse densità e architettura, consente a queste specie di realizzare strutture estremamente leggere e al contempo resistenti, i.e. modelli ideali per la realizzazione di nuovi materiali ceramici in alluminio (Presser et al., 2011). Particolarmente interessante risulta, infine, il lavoro Leigh et al. (2012) che ha riprodotto un materiale con micro-attuatori ispirati alle pedicellarie, ossia minute pinze presenti sull'epitelio degli echinoidi reattivi agli stimoli ambientali biotici e abiotici.

Gli echinoidi hanno molto da offrire al campo della biomimetica e, grazie alla loro alta valenza nel campo biologico ed ecologico, si prestano particolarmente a una ricerca biunivoca in grado di apportare avanzamento della conoscenza biologica, ecologica ed evolutiva di tali organismi, e innovazione dei processi e dei prodotti industriali. In tale contesto, la presente ricerca consiste in uno studio approfondito delle caratteristiche morfologiche e strutturali dello scheletro di *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816), allo scopo di acquisire nuove conoscenze specie-specifiche e identificare soluzioni innovative trasferibili per la realizzazione di prodotti bio-ispirati, in un'ottica propria di sviluppo 4.0. A tal fine, combinando tecniche avanzate di microscopia elettronica ad alta risoluzione (HR-SEM), Microtomografia computazionale (Micro-CT), modellizzazione 3D, simulazione e fabbricazione digitale, lo scheletro di *P.lividus* è stato analizzato e testato per comprenderne le caratteristiche funzionali. Le strategie strutturali così riconosciute sono state reinterpretate e trasferite per analogia di funzione nella progettazione di: 1) un tutore per l'immobilizzazione di arti soggetti a traumi, fratture composte o distorsioni e 2) un armonizzatore craniale per il trattamento della plagiocefalia.

[MATERIALI E METODI]

La ricerca ha preso in considerazione esemplari di *P. lividus* raccolti nel Golfo di Napoli. Sulla base delle diverse caratteristiche e ruoli funzionali, lo scheletro degli organismi è stato scomposto e analizzato in tre diverse componenti: 1) teca; 2) lanterna di Aristotele e 3) appendici. L'analisi è stata effettuata a diverse scale dimensionali utilizzando stereomicroscopio, microscopio elettronico a scansione (HR-SEM) e microtomografia a raggi X (Micro-CT) allo scopo di visualizzare le caratteristiche morfologiche e la variabilità intraspecifica della macro e microstruttura di ciascun componente.

Particolare attenzione è stata data alla teca che ha funzione di sostegno e protezione degli organi viscerali degli echinoidi. Questa deve essere abbastanza robusta da sopportare forze e momenti che agiranno su di essa, ma anche flessibile per consentire crescita e spostamento. Tale complesso scheletrico è di conseguenza in larga parte un problema di ingegneria sul quale è possibile applicare nozioni di meccanica strutturale per ricavarne opportune indicazioni su comportamento e funzione. Ad opera degli ingegneri dottor F. Marmo, G. Boccia e professor L. Rosati del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università Federico II di Napoli, la teca di *P.lividus* è stata investigata con l'obiettivo di individuare il possibile significato meccanico della suddivisione in piastre.

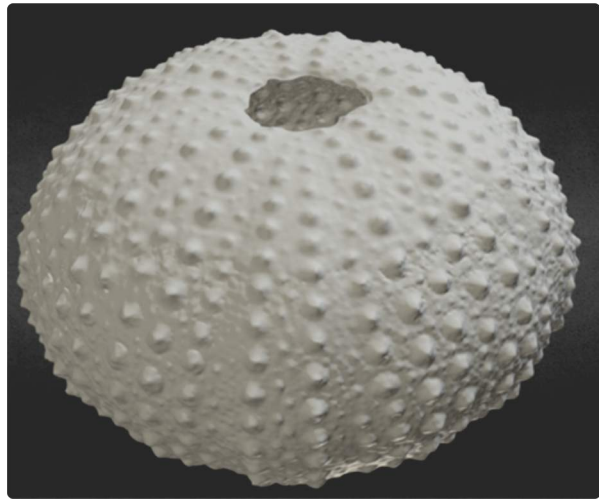


Fig. 2 Acquisizione fotogrammetrica della teca di *P.lividus*.

In particolare, usando la fotogrammetria, sono stati ricostruiti due modelli di teca di *P.lividus* in formato CAD 3D (Fig. 2): (1) uno monolitico, caratterizzato da rigidità a flessione omogenea e (2) uno modulare, nel quale la struttura è divisa in piastre esagonali unite da suture semiflessibili (condizione corrispondente al caso reale di *P.lividus*). I due modelli sono stati indagati con l'analisi agli elementi finiti (FEA) che permette di esaminare e comparare la distribuzione dello stato di sforzo e di deformazione generata all'interno delle strutture in risposta a una definita condizione di carico. I parametri meccanici associati a entrambi i modelli sono stati caratterizzati da test fisici a flessione su tre punti effettuati su singola piastra e sistemi di due e tre piastre di campioni di *P.lividus*, condotti dal professor A. Gloria presso l'Istituto per i Polimeri, Compositi e Biomateriali (IPCB) – Consiglio Nazionale di Ricerca di Napoli. Sulla base degli adattamenti strutturali individuati nella teca, sono stati elaborati due diversi concept di prodotti biomedicali, ossia un tutore e un armonizzatore craniale. I prodotti sono stati progettati con software di modellazione CAD 3D e design parametrico *Rhinoceros-Grasshopper*, riproducendo geometrie e caratteri funzionali della biostruttura secondo analogie di funzione.

[RISULTATI E INTERPRETAZIONE FUNZIONALE AL TRASFERIMENTO BIOMIMETICO]

Le indagini eseguite in Micro-CT e SEM su *P.lividus* hanno mostrato la complessa architettura e l'alta variabilità dalla macro e microstruttura. Teca, lanterna di Aristotele e appendici indicano alla macroscale una propria organizzazione gerarchica e scomponibilità in diversi altri sub-componenti, nonché notevoli proprietà interessanti al trasferimento biomimetico (vedi schede tecniche). Alla microsca, il materiale scheletrico tende ad aumentare di densità nelle regioni soggette a maggiore stress meccanico (soprattutto quelle sottoposte a compressione), e a specializzare nella microstruttura (stereoma a galleria) nelle zone soggette a forze direzionali, come nelle suture. In *P.lividus*, e negli altri echinoidi, si distinguono infatti le tipologie principali di strutture stereomiche, ossia: non perforato, microperforato, a galleria, rettilineo, fascicolare, labirintico (Smith, 1980, 1990). Tale differenziazione della microstruttura risulta essere correlata alle diverse funzioni assolute dagli elementi scheletrici e alle diverse aree in cui viene analizzata, per cui differisce altamente anche all'interno di una singola piastra (Fig. 3), di una singola spina (Grossmann & Nebelsick, 2013) e negli ossicoli della lanterna di Aristotele (Carnevali, Bonasoro, & Melone, 1991).

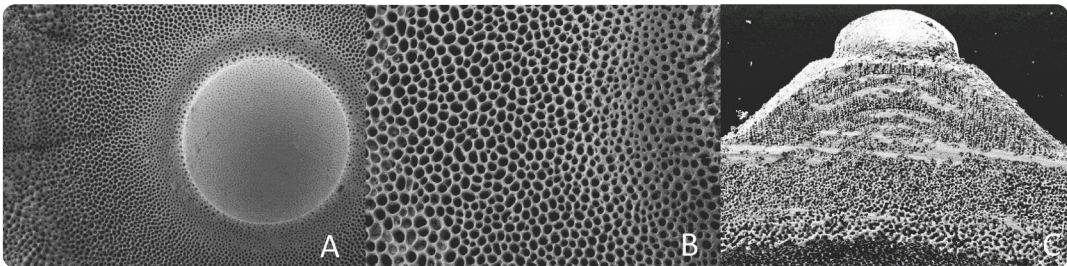


Fig 3. A) Tubercolo della piastra interambulacrale di *P.lividus*, B) dettaglio della differenziazione dello stereoma e C) sezione trasversale.

Lo **stereoma** rappresenta, di fatto, un elemento chiave dello scheletro degli echinoidi che permette di rispondere a diversi principi strutturali quali: **leggerezza**, grazie all'elevata porosità; **stabilità** e **robustezza**, dovute alla maggiore densità e variabilità topologica dello stereoma, che segue l'intensità e la direzionalità nei punti in cui la sollecitazione meccanica è maggiore. L'incredibile architettura



porosa dello stereoma può essere presa come modello di ispirazione funzionale per lo sviluppo tecnologico in numerosi ambiti applicativi, quali: socche e *scaffold* strutturalmente ottimizzati, la cui porosità gerarchica potrebbe fungere da modello anche per nuovi sistemi di filtraggio e sistemi ad alta permeabilità. Le strutture porose sono di alto interesse per l'ingegneria del tessuto osseo e per il *bioprinting* 3D, ossia la stampa di scaffold 3D utilizzati come supporto alla formazione del tessuto e all'attaccamento iniziale delle cellule, nonché per riparare le protesi attraverso l'osteointegrazione. I migliori scaffold sono quelli dotati di: buona porosità, in grado di simulare il tessuto; resistenza meccanica, per offrire protezione e supporto; permeabilità, per dirigere il trasporto di sostanze nutritive; ampia area superficiale, da destinare alla crescita cellulare (Rider *et al.*, 2018).

Lo **stroma** presente in ogni elemento nei pori dello stereoma assume tuttavia un ruolo prioritario nell'integrità dell'intero scheletro, fornendo i principi fondamentali di **flessibilità e resistenza** strutturale. In particolare, la componente organica 1) comporta maggiore resistenza meccanica dello scheletro (Ellers, Johnson, & Moberg, 1998); 2) funge da stress-breaker, interrompendo la propagazione delle fratture grazie alla discontinuità a materiali di consistenza diversa (stroma : stroma= rigido : elastico); 3) determina una maggiore e rinforzo strutturale tra le diverse componenti e sub-componenti, come ad esempio i legamenti flessibili del tessuto connettivo nelle suture tra le piastre della teca (Ellers *et al.*, 1998); 4) sostiene e ripara la struttura minerale (Gilbert & Wilt, 2011). Innesti tra materiali diversi, grazie alla loro particolare capacità di ostacolare la propagazione delle fratture, possono dunque essere presi in considerazione nel ridesign di veicoli automobilistici, nautici, aereospaziali così come in molti altri ambiti ancora, ad esempio costruzioni edili più resilienti, imballaggi funzionali, caschi e protezioni.

Lo studio effettuato sulla **teca** ha mostrato, invece, come l'organizzazione strutturale della teca di *P.lividus* sia capace di ridurre di un ordine di grandezza gli stress puntuali rispetto a una struttura monolitica. La comparazione ha indicato come l'organizzazione modulare della struttura, caratterizzata da una strategica suddivisione in piastre e da suture parzialmente flessibili, favorisca una sensibile riduzione dell'energia di sforzo agente su di essa, riducendo così anche la probabilità di una rottura locale e un eventuale catastrofico crollo globale. La strategia della teca di *P.lividus* garantisce così un'alta integrità e stabilità strutturale ed è per questo che si è scelto di trasferirla al progetto di due diversi dispositivi biomedicali: un tutore e un armonizzatore craniale. Forme, strutture e principi biologici sono stati così reinterpretati secondo analogia di funzione, e riprodotti in parametrico nei modelli CAD 3D dei dispositivi in modo tale da rispondere a specifiche esigenze di innovazione espresse dall'azienda e dal mercato, ossia: 1) **maggiore leggerezza**, data dall'arrangiamento poroso; 2) **alta resistenza e stabilità**, acquisita tramite la riproduzione di una struttura suddivisa in piastre esagonali con incastri parzialmente flessibili; 3) **traspirabilità**, fornita dall'elevata porosità strutturale e dalla suddivisione modulare che riduce la presenza di spazi chiusi; 4) **libera customizzazione**, data dall'alta versatilità di forme e geometrie ottenibili in progettazione e fabbricazione digitale e 5) **riduzione dei costi**, ripetitività di uno o pochi moduli standardizzati riproducibili con l'uso di stampa 3D.

[IL TUTORE]

Il tutore è un dispositivo medico la cui funzione è, in genere, quella di garantire immobilizzazione, protezione e supporto di un'articolazione colpita da traumi, fratture composte o distorsioni. Il tutore sviluppato nell'ambito della presente ricerca sfrutta principi bio-ispirati alla micro e macrostruttura degli echinoidi per la sua ottimizzazione strutturale e maggiore funzionalità. Utilizzando il software *Rhinoceros* annesso al suo *plug-in Grasshopper*, con algoritmi parametrici/generativi, sono stati riprodotti in un modello tridimensionale del tutore: 1) la porosità gerarchica, che determina **maggiore leggerezza e traspirabilità** strutturale e 2) la suddivisione in moduli esagonali dagli incastri semiflessibili per un'**alta resistenza e stabilità strutturale** (Fig. 4). Sulla base della radiografia del paziente, la trama bio-ispirata così creata viene infittita automaticamente nella regione in cui è localizzata la frattura e sfoltita nelle aree non funzionali, aumentandone leggerezza e traspirabilità a livello cutaneo. Il tutore è realizzato con l'uso della stampa 3D in materiale MED610 (già altamente adoperato in campo medico) che conferisce maggiore solidità strutturale, permeabilità e possibilità di personalizzazione di colore. Il prodotto finale, rispetto al normale gesso tipicamente utilizzato in ambito medico, risulta essere, quindi, un tutore customizzabile molto più traspirante; resistente; totalmente immergibile in acqua; leggero, aperto e poco ingombrante; igienico e conforme alle esigenze ergonomiche paziente.

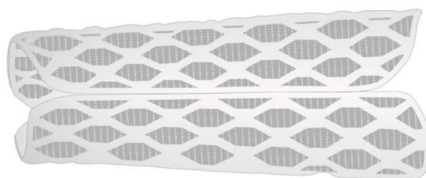
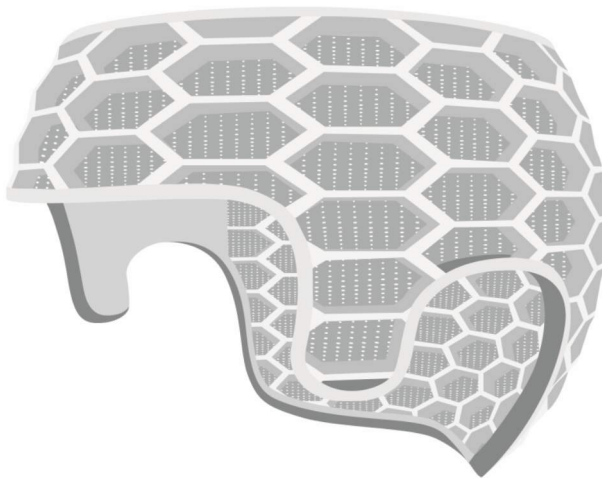


Fig. 4 Tutore bioispirato alla teca di riccio di mare *Paracentrotus lividus* leggero, resistente e semiflessibile.



[ARMONIZZATORE CRANIALE]

L'armonizzatore craniale è un dispositivo medico utilizzato nel trattamento della plagiocefalia, un'anormalità anatomica del cranio tipica degli infanti. L'ortesi craniale agisce in modo da consentire la crescita nelle aree non conformi e inibirli nelle zone eccessivamente prominenti, determinando così una passiva armonizzazione della testa. Le ortesi tradizionali previste per tale trattamento sono generalmente ingombranti e l'intera struttura, assieme all'imbottitura interna, risulta poco traspirante, pesante e vincolante al movimento della testa del bambino. È stato così sviluppato un nuovo armonizzatore craniale bio-ispirato alla strategia strutturale del riccio per incrementare **leggerezza e traspirabilità** della struttura, mantenendola al contempo solida e stabile per il corretto funzionamento del trattamento. Il modello dell'ortesi è stato generato utilizzando il software *Rhinoceros-Grasshopper*, riproducendo la porosità gerarchica e la suddivisione in moduli esagonali dagli incastrati semi flessibili (Fig. 5). Tale modello si adatta al calco cranico digitale ottenuto con scanner 3D che riproduce fedelmente il cranio e la deformità del piccolo paziente. Il prodotto finale così progettato viene fabbricato con stampa 3D e si concretizza, dunque, in una nuova ortesi su misura più traspirante, resistente, leggera, poco ingombrante, ed economica rispetto alle ortesi craniche oggi presenti sul mercato.



Ortesi craniale bioispirata alla teca di riccio di mare *Paracentrotus lividus*. Progetto di prodotto realizzato per rispondere alla necessità emergente di aumentare la traspirabilità e la leggerezza delle ortesi attualmente in commercio.

[CONCLUSIONE]

I risultati ottenuti sulla specie *P.lividus* hanno mostrato l'estrema complessità dello scheletro degli echinoidi regolari ed evidenziato diverse strategie strutturali. Le indagini effettuate sono state utili per comprendere in modo più approfondito la morfologia e le caratteristiche adattative degli echinoidi, che possono essere altresì trasferite alla progettazione di diversi prodotti attraverso i processi di bioispirazione. In particolare, lo studio dimostra come la variabilità della porosità e la divisione modulare dello scheletro degli echinoidi, associato a uno strategico uso di giunzioni flessibili e legamenti di collagene, sono soluzioni altamente funzionali per incrementare resistenza, flessibilità, leggerezza e adattabilità della struttura scheletrica. Queste caratteristiche rappresentano soluzioni ideali nell'ambito del redesign di svariati prodotti industriali. Sono stati qui riportati due possibili trasferimenti in dispositivi medicali complessi, quali il tutore e l'ortesi craniale, in continua evoluzione sul mercato per rispondere sempre meglio alle esigenze degli utenti. La presente ricerca dimostra quindi, in modo pratico ed effettivo, la validità del contributo biomimetico nella rapida innovazione di processo e di prodotto nei settori manifatturieri, così come il valido supporto alla ricerca biologica nello studio degli organismi.

[RIFERIMENTI]

- Alvargonzález, D. (2011). Multidisciplinarity, interdisciplinarity, transdisciplinarity, and the sciences. *International Studies in the Philosophy of Science*, 25(4), 387-403.
- Badarnah, L., & Kadri, U. (2015). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, 58(2), 120-133.
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 83-94.
- Benyus J. M. (2002). *Biomimicry*. New York: Harper Collins.



- Boivin, S., Saucède, T., Laffont, R., Steimetz, E., & Neige, P. (2018). Diversification rates indicate an early role of adaptive radiations at the origin of modern echinoid fauna. *PLOS ONE*, 13(4)
- Brusca Richard C., & Brusca Gary J. (1996) *Invertebrates*. Modena, Italy: Zanichelli 22, 873-911
- Carnevali, M. D. C., Bonasoro, F., & Melone, G. (1991). Microstructure and mechanical design in the lantern ossicles of the regular sea-urchin *Paracentrotus lividus*: A scanning electron microscope study. *Italian Journal of Zoology*, 58(1), 1-42.
- Cattaneo, P. M., Dalstra, M., & Frich, L. H. (2001). A three-dimensional finite element model from computed tomography data: a semi-automated method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 215(2), 203-212.
- Darwin, C. (1859). *L'origine della specie*. Torino, Italia: Bollati Boringhieri
- Ellers, O., Johnson, A. S., & Moberg, P. E. (1998). Structural strengthening of urchin skeletons by collagenous sutural ligaments. *The Biological Bulletin*, 195(2), 136-144.
- Frank, M. B., Naleway, S. E., Wirth, T. S., Jung, J. Y., Cheung, C. L., Loera, F. B., & McKittrick, J. (2016). A protocol for bioinspired design: A ground sampler based on sea urchin jaws. *Journal of visualized experiments: JoVE*, (110).
- Gilbert, P. U. P. A., & Wilt, F. H. (2011). Molecular aspects of biomineralization of the echinoderm endoskeleton. In *Molecular Biomineralization* (pp. 199-223). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Grossmann, J.N., & Nebelsick, J.H. (2013) Stereom Differentiation in spines of *Plococidaris verticillata*, *Heterocentrotus mammillatus* and other regular sea urchins. In: Johnson, C. (Ed) Echinoderms in a changing World. Proceedings of the 13th International Echinoderm Conference (pp. 97-104) London, UK: Tasmania, CRC Press.
- Hamm, C. (2015) *Evolution of Lightweight Structures. Analyses and Technical Applications*. Netherlands: Springer.
- Helms, M. E., Vattam, S. S., Goel, A. K., Yen, J., & Weissburg, M. (2008). Problem-driven and solution-based design: twin processes of biologically inspired design.
- Hsieh, J. (2009). *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*. Bellingham, WA: SPIE.
- Jelinek, F., Goderie J., van Rixel A., Stam D., Zenhorst J., & Breedveld, P. (2014). Bioinspired crown-cutter-The impact of tooth quantity and bevel type on tissue deformation, penetration forces, and tooth collapsibility. *J. Med. Devices*. 8 (4), 1-6
- Knippers J., & Speck T. (2012) - Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspir. Biomim.*, 7: 015002
- Langella, C. (2007) *Hybrid design. Progettare tra tecnologia e natura*. Milano: Franco Angeli, pp. 15-29.
- Langella, C. (2012) Collaborative intersections. *Confluenze creative*. In Langella C., Ranzo, P. *Design Intersections. Il pensiero progettuale intermedio* (pp. 23-41). Milano, Italy: Franco Angeli.
- Langella, C., & Santulli, C. (2017) Processi di crescita biologica e Design parametrico. *MD Journal*, 14.
- Langella, C. (2018). Ibridazioni materiche. Intersezioni tra design, chimica e biologia. In Lucibello S. (Ed), *Esperimenti di design ricerca e innovazione con e dei materiali* (pp. 111-125). Trento, Italy: LISTlab
- Langella, C., La Tilla, V., & Perricone, V. (2019) *Design for Visualization of science*. Milan, Italy: Digicult - Digital Art, Design & Culture
- Lawrence H.M (2001) *Edible Sea Urchins: Biology and Ecology*. London, UK: Elsevier.
- Leigh, S. J., Bowen, J., Pursell, C. P., Covington, J. A., Billson, D. R., & Hutchins, D. A. (2012). Rapid manufacture of monolithic micro-actuated forceps inspired by echinoderm pedicellariae. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(4), 044001.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.
- Lawrence, J. M. (2001). *Edible sea urchins: biology and ecology*. Amsterdam: Elsevier.
- Lewes, G. H. (1875). *Problems of Life and Mind*. London: Kegan Paul, Trench, Turbner, and Co.
- Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry*. Berlin: Springer.
- Monod, J., & Busi, A. (1970). *Il caso e la necessità: saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea*. Milano: Mondadori.
- Moureaux C, Pérez-Huerta A, Compère P, Zhu W, Leloup T, Cusack M, Dubois P (2010) Structure, composition and mechanical relations to function in sea urchin spine. *J Struct Biol*, 170:41-49
- Nebelsick, J.H., Dynowski, J.F., Grossmann, J.N., & Tötze, C. (2015) Echinoderms: hierarchically organized light weight skeletons. In Hamm, C. (ed) *Evolution of light weight structures. Analyses and technical applications* (pp. 141-154). Dordrecht: Springer.
- Nicolescu, B. (2003). Definition of transdisciplinarity. *Rethinking Interdisciplinarity*, 29.
- O'Connor, T. (1994). Emergent properties. *American Philosophical Quarterly*, 31(2), 91-104.
- Pauli, G. A. (2010). *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Boulder, Colorado: Paradigm publications.
- Presser, V., Schultheiß, S., Kohler, C., Berthold, C., Nickel, K. G., Vohrer, A., ... & Stegmaier, T. (2011).



Lessons from nature for the construction of ceramic cellular materials for superior energy absorption. *Advanced Engineering Materials*, 13(11), 1042-1049.

Rayfield, E. J., Norman, D. B., Horner, C. C., Horner, J. R., Smith, P. M., Thomason, J. J., & Upchurch, P. (2001). Cranial design and function in a large theropod dinosaur. *Nature*, 409(6823), 1033.

Rayfield, E. J. (2007). Finite element analysis and understanding the biomechanics and evolution of living and fossil organisms. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 541-576.

Rider, P., Kačarević, Ž. P., Alkildani, S., Retnasingh, S., & Barbeck, M. (2018). Bioprinting of tissue engineering scaffolds. *Journal of tissue engineering*, 9.

Rosenberg, N. (2010). Why do firms do basic research (with their own money)? In Rosenberg, N. (Ed) *Studies On Science And The Innovation Process: Selected Works of Nathan Rosenberg* (pp. 225-234). World Scientific Pub Co Inc.

Sakao, T., Shimomura, Y., Sundin, E., & Comstock, M. (2009). Modeling design objects in CAD system for service/product engineering. *Computer-Aided Design*, 41(3), 197-213.

Smith, A. B. (1980). Stereom microstructure of the echinoid test. *Paleontology*, 25, 1-81.

Smith, A. B. (1990) Biom mineralization in Echinoderms. In: Carter JG (ed) *Skeletal biomineralization: Patterns, process and evolutionary trends* (pp 413-443). New York: Van Nostrand Rheinhold.

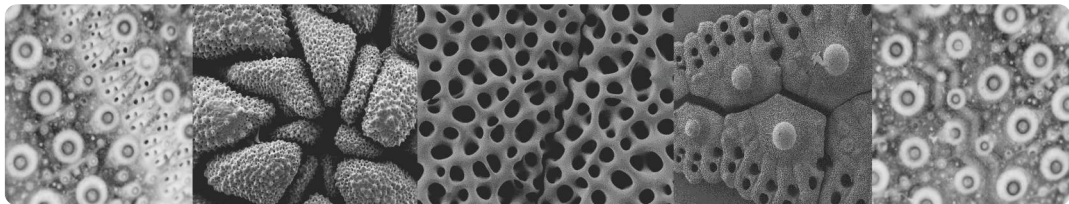
Speck, O., Speck, D., Horn, R., Gantner, J., & Sedlbauer, K. P. (2017). Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments. *Bioinspiration & biomimetics*, 12(1), 011004.

Tsafnat N, Fitz Gerald JD, Le HN, Stachurski ZH (2012) Micromechanics of sea urchin spines. *PLoS One* 7(9):e44140.

Wainwright S. A., Biggs W. D., Currey J. D., Gosline J. M., (1976) *Mechanical design in organism*. London, UK: Edward Arnold Publishers.

[SCHEDE TECNICHE DELLE COMPONENTI FUNZIONALI E POTENZIALE BIOMIMETICO]

[TECA]



Descrizione – La teca di *P. lividus* ha una forma semisferica, a simmetria radiale. Si distinguono numerose piastre organizzate in quattro sistemi pentameri: 1) **sistema coronale**, composto da 10 aree meridiane suddivisibili in 5 aree interambulacrali, che sorreggono aculei e pedicellarie, e 5 aree ambulacrali, perforate da pori per il passaggio di pedicelli ambulacrali; 2) **sistema apicale**, con 5 piastre genitali, alternate a 5 piastre oculari più piccole e il madreporite; 3) **sistema periproctale**, con piastre embricate disposte in cerchi irregolari che ricopre la membrana sulla quale si apre l'ano; 4) **sistema peristomatico** formato da piastre più o meno numerose che proteggono la membrana compresa tra il margine adorale della corona e la bocca [1].

Funzione – Protezione degli organi viscerali e sostegno meccanico.

Dettagli funzionali e proprietà trasferibili:

- **Suddivisione in piastre.** La teca degli echinoidi è una struttura modulare suddivisa in piastre, ognuna con diversa forma e funzione [2], che dona agli organismi maggiore flessibilità durante la crescita e maggiore resistenza strutturale.
- **Disposizione delle piastre.** Le piastre sono disposte in modo tale che un massimo di tre si intersechino in un nodo, formando i cosiddetti "vertici trivalenti" ben noti in natura, che conferiscono maggiore stabilità e resistenza all'intera struttura [2][3].
- **Giunzioni flessibili.** Il collegamento tra le piastre è caratterizzato da una serie di protrusioni digitiformi, che si incastrano le une con le altre, e da fibre di collagene, che uniscono le piastre come delle vere e proprie cuciture organiche. L'azione delle fibre di collagene permette di dissipare le forze normali, di taglio e flessionali, aumentando la stabilità della struttura [4][5].

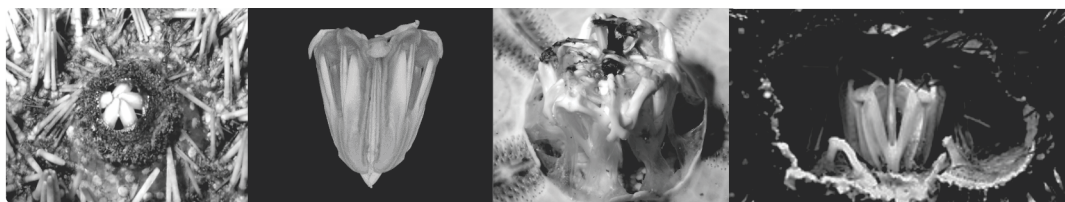
1. Allasiaz, A. (1991). *Paleontologia generale e sistematica degli invertebrati*. Genova, Italy: ECIG 2. Nebelsick, J.H., Dynowski, J.F., Grossmann, J.N., & Tötze, C. (2015) Echinoderms: hierarchically organized light weight skeletons. In Hamm, C. (ed) *Evolution of light weight structures. Analyses and technical applications* (pp. 141-154). Dordrecht: Springer.
3. Wester, T. (2002) Nature teaching structures. *Int J Space Struct* 17:135-147
4. Ellers, O., Johnson, A. S., & Moberg, P. E. (1998). Structural strengthening of urchin skeletons by collagenous sutural ligaments. *The Biological Bulletin*, 195(2), 136-144.
5. Wainwright, S. A., Biggs, W. D., Currey, J. D., & Gosline, J. M. (1976) *Mechanical design in organism*. London, UK: Edward Arnold Publishers.



Ispirazioni biomimetiche:

Le caratteristiche funzionali della teca risultano particolarmente utili per la progettazione di strutture stabili, resistenti, flessibili e adattabili da destinarsi a svariati settori industriali dall'architettura, all'*automotive*, al *packaging*, al biomedicale. La modularità ha molti benefici nel campo del design, quali: riduzione dei costi di produzione (ripetibilità di uno o pochi moduli e standardizzazione); flessibilità; libero aumento o riduzione in scala (aggiungendo o rimuovendo moduli); versatilità (nuove soluzioni per aggiunta di moduli diversi). I vertici trivalenti sono elementi validi e facilmente riproducibili nella progettazione (specialmente parametrica) di strutture stabili e robuste. Le giunzioni, con le loro forme e strutture, possono invece essere fonte di ispirazione per incastri reversibili e irreversibili dotati di ampia resistenza e alto grado di flessibilità.

[LANTERNA DI ARISTOTELE]



Descrizione - La lanterna di Aristotele è un emblema biologico di perfetta interazione tra forma-funzione. Essa rappresenta il peculiare sistema scheletrico dell'apparato boccale degli echinoidi regolari, che risulta invece ridotto o totalmente assente negli irregolari. Presenta una simmetria pentaraggiata e rappresenta un sistema meccanico integrato, formato da diverse sub-componenti articolate. È infatti composta da dieci semi-piramidi saldate in corrispondenza degli interambulacri a due a due, che formano 5 piramidi. Le piramidi sono collegate fra loro da fibre muscolari e da ossicoli calcarei (le rotule), al di sopra dei quali si trovano altri ossicoli sottili, bilobati e leggermente ricurvi (i compassi). Ogni semi-piramide è composta da un'epifisi articolata lateralmente alla rotula. In totale le sub-componenti articolate del sistema della lanterna possono essere riassunte in 40 elementi: 5 denti, 10 semi-piramidi, 10 epifisi, 5 rotule, 5 compassi doppi [1] [2]. I movimenti della lanterna sono regolati da un complesso sistema di muscoli. I più importanti sono: i muscoli protrattori, che si inseriscono sulle epifisi e sulle zone interambulacrali; i muscoli retrattori, che si inseriscono sulle sporgenze interne delle piastre ambulacrali che circondano il peristoma, dette auricole, e sull'estremità inferiore delle piramidi; i muscoli inter-piramidali, che si innestano invece tra le facce laterali delle piramidi [1].

Funzione - Strumento di presa del cibo; raschiamento e scavo del substrato; supporto utile nella deambulazione.

Dettagli funzionali e proprietà trasferibili:

- **Suddivisione in sub-componenti articolate.** La lanterna risulta ben suddivisa in diverse componenti complementari legate da articolazioni bivalenti che incrementano al contempo sia la resistenza della struttura sia la sua capacità di deformazione e adattamento. Si tratta di uno strategico adattamento della struttura per rispondere all'eccessivo stress meccanico [2].
- **Forma, struttura e materiali dei denti.** I denti sono gli elementi soggetti a maggior stress meccanico della lanterna, dato il loro diretto impatto sul substrato. Presentano strategie funzionali per resistere alle forze normali, di taglio e ai momenti, grazie alla particolare forma e ai materiali utilizzati [2][3][4][5]. Macroscopicamente la forma del dente è ricurva e simile alla chiglia di una nave, la sezione infatti è a forma di T, e ciò ne incrementa la robustezza strutturale. I denti sono costituiti da particolari materiali compositi, straordinariamente simili a quelli artificiali, costituiti da una matrice omogenea e una fibrosa lamellare. La componente lamellare (piastre primarie) è distribuita nelle zone di massimo stress di compressione, mentre gli elementi fibrosi (prismi) nelle zone soggette a trazione[2][3][4][5]. I denti sono caratterizzati da una serie di piastre, che vanno una dopo l'altra a

[1] Allasinaz, A. (1991). Paleontologia generale e sistematica degli invertebrati. Genova, Italy: ECI

[2] Carnevali, M. D. C., Bonasoro, F., & Melone, G. (1991). Microstructure and mechanical design in the lantern ossicles of the regular sea-urchin *Paracentrotus lividus*: A scanning electron microscope study. *Italian Journal of Zoology*, 58(1), 1-42.

[3] Märkel, K., Gorny, P., & Abraham, K. (1977). Microarchitecture of sea urchin teeth. *Fortschr. Zool.*, 24: 103-114.

[4] Stock, S. R. (2014). Sea urchins have teeth? A review of their microstructure, biomineralization, development and mechanical properties. *Connective tissue research*, 55(1), 41-51.

[5] Wainwright, S. A., Biggs, W. D., Currey, J. D., & Gosline, J. M., (1976) *Mechanical design in organism*. London, UK: Edward Arnold Publishers.

[6] Killian, C. E., Metzler, R. A., Gong, Y., Churchill, T. H., Olson, I. C., Trubetskoy, V., & Mahamid, J. (2011). Self-Sharpening Mechanism of the Sea Urchin Tooth. *Advanced Functional Materials*, 21(4), 682-690.

Candia Carnevali, M. D., Lanzavecchia, G., Melone, G., Celentano, F. C., & Andrietti, F. (1988). Aristotle's lantern in the regular sea urchin *Paracentrotus lividus*. II. Biomechanical approach to the interpretation of movement. *Echinoderm Biology*. Rotterdam: Balkema, 663-672.



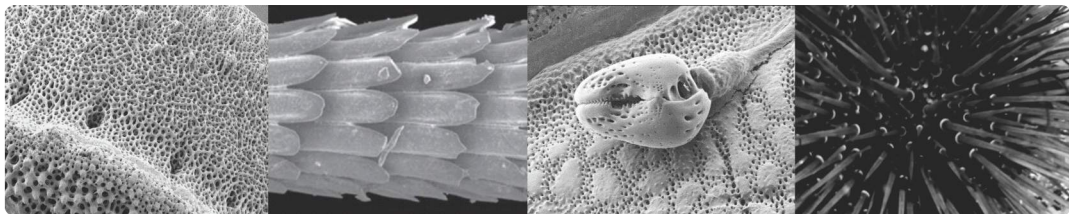
sostituirsi dopo essersi consumate. Mediante tale meccanismo di *self-sharpening*, la parte terminale dei denti viene mantenuta sempre affilata ed efficiente [6].

• **Sistema muscolare.** I muscoli antagonisti protrattori e retrattori consentono di protrudere o ritirare la lanterna all'interno o all'esterno della teca, mentre i muscoli interpiramidali ne determinano la sua apertura e chiusura. I retrattori tuttavia hanno un importante ruolo anche nel processare il cibo e nel meccanismo di apertura della lanterna. La lanterna può ampiamente muoversi o inclinarsi lungo il suo asse verticale, mentre il movimento di rotazione è limitato dalla membrana peristomiale. La relazione tra forza e lunghezza dei muscoli influisce sulla mobilità della lanterna. Maggiore mobilità consente maggiore adattabilità al substrato e ciò si dimostra particolarmente utile per il *grazing* algale che avviene solitamente su substrati topologicamente articolati[7].

Ispirazioni biomimetiche:

Le strategie adattative della lanterna di Aristotele sono numerose e nel loro complesso offrono un'ampia gamma di ispirazioni per strutture dotate di alta resistenza, leggerezza, libertà movimento e *gripping* a selettività variabile (legato alla forma e alla particolare chiusura rotata dei denti). Per analogia di funzione con l'attività di *grazing*, la lanterna potrebbe ad esempio essere considerata per la realizzazione di bracci robotici da agricoltura caratterizzati da un maggior grado di libertà di movimento, adattabilità al substrato e abilità di *gripping*. Materiali, forma e struttura dei denti risultano invece validi elementi di ispirazione per la realizzazione di nuovi materiali e artefatti bioispirati dotati di principi di alta resistenza e auto-affilamento.

[APPENDICI]



Descrizione - Le appendici sono elementi scheletrici congiunti e articolati sulla superficie della teca tramite tubercoli. Questi possono essere ricondotti a tre tipologie principali: sferidia, spine e pedicellarie.

Le sferidia sono minuti steli terminanti in una sfera, generalmente distribuiti nella regione adorale e in solchi della sutura perradiale [1].

Le spine degli echinoidi, dette anche aculei o radioli, si differenziano molto da specie a specie. Alcune sono lunghe, cave, sottili e appuntite, simili ad aghi, come in *P. lividus*, altre invece sono spesse cilindriche o appiattite, lunghe o corte, striate o variamente ornate. In alcune specie le spine sono dotate di sostanze velenose. La loro funzione è di difesa, di scavo, di riduzione dell'energia del moto ondoso e di locomozione [2].

Le pedicellarie sono invece minute appendici muscolari rese rigide da spicole calcaree e fissate su piccoli tubercoli. Il capo a forma di pinza si presenta mobile e specializzato nella presa, difesa e pulizia. Negli echinoidi si possono trovare 4 differenti tipologie: 1) **globicefale**, hanno forme diverse e sono caratterizzate da ghiandole velenose, valve che terminano in denti o zanne (funzionali per perforare la pelle dei predatori e iniettare il veleno) e ciglia che rispondono alla stimolazione tattile; 2) **ofiocefale**, hanno tre valve dentellate (semplici o ristrette) caratterizzate da un'ampia protrusione al di sotto della superficie articolata, la quale si pensa possa avere un significato strutturale nel dare maggiore forza di presa alle mascelle, consentendo loro di trattenere oggetti per periodi più lunghi prima dell'affaticamento muscolare; 3) **trifille**, le più piccole tra le quattro tipologie, sono attaccate alla teca da lunghi annessi muscolari e sono caratterizzate da tre valve arrotondate distalmente, con denti a incastro la cui funzione sembra sia quella di pulire il derma da placche batteriche e piccole particelle di detrito; 4) **tridentate**, sono le più grandi e le più comuni, dotate di tre valve con denti a incastro, sensibili al tatto e funzionali alla rimozione dal derma di grandi particelle di detrito e piccoli invertebrati parassiti come vermi policheti [3].

Dettagli funzionali e proprietà trasferibili:

[1] Allasinaz, A. (1991). *Paleontologia generale e sistematica degli invertebrati*. Genova, Italy: ECIG

[2] Carnevali, M. D. C., Bonasoro, F., & Melone, G. (1991). Microstructure and mechanical design in the lantern ossicles of the regular sea-urchin *Paracentrotus lividus*: A scanning electron microscope study. *Italian Journal of Zoology*, 58(1), 1-42.

[3] Märkel, K., Gorny, P., & Abraham, K. (1977). Microarchitecture of sea urchin teeth. *Fortschr. Zool.*, 24: 103-114.

[4] Stock, S. R. (2014). Sea urchins have teeth? A review of their microstructure, biomineralization, development and mechanical properties. *Connective tissue research*, 55(1), 41-51.



- **Giunzioni scorrevoli**, sono particolari tipologie di giunti sferici scorrevoli, presenti nel sistema di attacco spine-teca, che permettono il movimento fra due superfici articolate. La forma sferica del giunto consente ampi gradi di libertà di movimento regolati dal cono di muscoli e collagene [4].
- **Strutture cilindriche forti, rigide e leggere delle spine**. Le spine sono elementi porosi caratterizzati da una complessa gerarchia strutturale. Sono costituite da un nucleo centrale cavo circondato da un'area porosa che termina in una serie di cunei radiali. La superficie esterna presenta uno schema distinto di elementi appuntiti rivolti verso la punta della spina. Tra i cunei adiacenti sono presenti dei ponti che seguono un andamento elicoidale attorno all'asse longitudinale della spina. La forma cilindrica (molto ricorrente in natura e.g. ossa, aculei e fusti) presenta un'alta resistenza meccanica. I cunei e i ponti che ruotano attorno all'asse della spina agiscono in modo da concentrare le forze di sollecitazioni agenti sulla spina nella zona esterna della struttura, lasciando illeso il cilindro centrale. Gli spazi tra i cunei servono a impedire che le fratture si propaghino attraverso la struttura, aumentando di molto la resistenza della spina: rispetto, ad esempio, a una struttura cilindrica monolitica di calcite, le crepe devono infatti propagarsi separatamente in ciascun cuneo anziché propagarsi nell'intera sezione trasversale [5].
- **Sistemi reattivi e di presa delle pedicellarie**. Le pedicellarie rendono l'epitelio degli echinoidi sensibile e reattivo agli stimoli ambientali biotici e abiotici. Si figurano come elementi di *gripping* a selettività variabile in scala (dai piccoli detriti e alghe, alle grandi particelle di detrito, parassiti e predatori). Ogni forma risulta specializzata in diverse funzioni e il numero, la combinazione e la distribuzione sull'epitelio varia da specie a specie [3].

Ispirazioni biomimetiche:

Le giunzioni sferiche presenti tra spina e tubercolo possono essere considerate nel design di sistemi alternativi di agganci reversibili e irreversibili (e.g. aggancio di supporto monitor dotato di ampi gradi di libertà di movimento). La struttura della spina offre invece un'ampia gamma di ispirazioni per strutture cilindriche dotate di alta resistenza e leggerezza, utili in svariati campi industriali (e.g. edile, biomedicale, bio-materiali). Le pedicellarie si rivelano invece particolarmente utili alla progettazione di materiali interattivi, che trovano pratica applicazione nella realizzazione di dispositivi intelligenti, capaci di reagire agli stimoli esterni. Nel campo biomedicale, ad esempio, un possibile trasferimento potrebbe essere un nuovo sistema di micro-aghi per la somministrazione transdermica di farmaci in modo più efficiente e indolore.

[5] Wainwright, S. A., Biggs, W. D., Currey, J. D., & Gosline, J. M., (1976) *Mechanical design in organism*. London, UK: Edward Arnold Publishers.