

Liceo scientifico Leonardo Da Vinci, Gallarate (VA)

Esami di Stato A.S. 2017-2018

Vittorio Gallivanone

Classe 5^A Scienze Applicate

折

り

紙

## INDICE:

1. Introduzione
2. Storia degli origami
  1. Le origini
  2. La fusione con l'occidente
  3. L'origami moderno
3. Ideare un origami
  1. le basi
  2. La geometrizzazione degli origami
  3. L'informatica e gli origami
4. Gli origami nello spazio
  1. La piega Miura-ori
  2. I progressi di oggi
5. Gli origami come nanovettori
  1. Che cosa sono i nanovettori
  2. Come costruire una struttura a dna
  3. Stabilità
  4. Carico e scarico farmaci
6. Conclusioni
7. Bibliografia
8. Sitografia
9. Risorse video
10. Elenco immagini

# 1. INTRODUZIONE

Alcuni anni fa vidi un documentario sui templi shintoisti giapponesi e quel giorno nacque il mio interesse verso l'isola nipponica. In poco tempo dall'architettura tradizionale la mia curiosità mi ha portato a conoscere alcune figure di spicco giapponesi, come il regista Hayao Miyazaki, lo chef Jiro Ono e l'artista Akira Yoshisawa. Tra questi personaggi, l'ultimo è sicuramente quello che più di tutti mi ha colpito. Considerato il padre degli origami moderno fu anche il primo che riuscì a vedere il legame tra quest'arte e la geometria, nel lontano 1931, utilizzando carta e pieghe per spiegare i concetti di angolo e piano ai giovani operai nella fabbrica dove lavorava. Ottant'anni dopo il legame tra origami e scienza è evidente come mai lo era stato prima, grazie a persone come Koryo Miura e Robert J. Lang, che animati dalla stessa curiosità di Yoshisawa, applicarono quest'arte ai più disparati campi, dalla fisica alla biologia, passando per l'informatica e lo spazio. Questo elaborato vuole presentare alcune tra le più straordinarie applicazioni degli origami nei settori tecnologici.

## 2. STORIA DEGLI ORIGAMI

### 2.1 Le origini

L'origine degli origami (da "ori" piegare e "kami" carta, in kanji "折り紙") si può far risalire intorno alla fine del XVII secolo in Giappone, come testimoniato da un poema di Ihara Saikaku che recita: "Rosei-ga yumeno cho-wa orisue" (tradotto "le farfalle nei sogni di Rosei saranno di carta piegata"). Il passo si riferisce ad una coppia di modelli, con una forma che ricorda delle farfalle, chiamati "Ocho" e "Mecho", utilizzati durante i matrimoni per decorare le bottiglie di Sake. La tradizione origami continuò per svariati secoli a produrre modelli celebrativi, solitamente utilizzati in cerimonie formali, come la partenza dei samurai o la cerimonia del tè. Bisogna aspettare fino alla metà del XIX secolo per osservare i primi origami ricreativi, raccolti da Adachi Kazuyuki nel suo manuale "Kayaragusa" nel 1845. Grazie a questo testo possiamo per la prima volta descrivere le tecniche che contraddistinguevano i primi origami tradizionali. I fogli di carta avevano molte forme, i tagli erano numerosi, il colore era applicato a modello finito e le pieghe non avevano una posizione precisa, ma dipendevano dal gusto personale di chi piegava.



Fig.1  
Due bottiglie di Sake chiuse con degli origami tradizionali (Ocho e Mecho).

## 2.2 La fusione con l'occidente

Con la restaurazione Meiji il Giappone finalmente si aprì al mondo occidentale, importando ed esportando cultura e manufatti. Come successe in molti campi, dall'architettura alla politica, anche la tecnica origami risentì delle influenze occidentali durante questo periodo di cambiamento. Le regole cambiano: la base diventa quadrata, i tagli spariscono, le pieghe sono disposte in modo preciso utilizzando punti di riferimento (angoli e pieghe precedenti) e il colore è applicato prima di piegare, in modo da avere una base con una faccia bianca e una colorata. La conseguenza di questi cambiamenti fu l'abbandono dei modelli tradizionali e la necessità di inventarne dei nuovi, senza tagli e con base quadrata.

## 2.3 L'origami moderno

Il concetto di origami moderno nasce nella seconda metà dello scorso secolo e si basa su paradigmi opposti a quelli dell'origami tradizionale. Il modello non è anonimo, esiste un ideatore e i vari passaggi sono descritti attraverso un sistema internazionale di simboli precisi ("Yoshizawa-Randlett"). L'origami non è solo il modello finito, ma diventa tutto il processo che ha portato alla sua creazione, dallo studio del soggetto alla ideazione dei passaggi e dei diagrammi da seguire. Il prodotto finale è oggi quindi solo una parte di quest'arte.

Gli origami vanno intesi come una disciplina giovane, sviluppatasi principalmente sul finire del ventesimo secolo. Sessant'anni fa tutti i modelli esistenti avevano un numero di passaggi che raramente superava i trenta e raffiguravano soltanto figure stilizzate. Il loro numero era così esiguo, circa duecento, che potevano essere tutti facilmente raccolti in un solo libro. Per capire quanto quest'arte stia crescendo velocemente basti pensare che oggi il numero di modelli è schizzato a svariate decine di migliaia, grazie soprattutto ad un differente approccio nell'ideazione dei modelli. Da un metodo basato su tentativi ed errori ("Trial and error method"), orientato sul trovare una soluzione ma non a capire come trovarla, si è passati ad un approccio Matematico-Informatico basato sul tracciare un layout di pieghe (crease pattern) prima di piegare il modello (in passato era l'opposto, dopo molti tentativi si otteneva un origami, questo veniva aperto e le pieghe studiate). Questo metodo ha aperto la strada alla creazione di esemplari di enorme complessità, come per esempio il "cuckoo clock" di Lang, impossibili da ottenere procedendo per tentativi.



Fig.2

L'orologio a cucù ideato da Lang, interamente piegato da un'unica striscia di carta e con oltre 300 passaggi.

## 3. IDEARE UN ORIGAMI

### 3.1 Le basi

Qualunque origami è costruito a partire da un modello dove tutte le pieghe possono essere appiattite in modo da ottenere una figura completamente piatta, chiamato *base*, questa viene poi modellata con un procedimento chiamato *modellatura* per assumere una forma tridimensionale. Per progettare un nuovo origami è quindi necessario progettare prima la base corrispondente.

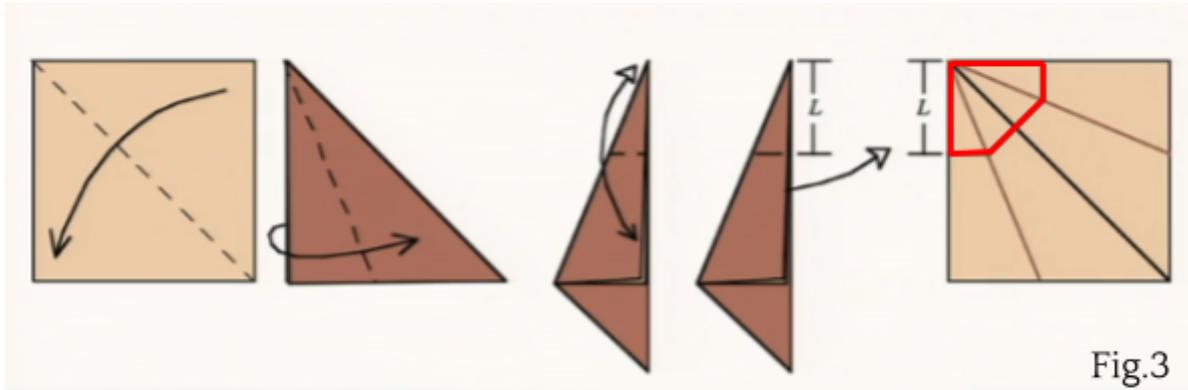
Il processo che traduce un soggetto qualsiasi in un origami prevede quattro diverse fasi:

1. Scelta del soggetto;
2. Rielaborazione del soggetto in una figura semplificata a segmenti (*stick figure*);
3. Elaborazione base;
4. Modello finito.

La fase più difficile è sicuramente l'elaborazione di una nuova base, dove ogni segmento della stick figure deve essere rappresentato da uno specifico sistema di pieghe (*fold*) nella base.

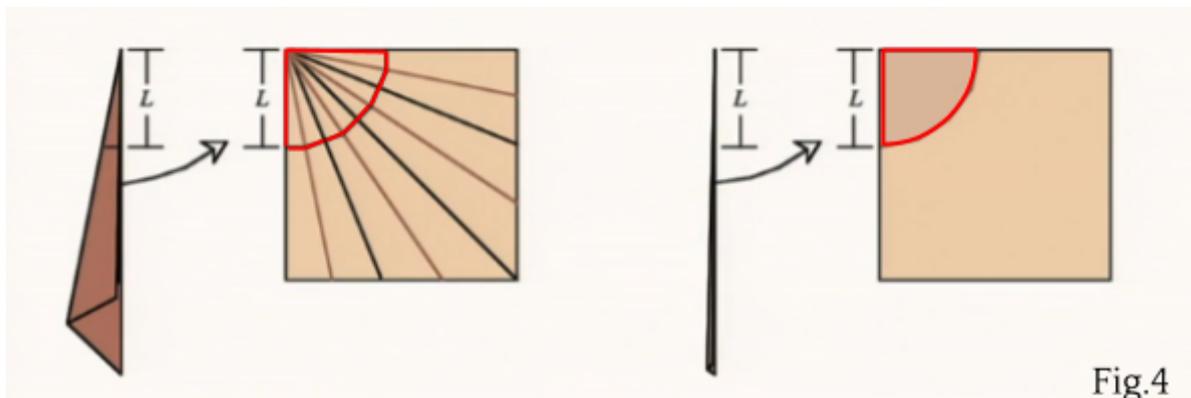
### 3.2 La geometrizzazione degli origami

Per spiegare come le nuove basi sono ideate è necessario illustrare il ragionamento che è alla base di questo processo, ovvero quello del "Circle Packing". La carta utilizzata per una specifica piega non può essere utilizzata per le altre, è quindi necessario dividere il foglio in regioni diverse, ognuna delle quali diventerà una specifica parte nel modello finito. Per esempio se si prende un foglio di carta quadrato e lo si piega diagonalmente due volte e si piega orizzontalmente ad una arbitraria lunghezza  $L$  dal vertice, dopo aver disteso il foglio si potrà osservare la parte di carta utilizzata dalla piega.



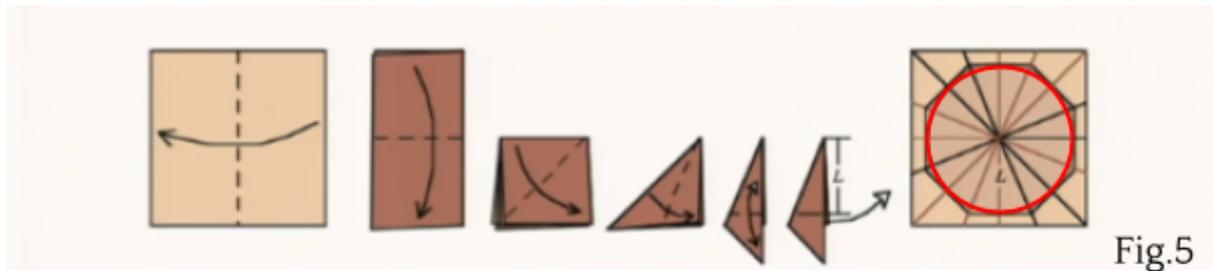
In rosso la parte di carta utilizzata dalla piega.

Se si aumenta il numero di pieghe diagonali all'infinito, utilizzando della carta infinitamente sottile, la regione di carta utilizzata assumerà la forma di un quarto di cerchio, ovvero la minima quantità di carta necessaria.



Procedendo con le pieghe diagonali la regione di piano evidenziata tenderà ad assumere la forma di un quarto di cerchio.

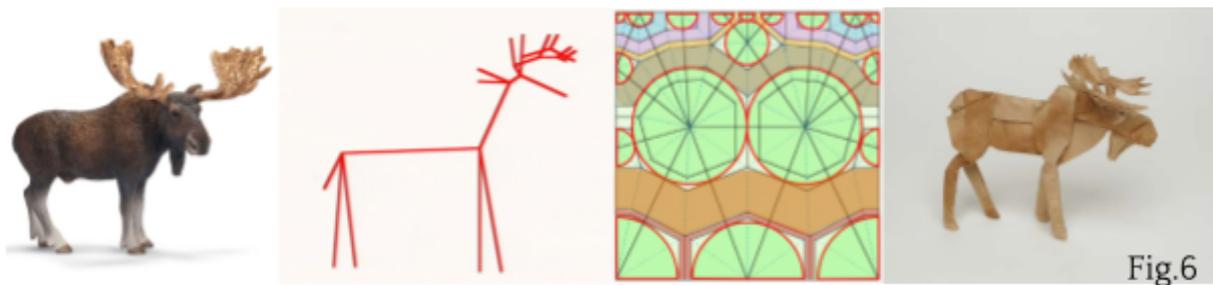
Se anziché piegare il foglio in un angolo lo pieghiamo in altri punti, come per esempio il centro, la regione di carta necessaria diventerà un cerchio completo. Questo dimostra come la quantità di carta richiesta da una piega dipenda interamente dalla sua lunghezza e dalla sua posizione, non dall'angolo della sua punta. Questa relazione, come vedremo di seguito, è molto utile, infatti è possibile descrivere le pieghe attraverso dei cerchi, con un raggio  $R$  di lunghezza  $L$  e centro nel punto  $P$  coincidente con il vertice della piega.



Esempio di piega con centro nel centro del foglio.

### 3.3 L'informatica e gli origami

Utilizzando unicamente cerchi però è impossibile creare qualsiasi tipo di base, sono necessarie delle pieghe di raccordo che congiungono i vari cerchi chiamati fiumi (" "). Questi fiumi nel modello finito hanno il compito di descrivere l'inclinazione tra le diverse regioni dove giacciono i cerchi. Il termine "circle packing" significa quindi riempire un piano di cerchi e fiumi di diverso raggio e lunghezza in modo tale da ottenere una figura tridimensionale. Programmando un software che automaticamente converte le misure, gli angoli ed il numero dei segmenti di una struttura 3D in una serie di cerchi e fiumi è possibile creare un comodo strumento per la creazione di basi. Un software di questo genere è stato elaborato da Robert J. Lang e si chiama "treemaker". Il compito dell'origamista è quello di tradurre lo schema delle pieghe in una serie di passaggi eseguibili.



I vari passaggi della ideazione di un origami. La terza immagine è stata elaborata attraverso il software "treemaker". In verde sono evidenziati i cerchi, con gli altri colori sono evidenziati i fiumi.

## 4. GLI ORIGAMI NELLO SPAZIO

### 4.1 La piega Miura-ori

Nel 1995 un astrofisico giapponese, Koryo Miura, ideò un rivoluzionario sistema di stoccaggio in grado di comprimere grandi strutture in piccoli spazi, il tutto grazie una speciale piega chiamata Miura-ori, termine nato dall'unione del nome dell'inventore con la parola giapponese *ori*, piegare. Questo metodo di piegatura fu scoperto durante gli studi compiuti all'università di Tokyo nel dipartimento di scienza aeronautica e spaziale, quando la JAXA ( *Japan Aerospace Exploration Agency* ) richiese un nuovo metodo per gestire le LSS ( *Large Space Structures* ), che includono i pannelli fotovoltaici e le grandi antenne dei satelliti spaziali. Queste enormi apparecchiature devono essere conservate all'interno dello shuttle durante le operazioni di partenza e ritorno sulla terra, infatti non sarebbero in grado di sopportare le estreme accelerazioni caratteristiche di queste due fasi, e devono poter essere dislocate nello spazio in maniera semplice e senza l'ausilio umano.

I precedenti metodi utilizzati possono essere classificati come segue:

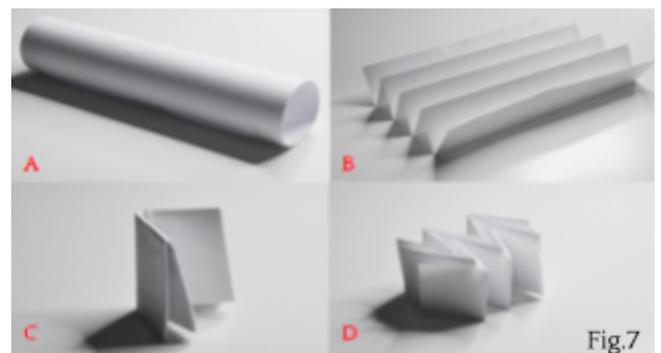
Metodi ad una dimensione;

( *rotolo* )  
( *fisarmonica* )

Metodi a due dimensioni;

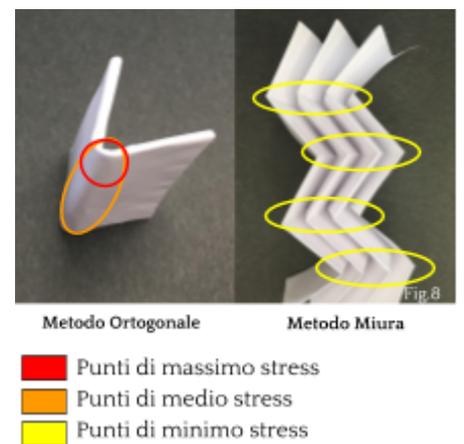
( *ortogonale* ) il metodo b è ripetuto in due direzioni perpendicolari)

Tra questi, *rotolo* e *fisarmonica* sono chiamati ad una dimensione perché la superficie subisce una modifica soltanto lungo la larghezza, mentre la lunghezza rimane invariata, o viceversa. Il lato che rimane uguale deve poter essere contenuto nello shuttle adibito a trasportarlo, limitando la dimensione degli oggetti caricati. Con i metodi *ortogonale* e *Miura-Ori* invece una superficie può essere piegata lungo entrambe le dimensioni, ottenendo strutture più compatte e maneggevoli.



Modelli realizzati in carta utilizzando i diversi metodi. A.Rotolo; B.Fisarmonica; C.Ortogonale; D.Miura-Ori

Oltre all'efficienza bisogna considerare che il dispiegamento di queste strutture avviene nello spazio, quindi, affinché l'operazione possa essere automatizzata, è necessaria una sequenza di apertura composta da azioni semplici e con piccola percentuale di errore. Un altro fattore vitale è lo stress accumulato dalla struttura nei suoi nodi, ovvero nei punti in cui due o più pieghe si intersecano. I materiali utilizzati nelle LSS sono spesso fogli sottili plastici chiamati film, che possiedono una resistenza tale da poter sopportare facilmente nodi a due pieghe, ma aumentando questo numero la possibilità che deformazioni o rotture si verifichino aumenta esponenzialmente.



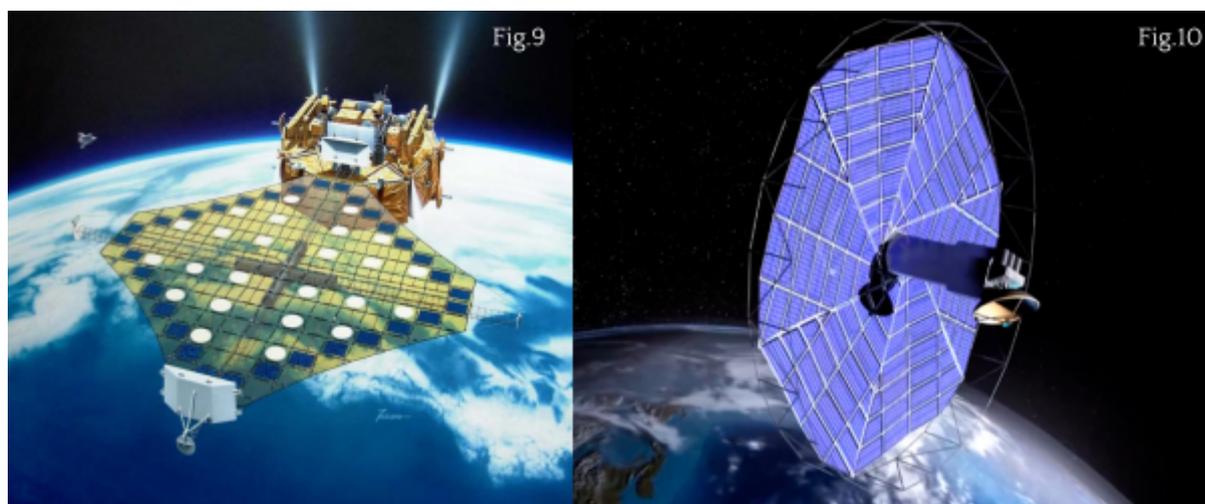
Le condizioni poste per l'ideazione di un nuovo metodo da utilizzare nello spazio per piegare in modo regolare un piano in uno più piccolo sono di seguito riassunte:

1. Le condizioni isometriche devono rimanere invariate.
2. Le pieghe devono appartenere ad una tassellazione di un piano, compiuta attraverso la ripetizione di una regione fondamentale
3. Il processo di apertura deve completarsi interamente all'interno della regione fondamentale.
4. Il processo di apertura deve compiersi attraverso un movimento semplice, continuo e unico.

La soluzione di un problema così complesso è ottenibile soltanto attraverso un metodo a tentativi se le condizioni rimangono invariate, ma attraverso delle semplificazioni, ovvero considerando un piano infinito e quindi potendo trascurare lo spessore, il quesito può essere ricondotto ad un problema analitico descritto da un'equazione differenziale alle derivate parziali, l'equazione di Von Kármán, che descrive il comportamento di grandi superfici piane sotto l'effetto di sollecitazioni. In questa tesina non esporrò l'equazione, non avendo gli strumenti matematici necessari a risolverla. La soluzione dell'equazione portò Miura a progettare un modello con una configurazione a spina di pesce composta da regioni fondamentali a forma di parallelogrammi. L'origami ottenuto si dispiega completamente tirando due angoli opposti diagonalmente e al momento della chiusura si comporta come una superficie a memoria di forma, tendendo naturalmente a ripiegarsi nella sua posizione iniziale.

## 4.2 I progressi di oggi

Dopo oltre vent'anni la tecnica miura-ori continua ad ispirare nuove invenzioni nel campo aerospaziale, come per esempio un prototipo di pannello solare sviluppato nel 2014 dai ricercatori della Brigham Young University, in collaborazione con l'ex astrofisico, ora artista origami, Robert J. Lang. Il progetto è stato patrocinato dal Jet Propulsion Laboratory della NASA e prevede la creazione di una struttura più efficiente di quella progettata da Koryo Miura. La nuova forma adottata non è più rettangolare, bensì esagonale e combina vari tipi di pieghe, tra cui quella Miura. L'apertura di questo modello avviene grazie ad un movimento rotatorio verso l'esterno, che secondo i ricercatori può essere ottenuto facendo girare la struttura e sfruttando la forza centrifuga generata. Da un iniziale diametro di 2,7 metri il prototipo sarebbe in grado di raggiungere un diametro di circa 25 metri, producendo da solo l'energia di tre moduli con le stesse dimensioni alla partenza attualmente in uso dalla NASA. Oltre alla maggiore efficienza questo prototipo è caratterizzata da una maggiore stabilità, infatti il modulo fotovoltaico si espande uniformemente in tutte le direzioni, diminuendo le sollecitazioni che potrebbero danneggiare la sonda, a differenza del modello Miura, che si espande in una sola direzione. La forma circolare inoltre risulterebbe vantaggiosa anche per altre apparecchiature che richiedono specificatamente una forma circolare, come antenne e trasmettitori.



Due ricostruzioni digitali di due sonde con i pannelli solari aperti. A destra i pannelli fotovoltaici erano piegati con la tecnica Miura (1995), a sinistra il nuovo prototipo esagonale della NASA (2014). Da notare come nella sonda a sinistra il modulo fotovoltaico si espande solo in una direzione, mentre a destra si espande in tutte le direzioni.

## 5. GLI ORIGAMI COME NANOVETTORI

### 5.1 Che cosa sono i nanovettori

Gli agenti chemioterapici usati oggi presentano dei difetti molto marcati, come bassa solubilità, bassa stabilità, e citotossicità (la proprietà di indurre danno ad una cellula), traducibili in una terapia molto spesso poco efficiente. Questi possono essere minimizzati attraverso l'utilizzo di agenti trasportatori che dirigono il farmaco direttamente alla cellula bersaglio. I nanovettori sono oggi largamente utilizzati per questo compito e varie tipologie di materiali sono state analizzate e testate per la costruzione di nanoparticelle, tra cui liposomi (PLGA, acido poli-lattico-co-glicolico), metalli (AuNPs e AgNPs, rispettivamente nanoparticelle d'oro e d'argento) e nanoparticelle magnetiche. Questi prototipi presentano comunque degli svantaggi, per esempio la costruzione di nanoparticelle liposomiali con grandezza, forma e carica uguali è molto difficile, e in generale la progettazione di nanovettori polifunzionali può essere un processo laborioso e inefficiente. Un'opzione più conveniente è sicuramente quella di utilizzare come base per i nanovettori molecole di DNA, creando nanostrutture non solo biocompatibili e biodegradabili (in grado di dissolversi dopo avere assolto al loro compito), ma anche modificabili con una vasta gamma di molecole, come lipidi, proteine, aptameri (acidi nucleici in grado di legarsi ad un'altra molecole) e nanoparticelle inorganiche. Tutte queste proprietà rendono le nanostrutture in DNA degli ottimi punti di inizio per la costruzione di nanovettori specifici multifunzionali.

### 5.2 Come costruire una struttura a dna

Le nanostrutture di DNA possono essere progettate e costruite grazie ad un ramo della nanotecnologia chiamata *DNA origami*, che utilizza il DNA come materiale costitutivo di strutture tridimensionali. Utilizzando tecniche tradizionali della nanotecnologia strutturale, le costruzioni ottenute risultavano limitate sia in grandezza che complessità. Con lo scopo di fabbricare nanostrutture più grandi e complesse nel 2006 fu introdotta da Paul Rothemund una tecnica chiamata "DNA origami". Questo metodo si basa sulla piegatura di un lungo DNA a singolo filamento (ssDNA, single-stranded DNA) chiamato *filamento* ( *rod* ), tenuto in posizione da ssDNA più piccoli, chiamati *bracci* ( *arms* ). Questa tecnica permette di produrre grandi nanostrutture con un dispendio di tempo, lavoro e materiali molto ridotto. Strutture che comprendono curvature complesse, cavità interne e parti dinamiche sono state prodotte negli ultimi anni.

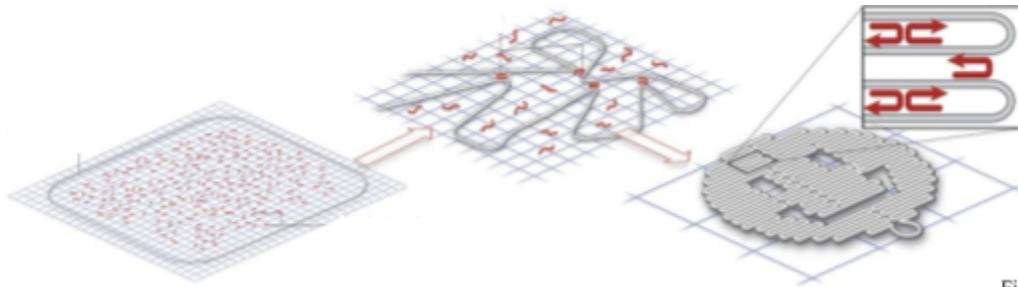


Fig.11

In questa figura si possono osservare le tre fasi della costruzione di una struttura bidimensionale, in rosso si possono distinguere i piccoli ssDNA (staples) necessari per fissare la posizione dello scaffold, rappresentato dal filamento lungo. per creare strutture tridimensionali si procede impilando strati bidimensionali, un meccanismo simile alla stampa in 3D.

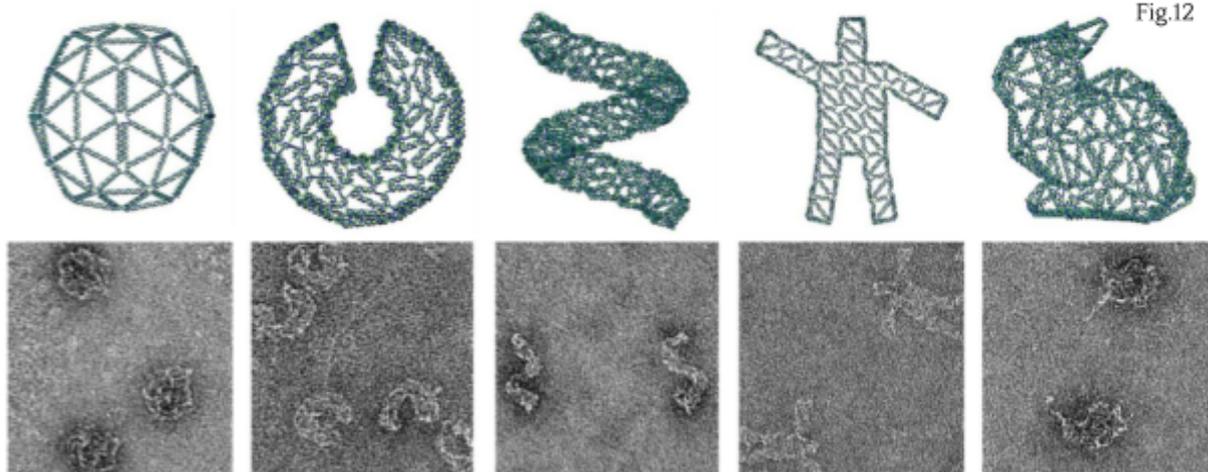


Fig.12

Vari esempi di strutture ottenibili con la tecnica origami. nella metà superiore strutture progettate al computer, nella metà inferiore immagini al microscopio a forza atomica ( $10^{-9}$  m).

Nel 2006 un team di ricercatori tedeschi dell'Università di Mannheim ha costruito una nanostruttura di DNA in grado di incapsulare una proteina, aprendo la strada ad una nuova generazione di nanovettori. Nonostante questo risultato, affinché possano essere utilizzate in un sistema biologico, questi composti devono soddisfare dei requisiti.

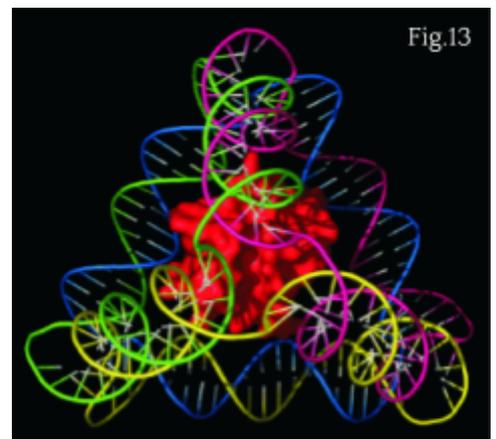


Fig.13

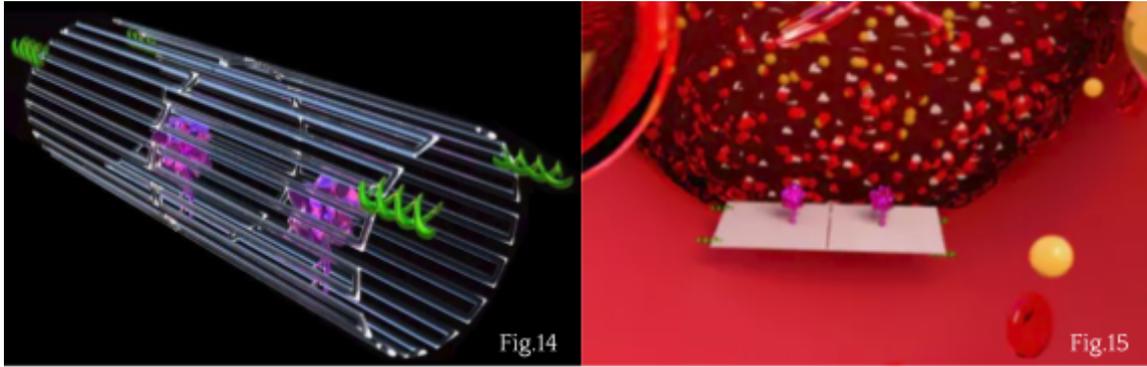
La prima nanostruttura a dna contenente una proteina (Citocromo c, in rosso) realizzata.

### 5.3 Stabilità

E' stato dimostrato che nanostrutture a DNA possiedono una maggiore stabilità di Filamenti a dna singoli e Dna a doppio filamento in una soluzione contenente nucleasi (enzima in grado di idrolizzare i legami fosfodiesterici tra le subunità nucleotidiche degli acidi nucleici), questa stabilità sarebbe da ricondurre alle forme complesse in cui le nanostrutture sono piegate, che rendono difficoltoso l'accesso della nucleasi ai siti di idrolizzazione, ostacolando il suo funzionamento. Diverse forme di dna origami sono state osservate rimanere intatte in cellule lisate per una durata di oltre 12 ore a temperatura ambiente. Incapsulando completamente le strutture all'interno di un doppio strato fosfolipidico e iniettandola in topi e insetti ( ) alcuni ricercatori dell'università di Mahidol sono riusciti a mostrare come esse siano in grado di raggiungere siti tumorali attraverso il flusso sanguigno rimanendo inalterate, a differenza di strutture sprovviste del doppio strato, più soggette a denaturalizzazione.

### 5.4 Carico e scarico farmaci

Le capacità di carico e scarico possono variare in funzione della forma della nanostruttura, essa diventa quindi determinante al momento della progettazione di un nanovettore. Per esempio la velocità di rilascio del carico dipende dalla tensione accumulata dalla struttura. Il nanovettore stesso agisce da scudo per il farmaco trasportato, proteggendolo per esempio dalle proteasi (enzima in grado di catalizzare la rottura del legame peptidico tra il gruppo amminico e il gruppo carbossilico delle proteine). Affinché lo scarico avvenga in determinate condizioni (per esempio quando si incontra una specifica cellula) al vettore vengono applicati degli aptameri, acidi nucleici in grado di riconoscere una specifica molecola o proteina e legarsi ad essa. Quando l'aptamero si lega, viene innescata l'apertura del vettore e il rilascio del carico. Questo principio è stato utilizzato per progettare un farmaco per combattere il cancro. Questo funziona grazie ad un vettore contenente Trombina, un enzima che stimola la coagulazione del sangue. Il principio su cui si basa questo nanovettore è lo stesso su cui si basano i farmaci inibitori dell'angiogenesi: la coagulazione del sangue nei capillari prossimi ad una massa tumorale impedisce la crescita e la sopravvivenza della massa stessa, privata di nutrienti e ossigeno.



Nell'immagine a destra un esempio di nanovettore progettato per combattere tumori. In viola l'enzima Trombina, in verde gli Aptameri e in grigio la cella di DNA con struttura origami. Nell'immagine a sinistra il nanovettore raggiunge il sito di scarico. La nanogabbia si apre e rilascia la proteina contenuta.

## CONCLUSIONI

L'origami, considerato da molti un semplice divertimento per bambini oppure un mero sfoggio di abilità manuali, nasconde in realtà principi tutt'altro che banali. L'utilità degli origami è testimoniata dallo straordinario numero di applicazioni pratiche che possono avere. I loro principi possono essere applicati ad una vastissima gamma di oggetti, sia di grandezza macroscopica, come i pannelli fotovoltaici di una sonda spaziale o la struttura portante di un edificio, sia di dimensioni microscopiche, come fogli di grafene e nanorobot.

## BIBLIOGRAFIA

Robert J. Lang, "Origami design secrets: mathematical methods for an ancient art", 2<sup>a</sup> ed., Stati Uniti, CRC press, 2003

Prefazione: Kiyo Yoshisawa, Introduzione: Robert J. Lang, Modelli: Akira Yoshisawa, "Akira Yoshisawa, Japan's greatest origami master", 1<sup>a</sup> ed, Tokyo, Tuttle Publishing, 2016

Thomas Hull, "Project Origami, activities for exploring Mathematics", 2<sup>a</sup> ed., Stati Uniti, CRC press, 2013

Judith Clancy, "Kyoto, city of Zen", 2<sup>a</sup> ed., Tokyo, Tuttle Publishing, 2012

## SITOGRAFIA

“History of Origami”, Articolo a cura di: Hatori Koshiro, estratto dal sito personale di Hatori Koshiro (Membro del consiglio della società giapponese per gli origami “JOAS”), <https://origami.ousaan.com/library/historye.html>

“Method of Packaging and Deployment of Large Membranes in Space”, Pubblicazione universitaria a cura di: Koryo Miura, <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/7293>, Dicembre 1995

“Solar Power, Origami-Style”, articolo a cura di: <https://www.nasa.gov/jpl/news/origami-style-solar-power-20140814>, Agosto 2014

“World's Thinnest Origami Could Build Microscopic Machines”, articolo a cura di: Devin Powell, <https://www.insidescience.org/news/worlds-thinnest-origami-could-build-microscopic-machines>, Marzo 2017

“DNA origami nanorobot takes drug direct to cancer cell”, articolo a cura di: Jessica Hamzelou, <https://www.newscientist.com/article/mg21328534.900-dna-origami-nanorobot-takes-drug-direct-to-cancer-cell/>, Febbraio 2012

“DNA origami applications in cancer therapy”, Pubblicazione universitaria a cura di: Anuttara Udomprasert & Thaned Kangsamaksin, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cas.13290#cas13290-bib-0042>, Giugno 2017

“Single-Molecule Protein Encapsulation in a Rigid DNA Cage”, Pubblicazione universitaria a cura di: Christoph M. Erben & Russell P. Goodman, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ange.200603392>, Novembre 2006

“Army of Nanorobots Successfully Strangles Cancerous Tumors”, articolo a cura di: Peter Hess, <https://www.inverse.com/article/41881-can-nanobots-treat-tumors>, Marzo 2018

“A Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads”, Pubblicazione universitaria a cura di: Shawn M. Douglas, Ido Bachelet & George M. Church, <http://science.sciencemag.org/content/335/6070/831>, Febbraio 2012

“Angiogenesi”, articolo a cura di: AIRC, <https://www.airc.it/ricerca-oncologica/cos-e/proprieta-comuni/angiogenesi/>

Sezione “technology” e “software” del sito personale del fisico e matematico degli origami Robert J. Lang, <http://www.langorigami.com>

Sezione "Origami Science", sito gestito da appassionati di origami,

<https://www.origami-resource-center.com/>

## RISORSE VIDEO

"Folding a New Tomorrow: Origami Meets Math and Science by Thomas Hull", durata: 56 min 28 sec, pubblicato da: "Mathematical Association of America", in data 13 dicembre 2015, <https://youtu.be/c3SJ7W6OWfM>

"Dr. Robert Lang - The Modern Science of Origami", durata: 19 min 21 sec, pubblicato da "USA Science & Engineering Festival", in data 3 novembre 2015, <https://youtu.be/eTOwuR9wXic>

"See a NASA Physicist's Incredible Origami", durata: 3 min, pubblicato da: "Great Big Story". in data: 16 marzo 2017, [https://youtu.be/DI4hDppP\\_SQ](https://youtu.be/DI4hDppP_SQ)

"Itai Cohen explains the physics of origami", durata: 5 min 17 sec, pubblicato da: "Cornell University" in data 19 agosto 2014, <https://youtu.be/VOXKgG7tsII>

"Japan - New discoveries in paper folding", durata: 2 min 48 sec, pubblicato da: "AP Archive" in data 21 luglio 2015, <https://youtu.be/Fz4Ioi1jFHY>

"Science of Innovation: Origami Structures", durata 5 min 54 sec, pubblicato da: "USPTOvideo" in data 17 febbraio 2017, <https://youtu.be/HLVUopco1qM>

"How NASA Engineers Use Origami To Design Future Spacecraft", durata : 4 min 20 sec, pubblicato da: "Seeker" in data 25 marzo 2018, <https://youtu.be/Ly3hMBD4h5E>

"The math and magic of origami | Robert Lang", durata: 18 min 3 sec, pubblicato da: "TEDtalks" in data 31 luglio 2008, <https://youtu.be/NYKcOFQCeno>

"Origami Master - Robert J. Lang", durata: 5 min 30 sec, pubblicato da: "ChristopherHelkey" in data 17 luglio 2017, <https://youtu.be/2uogPWqEYIU>

"How Origami is Inspiring Scientific Creativity", durata 5 min 23 sec, pubblicato da: "Brigham Young University" in data 5 febbraio 2015, <https://youtu.be/fyf7nReaGPw>

"Origami: technique, art, technology | Roberto Gretter | TEDxTrento", durata: 13 min 23 sec, pubblicato da: "TEDx Talks" in data 20 dicembre 2015, [https://youtu.be/\\_gVhp4NMuko](https://youtu.be/_gVhp4NMuko)

## ELENCO IMMAGINI

fig. 1: sezione "History" [www.origami-resource-center.com](http://www.origami-resource-center.com)

fig.2: "Black Forest Cuckoo Clock" <https://www.oriwiki.com>

fig. 3: Robert J. Lang, "Origami design secrets: mathematical methods for an ancient art",  
Pagina 293, 2ª ed., Stati Uniti, CRC press, 2003

fig. 4: Robert J. Lang, "Origami design secrets: mathematical methods for an ancient art",  
Pagina 293, 2ª ed., Stati Uniti, CRC press, 2003

fig. 5: Robert J. Lang, "Origami design secrets: mathematical methods for an ancient art",  
Pagina 295, 2ª ed., Stati Uniti, CRC press, 2003

fig.6: Alce:"Alaska photography" <https://www.alaskaphotographics.com>

Modello 3D: "The Modern Science of Origami" <https://youtu.be/eTQwuR9wXic>

Crease Pattern: "LangOrigami" <http://www.langorigami.com>

Origami Alce: "wisemindstudios" <http://wisemindstudios.com>

fig.7: Foto scattate dallo studente

fig.8: Foto scattate dallo studente

fig.9: "Origami Art and Science, eMIT" <https://commit.scripts.mit.edu>

fig.10: "Solar Power, Origami-Style" <https://www.nasa.gov>

fig.11: "DNA origami applications in cancer therapy" <https://doi.org/10.1111/cas.13290>

fig.12: "DNA origami applications in cancer therapy"  
<https://doi.org/10.1111/cas.13290>

fig.13: "Single-Molecule Protein Encapsulation in a Rigid DNA Cage"  
<https://doi.org/10.1002/ange.200603392>

fig.14: “Army of Nanorobots Successfully Strangles Cancerous Tumors”  
<https://www.inverse.com>