

PROGRAMMA PRIN PNRR 2022 - BANDO PRIN 2022 Decreto Direttoriale n. 102 del 02-02-2022

TITOLO DEL PROGETTO: **AMPHYBIA: Advanced Metamaterials from PHYSics and Blomechanics of Axolotls (2022ATZCJN)**

CODICE CUP: E53D23012600001

Budget DIST: **95.998,00 €**

PI: Prof. Massimiliano Fraldi

Altre Unità di Ricerca coinvolte nel Progetto: Università di Trento; Politecnico di Torino

Descrizione del progetto

Il progetto AMPHYBIA si è occupato di studiare, sia sperimentalmente che tramite modellazione matematica, meccanismi mecano-biologici e possibili correlazioni funzionali tra le proprietà auxetiche della pelle degli axolotl (*Ambystoma mexicanum*) e alcune loro peculiari capacità, uniche tra i vertebrati, collegate alla rigenerazione di tessuti e organi nonché, secondariamente, alle speciali modalità di locomozione.

Gli axolotl, probabilmente per ragioni evoluzionistiche, preservano in fase adulta talune caratteristiche neoteniche (ad esempio conservando le branchie) e sono quindi in grado di passare, con estrema rapidità e tramite switching neuromotori, dalla modalità di locomozione terrestre tipica dei rettili a quella in acqua caratteristica dei pesci, sfruttando un complesso coordinamento dei movimenti degli arti e delle ondulazioni della colonna vertebrale che rende efficiente gli spostamenti in entrambi i contesti, sfuggendo così efficacemente dai predatori e procacciandosi il cibo in situazioni estreme. Inoltre, gli axolotl sono gli unici vertebrati adulti in grado di rigenerare un'ampia gamma di strutture e organi, inclusi arti, occhi e parti del cervello, rendendoli modelli animali di grande interesse per la ricerca in campo bio-ingegneristico e in medicina rigenerativa, per possibili traslazioni dei meccanismi molecolari nell'uomo. Dal punto di vista meccanico, anche la pelle dell'axolotl rappresenta una singolarità nell'ambito dei biomateriali, esibendo un comportamento elastico auxetico, cioè caratterizzato da un coefficiente di Poisson negativo (Negative Poisson Ratio - NPR). Questa controintuitiva proprietà meccanica è infatti estremamente rara in natura ed è infatti quasi esclusivamente riscontrabile in schiume artificiali, microstrutture reticolari con speciali trame ad elementi rientranti e tessuti sintetici costituiti da fibre avvolte secondo schemi geometrici specifici. Nonostante tale caratteristica elastica sia estremamente insolita in materiali naturali, nessuno studio di letteratura - antecedente alla presente ricerca - aveva investigato sugli eventuali vantaggi che gli axolotl potessero trarre dall'auxeticità della loro pelle, specie in relazione alle capacità uniche di rigenerazione di tessuti e organi e di rimarginazione delle ferite esibite da questi anfibi. Alla luce di tali osservazioni, per contribuire alla comprensione dei potenziali meccanismi che potessero collegare processi di differenziazione cellulare a fenomeni macroscopici di crescita e rigenerazione, il progetto AMPHYBIA ha quindi avuto l'obiettivo di studiare la mecano-biologia della pelle dell'axolotl, partendo dapprima da un'analisi sperimentale su campioni di tessuto di archivio, per poi sviluppare specifici modelli biomeccanici basati sulla teoria dell'elasticità non lineare combinata con la crescita, proiettata alla scala del continuo. Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati infine studiati possibili nuovi schemi microstrutturali per progettare metamateriali bio-ispirati.

Descrizione dei principali obiettivi del progetto e dei relativi risultati

In conformità con quanto previsto nel programma del Progetto, le tre unità di ricerca coinvolte (Università di Napoli "Federico II", Università di Trento e Politecnico di Torino), lavorando in sinergia, hanno raggiunto i seguenti obiettivi e risultati. In primo luogo, è stata effettuata una caratterizzazione biomeccanica del tessuto cutaneo dell'axolotl mediante prove meccaniche e

analisi ultrastrutturali, di tipo morfo-istologico, ottenendo informazioni utili per confermarne l'auxeticità della pelle della salamandra e per sviluppare un modello iperelastico ad hoc per descriverla. Successivamente, sono state approfonditamente studiate le possibili implicazioni del comportamento elastico auxetico sui meccanismi di crescita e rigenerazione tissutale nell'axolotl, mediante modelli biomeccanici e soluzioni - sia analitiche che numeriche - in grado di replicare in silico specifiche condizioni fisiologiche. Ciò ha permesso di dimostrare teoricamente come l'auxeticità della pelle possa effettivamente conferire un vantaggio, rispetto a quanto avviene nei materiali standard (con coefficiente di Poisson positivo), riducendo l'intensità delle tensioni meccaniche residue che accompagnano la crescita, favorendo in tal modo sia i processi di differenziazione cellulare e gli stadi iniziali di rigenerazione tissutale, sia i fenomeni di riparazione con rimarginazione delle ferite senza la presenza di cicatrici, in quest'ultimo caso minimizzando il fenomeno del wrinkling. Ulteriori analisi hanno altresì mostrato come l'auxeticità contribuisca anche a ridurre le tensioni nella pelle e nei distretti anatomici del corpo dell'axolotl durante le fasi di locomozione sia terrestri che acquatiche. Infine, sulla base dei risultati ottenuti, sono state individuate linee di sviluppo future per la concezione di nuovi metamateriali ispirati alle proprietà dell'axolotl, caratterizzati da elevate rigidità e dalla possibilità di un controllo modulabile delle onde elastiche per applicazioni anche nella sensoristica, sfruttando un design basato sull'inclusione di fasi auxetiche e particolari proprietà topologiche.