

Dottorato in Valutazione e Mitigazione dei Rischi  
Urbani e Territoriali - XXX ciclo  
2014-2017  
Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura  
Università degli Studi di Catania

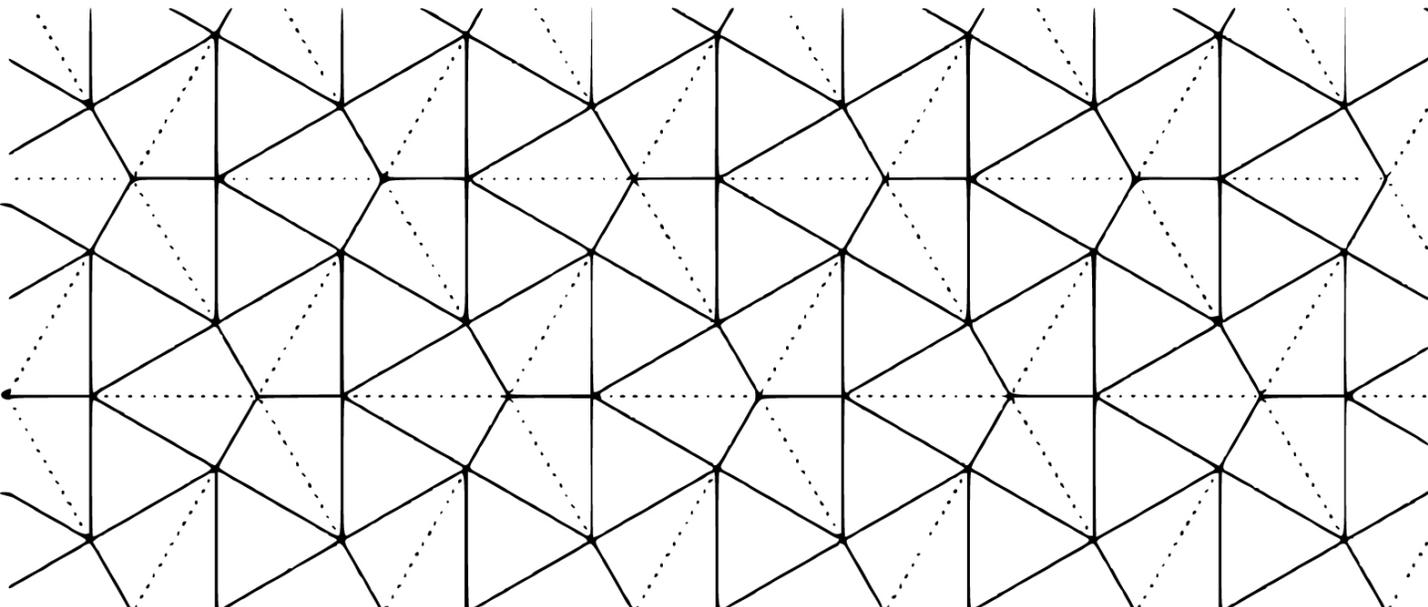
Gianluca Rodonò

KREO

Kinetic, Responsive Envelop by Origami

Supervisore:  
prof. ing. Vincenzo Sapienza

Componenti del Gruppo tesi:  
prof. ing. Massimo Cuomo  
dott. ing. Giuseppe Recca



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR

Dottorato di ricerca in “Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali”

XXX Ciclo

Coordinatore del Dottorato:

prof. ing. Massimo Cuomo

Supervisore:

prof. ing. Vincenzo Sapienza

Gruppo di tesi:

prof. ing. Massimo Cuomo

ing. Giuseppe Recca

Revisori:

prof. ing. Placido Munafò

prof. arch. Enrico Sicignano



UNIVERSITÀ  
degli STUDI  
di CATANIA

## RINGRAZIAMENTI

Le sperimentazioni sui materiali e le loro caratterizzazioni sono state svolte presso i laboratori della sede catanese dell'Istituto per i Polimeri, Compositi e Biomateriali - IPCB del Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR.

La caratterizzazione è stata completata presso il Laboratorio Prove Materiali dell'Università degli Studi di Catania.

L'ottimizzazione parametrica è stata svolta in parte presso *l'Institute of Architecture and Technology* della *Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture - KADK*.

I modelli in scala sono stati realizzati con il supporto dell' ETALab (Enabling Technology for Architecture Laboratory) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR con la collaborazione del Laboratorio di Robotica del Dipartimento di Matematica e Informatica - DMI.

Si ringraziano anche gli ingg. Salvo Beninato, Chiara Impellizzeri, Chiara L'Episcopo e Martina Zito che hanno svolto degli studi complementari al progetto KREO all'interno delle loro tesi di laurea.

Gianluca Rodonò

KREO

Kinetic, Responsive Envelop by Origami



## ABSTRACT

The research is focused on the study of adaptive kinetic building components, using tessellated geometries based on the origami principles.

The aim is to investigate the possibility that building components change their morphology in response to environmental stimuli and that they tackle risk mitigating vulnerability thanks to this property.

In the last century kinetic components topic received fluctuating attention, but last ten years innovations in buildings materials and technologies give a new impetus to the theme. These innovations free the components from the problem of the complexity of movements activation and the excessive maintenance cost.

On this topic, the research tries to find the best solution to manage the kinematics of the components, choosing the foldable surfaces based on the origami for their expressive possibilities, their management of the kinematics and their resistance linked to the shape. The study involves two aspects: the conformation of an innovative material for the folding surfaces and the geometric configuration of the folding component.

The production methods of this innovative composite material, made of a thermoplastic matrix and a reinforcement in natural or carbon fiber fabric, are tested.

Their mechanical characterization and the identification of a secondary production process to generate the tessellation geometry were carried out. A junction system was developed and tested.

The geometric configuration of the component is investigated through the creation of physical and virtual models. First ones are implemented to support the technological project, the management of the kinematics and the relation with other components. Virtual models have been used to identify a design workflow in a parametric environment that allows the implementation of strategies to optimize movement on thermal comfort.



# INDICE

1 INTRODUZIONE	3
1.1 Tema	3
1.1.1 Architettura e cinematico	5
1.1.2 Terminologia	7
1.2 Motivazioni	10
2 STATO DELL'ARTE	13
2.1 La ricerca scientifica	13
2.2 Le realizzazioni	21
2.2.1 Sistemi costruttivi	21
2.2.2 Tipi di movimento	25
2.2.3 Scopi del movimento	26
2.2.4 Elementi per consentire il movimento	38
2.2.5 Modalità di movimento	40
2.3 Le superfici corrugate ( <i>folded plate structure</i> )	45
2.4 Le superfici pieghevoli ( <i>foldable surfaces</i> )	50
2.5 Gli origami	53
2.5.1 Geometria	54
2.5.2 Metodi di modellazione meccanica	59
Analisi cinematica	60
Analisi di rigidità	61
2.5.3 Gli <i>smart</i> e gli <i>active material</i> per le superfici ad origami	63
3 OBIETTIVI	66
4 METODI E STRUMENTI	67
4.1 Conformazione del materiale KREO	67
4.1.1 Il materiale e il processo di produzione	67
Matrice	69
Rinforzo	70
Il processo di produzione: realizzazione del composito e individuazione dei parametri di produzione	71
Analisi preliminari e ottimizzazione dei parametri di produzione	72
Analisi visiva	72
Analisi al tatto	72
Analisi dello spessore	72
Analisi <i>cross section</i>	72

4.1.2	Caratterizzazione meccanica	74
	Test di trazione monoassiale con ordito disposto parallelamente all'asse di trazione	74
	Test di trazione monoassiale con ordito disposto a 45° rispetto all'asse di trazione	74
4.1.3	Il processo di post-produzione per la realizzazione del pattern di piegatura	75
4.1.4	Caratterizzazione della piega	76
4.1.5	La realizzazione dei sistemi di giunzione	77
	Giunzione saldata	77
	Giunzione cucita	77
4.1.6	Caratterizzazione meccanica dei sistemi di giunzione	78
	<i>Single-lap joint shear test</i>	78
	<i>T-peel test</i>	78
4.2	Configurazione geometrica del componente KREO	81
4.2.1	Metodologia per il progetto architettonico	81
	Modelli di carta	81
	Modelli virtuali: il progetto parametrico attraverso la modellazione algoritmica	82
	Modelli fisici in scala	86
4.2.2	I casi studio	87
4.2.3	Metodologia per il progetto del componente sul comfort termico	93
	Il comfort degli spazi aperti	94
	Le soluzioni statiche tradizionali	94
	L'esigenza di una risposta dinamica	94
	Mancanza di strumenti	95
	Workflow per comfort esterno	95
4.2.4	Metodologia per il calcolo dell'UTCI	97
4.2.5	Metodologia per l'ottimizzazione della forma e del cinematismo	101
5	I RISULTATI DELLE INDAGINI SPERIMENTALI	103
5.1	La conformazione del materiale KREO ed il processo di produzione	103
5.2	La caratterizzazione meccanica del materiale	109
5.2.1	Test di trazione monoassiale con fibre disposte parallelamente ed ortogonalmente all'asse di trazione	109
5.2.2	Determinazione del modulo di Young E	112
5.2.3	Test di trazione monoassiale con fibre disposte a 45° rispetto all'asse di trazione	113
5.2.4	Determinazione del modulo di scorrimento a taglio G	116

5.3 Il processo di post-produzione per la realizzazione del pattern di piegatura	120
5.4 Caratterizzazione della piega	122
5.5 La realizzazione dei sistemi di giunzione	124
Giunzione saldata	124
Giunzione cucita	124
5.6 Caratterizzazione meccanica dei sistemi di giunzione	126
5.7 Gli errori di misura	134
6 VALIDAZIONE DELLA METODOLOGIA	137
6.1 Caso studio	137
6.2 Stato dell'arte: le coperture dei siti archeologici	139
6.2.1 Analisi tipologica	139
6.2.2 Requisiti prestazionali	139
6.2.3 Analisi tecnologica e materiali impiegati	141
6.3. Il sito di progetto: localizzazione, clima e tempo metereologico	143
6.4. Il progetto architettonico e costruttivo del componente adattivo KREO	147
6.5 Il progetto della configurazione e del movimento per il comfort ambientale degli spazi aperti	149
6.5.1 Descrizione dell'obiettivo dell'ottimizzazione	149
6.5.2 <i>Benchmark</i>	152
6.5.3 Risultati	153
6.5.4 Discussione: Capacità del <i>workflow</i> di simulazione di programmare i movimenti sul comfort <i>outdoor</i>	158
7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	160
BIBLIOGRAFIA	162
ELENCO DELLE FIGURE	170
ELENCO DELLE TABELLE	178



# 1 INTRODUZIONE

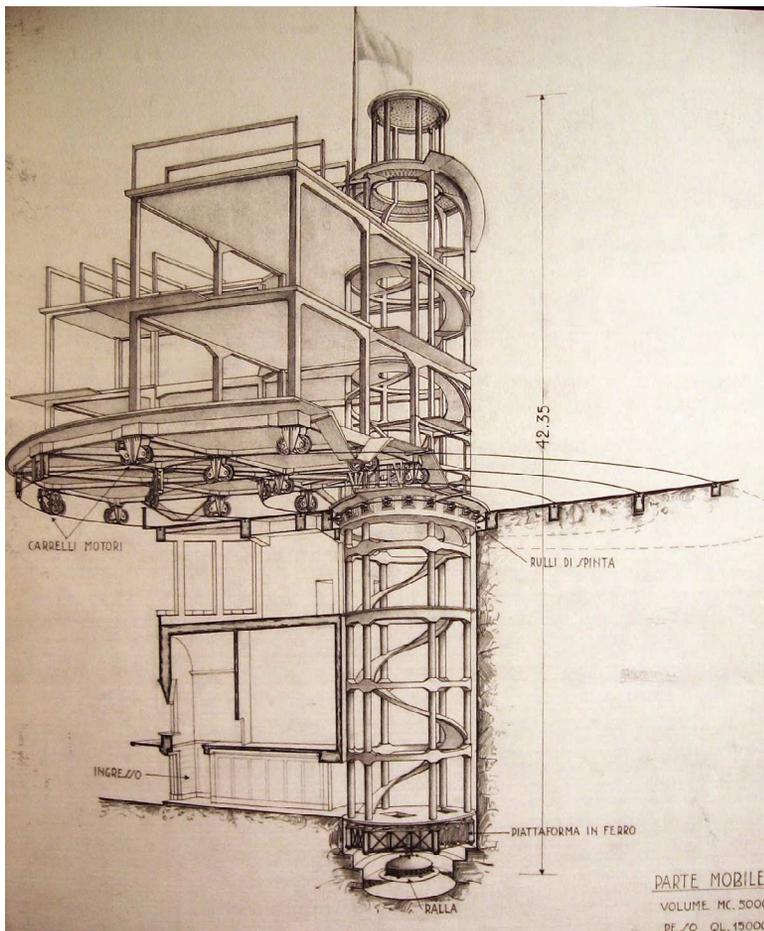
## 1.1 Tema

La ricerca ha per oggetto lo studio di elementi costruttivi cinetici adattivi, attraverso l'uso di geometrie tassellate che trovano fondamento nell'antica arte degli origami. Da qui la scelta dell'acronimo KREO (*Kinetic, Responsive Envelop by Origami*) come titolo della ricerca stessa. L'obiettivo è quello di indagare la possibilità che gli elementi edilizi alterino la propria morfologia in risposta agli stimoli ambientali ed alle conseguenti elaborazioni di dati; se sia quindi possibile creare oggetti edilizi capaci di contrastare l'esposizione al rischio valutando estemporaneamente la probabilità che avvengano determinati fenomeni, attraverso il proprio "sistema sensoriale", e in reazione a ciò ridurre la vulnerabilità assumendo nuove configurazioni spaziali. Se, in altre parole, l'adattività possa essere considerata come uno degli strumenti per la mitigazione di specifici rischi.

D'altro canto, in epoca recente, le esigenze del vivere sociale, sempre più complesse e diversificate, richiedono la disponibilità di attrezzature di servizio flessibili, leggere e reimpiegabili. Si pensi per esempio alle esigenze discendenti dalle emergenze ambientali, dagli eventi mondani, dalla prima accoglienza dei migranti e soprattutto dalla protezione dei beni culturali. La mitigazione del rischio per questi ultimi rispetto all'aggressione degli agenti atmosferici è peraltro particolarmente attuale ed appartiene al novero delle tematiche poste all'attenzione della Comunità Europea ad esempio nel Programma di finanziamenti Horizon 2020. Una risposta a tale esigenza può essere data impiegando un sistema di schermature tale da minimizzare la radiazione solare o la pioggia battente o altri disturbi discendenti dalle inclemenze del clima e che possa essere rimosso non appena il disturbo cessa per garantire la possibilità di una fruizione indisturbata del bene culturale.

Bisogna considerare infatti che una progettazione di tipo statico sul tema della prevenzione del rischio ha causato nel corso degli anni gravi errori, ad esempio, nella protezione del patrimonio monumentale. Caso emblematico è quello del teatro di Eraclea Minoa: il progetto dell'architetto Franco Minissi di ricoprimento integrale della cavea con elementi incolore e trasparenti in Plexiglas, per difenderla dagli agenti esterni, ha causato nel giro di 10 anni la decomposizione vera e propria dei gradini del teatro a causa della condensa e della presenza di vegetazione cresciuta per effetto serra. Ciò che rimane oggi del teatro è ricoperto da una struttura in tubi Innocenti e pannelli; un

monumento oggi completamente dimenticato dall'economia turistica dell'Isola. Perché non pensare allora di consentire, in condizioni ottimali, la fruizione indisturbata del bene archeologico? È al contempo ipotizzabile un controllo estemporaneo sul suo "stato di salute" con interventi attivi per preservarlo solo in caso di condizioni termo-igrometriche sfavorevoli mediante l'impiego di coperture temporanee cinetiche? In che misura sono realizzabili elementi di copertura per piazze che si attivino solo in caso di condizioni climatiche sfavorevoli, per difendere dall'eccessiva calura o creare un riparo dalle piogge. A queste domande si è tentato di dare risposta attraverso lo studio di KREO.



Figg. 1.2-1.3 | Villa Girasole di Angelo Invernizzi, San Martino Buon Albergo, 1929-1935

### 1.1.1 Architettura e cinematismo

Per cercare di trovare risposta alle domande poste è necessario introdurre il tema del cinematismo. La relazione tra architettura e cinematismo ha origini molto antiche. Già in epoca romana le coperture degli anfiteatri, i *velaria*, erano realizzate seguendo tecniche sviluppate in ambito navale per movimentare le vele. I tessuti di copertura erano sostenuti e dispiegati attraverso un complesso sistema di cavi. Ancora oggi alcune coperture di stadi seguono lo stesso principio, però, con materiali e tecniche più sofisticati.

Tra gli anni venti e trenta del 1900, l'avvento del Movimento Moderno e le evoluzioni della tecnica permettono ai progettisti di sperimentare



soluzioni in cui gli edifici possano alterare la propria configurazione. Ne è un esempio la Villa Girasole di Angelo Invernizzi del 1929, edificio letteralmente su ruote che può orientarsi per seguire l'andamento del sole ed è quindi caratterizzato da adattività per esigenze climatiche. Walter Gropius nel 1927 aveva già progettato, seppur senza fortuna realizzativa, un teatro in cui un meccanismo di movimentazione permette di spostare la scena, mettendola al centro del pubblico di uditori. Il cinematismo in questo caso garantisce flessibilità d'uso per esigenze di fruizione scenica.

Le sperimentazioni continuano per tutto il novecento arrivando negli ultimi decenni a soluzioni molto sofisticate come quelle adottate da Santiago Calatrava che, nel Centro per servizi di emergenza di San Gallo, realizza un sistema di schermatura solare mobile per il lucernario della sala ipogea capace di modulare l'illuminamento delle superfici interne in base alle esigenze d'uso.

L'applicazione del cinematismo, nel progetto della Rigid Foldable Gallery di Tomohiro Tachi del 2009, coinvolge invece l'intero oggetto edilizio pensato per riconnettere due edifici esistenti. Grazie alle pieghe dell'involucro il padiglione può essere completamente ripiegato su uno dei due edifici e scomparire quando non è necessario il suo utilizzo. È evidente come il tema dell'architettura "cinetica" o "responsiva" si presta ad una sperimentazione progettuale su strutture che, grazie al loro cinematismo, possono garantire una pluralità di usi e rispondere a esigenze mutevoli, fino ad arrivare, in casi estremi, a oggetti edilizi che possano essere completamente richiusi quando non utilizzati.

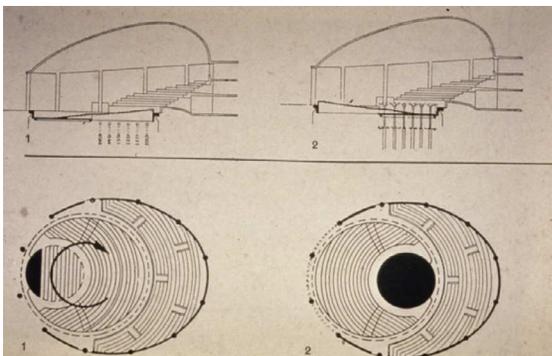


Fig. 1.4 | *Total Theatre* di W. Gropius e E. Piscator, progetto, 1924



Fig. 1.5 | *Emergency Center* di S. Calatrava, San Gallo, 1988 - 1998



Fig. 1.6 | *Rigid-Foldable Origami Gallery* di Tomohiro Tachi, progetto, 2009

### 1.1.2 Terminologia

La terminologia con cui si indicano le architetture dotate di componenti con cinematismo è piuttosto varia ed articolata ed è in genere legata alle numerose ricerche del settore. Queste hanno dato luogo ad un proliferare di definizioni i cui campi di applicazione hanno spesso limiti non ben definiti e comunque resi flessibili dalla continua evoluzione della tecnologia. Questo è in effetti un campo che nel corso degli ultimi 100 anni ha vissuto il passaggio da sistemi meccanici a controllo manuale a materiali intelligenti che interagiscono direttamente con l'ambiente, per cui anche la terminologia tende ad inseguire il progresso tecnologico per informare delle evoluzioni in atto. Tra le definizioni con accezione più ampia vi è **Architettura Cinetica**

definita come “l’insieme di quegli edifici e/o parti di edificio con mobilità, localizzazione e/o geometria variabili” (Fox, 2002).

All’interno di questa definizione rientrano quindi sia le **Architetture Trasportabili** che le **Architetture Trasformabili**. Le prime sono caratterizzate dal requisito di trasportabilità, rendendo possibile quindi un’agevole variazione della loro localizzazione (Zanelli, 2003). In letteratura queste sono ulteriormente suddivise in mobili, itineranti e smontabili in base alla modalità di trasporto e di posa in opera (Kronenburg, 2008). Le architetture trasformabili sono invece caratterizzate da una variabilità non nella localizzazione ma nella configurazione dei loro componenti, che possono alterare la loro geometria per poter rispondere a più esigenze contemporaneamente o ad esigenze variabili. La trasformabilità può riguardare singoli componenti o l’intero edificio ed in accordo con ciò possono distinguersi architetture integralmente cinetiche e architetture a cinematismo integrato (Fox & Kemp, 2009).

Molto simile è il concetto di oggetti architettonici dotati di **Convertibilità**, che Frei Otto utilizza nel suo studio sulle *Convertible Roofs*, cioè sui sistemi di copertura flessibili che consentono agli edifici di adattarsi a differenti funzioni, attraverso la mobilità (Otto, 1972). In generale tale flessibilità può essere applicata tanto all’involucro esterno quanto agli spazi interni, garantendo con un cambiamento di forma in tempi ridotti la rispondenza alle esigenze dei fruitori, come succedeva già nella Casa Schröder di Rietveld del 1924.

Il termine **Architettura Responsiva**, introdotto intorno al 1970 da Nicholas Negroponte, indica un tipo di architettura o di costruzione che possiede la capacità di modificare la sua forma, per riflettere continuamente le condizioni ambientali che lo circondano. Lo stesso Negroponte scrive: “...responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations” (Negroponte, 1975). Le Architetture Responsive si distinguono da altre forme di progetto dotato di cinematismo poiché incorporano tecnologie intelligenti e reattive negli elementi fondamentali del tessuto di un edificio, conferendo un ruolo centrale ai sistemi di controllo attraverso, ad esempio, il *Building Management System* (BMS).

Nella letteratura più recente l’applicazione dei principi di responsività all’involucro architettonico viene indagata soprattutto per l’ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell’edificio. In questo senso si parla di **Performative Skin** (Turrin et al., 2012), **Adaptive Skins** (Hasselbaar, 2006) o **Adaptive Building Shell** (Loonen et al., 2013) come di

involucri capaci di adattarsi ai cambiamenti del contesto alterando le performance dell'edificio.

Il gruppo di ricerca Adaptive Building Systems della Technische Universiteit di Delft (TU Delft) ha tentato di sistematizzare le possibili definizioni individuando un elenco con livello di progressi tecnologici e performativi crescente (Lelieveld, Voorbij & Poelman, 2007).

Increasing complexity ↓		CONTROL	PERFORMANCE	REQUIRED TECHNOLOGY
	Flexible	Manual-Mechanical	Single-functional	Mechanical system
	Active	Manual-Electric	Single-functional	Energy & system
	Dynamic	Sensor	Single-functional	Sensor & system
	Interactive	System & user interface	Single-functional, multiple options	Sensor & system & interface
	Intelligent	System & user interface	Multi-functional	Ubiquitous system
	Smart	Ubiquitous	Multi-functional	Artificial Intelligence

Tab. 1.1 | Terminologia utilizzata per oggetti architettonici dotati di cinematismo in relazione al livello tecnologico impiegato, TU Delft, 2007

## 1.2 Motivazioni

Partendo dalla difficile congiuntura che coinvolge tutto il paese, la sua società e la sua economia, è necessario promuovere un sodalizio di competenze tecnico-scientifiche atto a bilanciare, attraverso una decisa innovazione, la produttività e il ruolo del settore edilizio che costituiscono un volano per promuovere uno sviluppo sostenibile.

Questo settore che, in Italia più che altrove, è connotato da una esasperata parcellizzazione e da carenze assai gravi legate ad un'insufficiente consapevolezza sia della committenza che degli utenti, rischia di soccombere e comunque registra un esodo non solo di imprese ma anche di società e studi di progettazione verso altri mercati in cui la domanda è quantitativamente più consistente.

Ma l'esodo verso altri mercati equivale a spostare più avanti nel tempo gli stessi problemi. Forse sarebbe opportuno cercare di trasformare la crisi in un'opportunità. Riflettere sui modi di produzione già sperimentati è utile al fine di chiarire lo snodo tra progetto, processo e prodotto. Oggi il prodotto riveste un ruolo centrale in quanto riflette un indebolimento della classe professionale rispetto ad un crescente interesse della media imprenditorialità per l'innovazione.

Per ottenere ciò è necessario che l'innovazione diventi strumento per superare lo sviluppo indiscriminato di modi di produzione responsabili dell'impoverimento ambientale. Infatti il dialogo con l'ambiente ha origine per l'architettura potenzialmente in fase di progettazione, concretamente durante la realizzazione e la gestione dell'oggetto edilizio. La ricerca di nuovi materiali o la reinterpretazione di quelli esistenti deve essere indirizzata verso un impatto ambientale minore o nullo e verso la salubrità di spazi confinati che siano allo stesso tempo affidabili e con un ciclo di vita utile adeguatamente progettato. Tutto questo equivale a dire che non bisogna aspettare trent'anni per scoprire che le fibre d'amianto sono cancerogene o aspettare quarant'anni per capire che il calcestruzzo armato non è eterno, anzi tutt'altro.

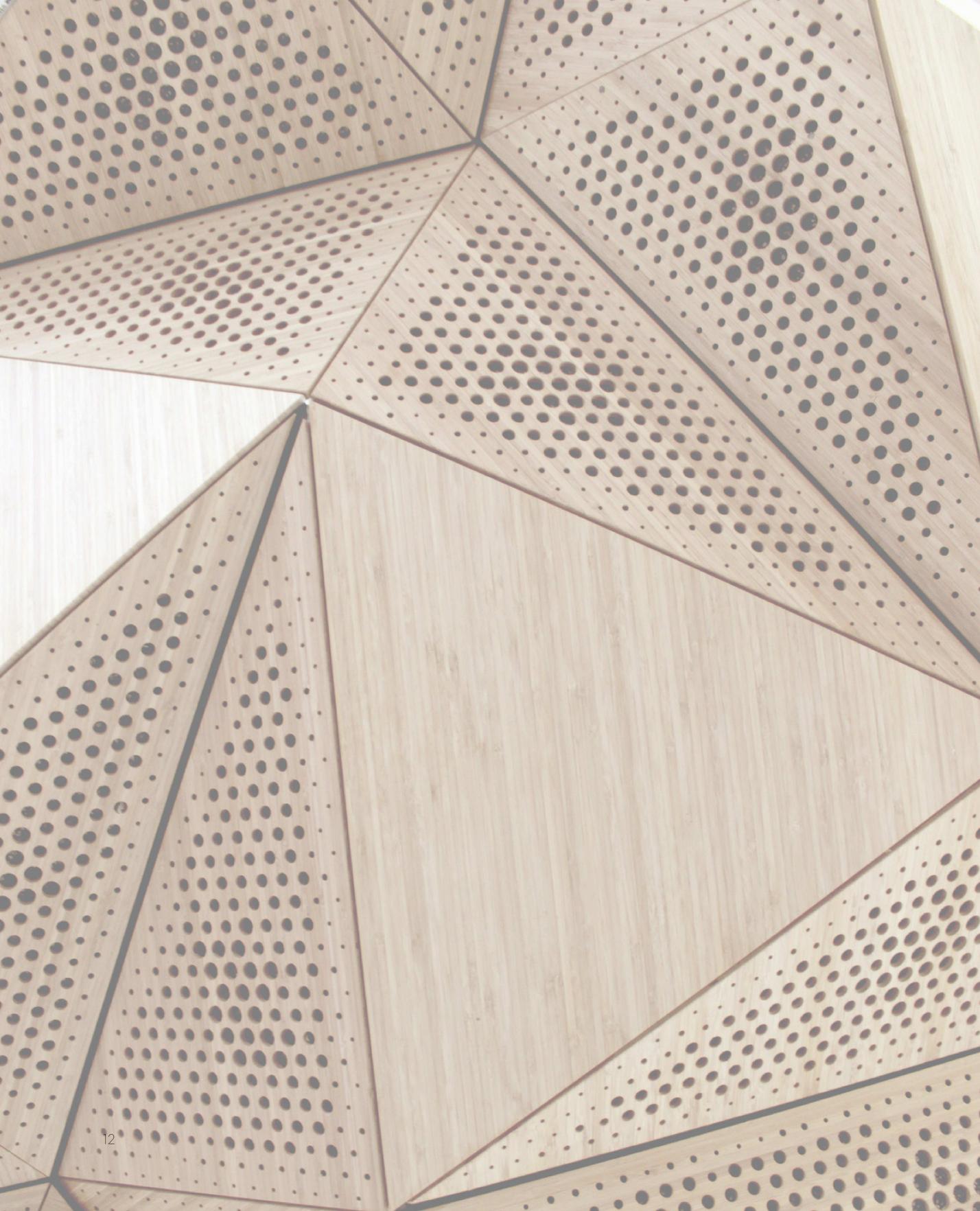
Partendo da queste considerazioni, la ricerca KREO si concentra su due aspetti. Da un lato cerca di rispondere alla necessità di ottimizzare l'impiego di materiale per le realizzazioni edilizie facendo sì che i ritrovati tecnologici in termini di progettazione e produzione digitale, che permettono il perfetto controllo di forme complesse, non siano rivolti alla ricerche di virtuosismi formali ma alla ricerca di soluzioni morfologiche che possano sfruttare al meglio le possibilità di "resistenza per forma". Dall'altro lato mira a far sì che la flessibilità dei componenti edilizi, dotati di valenze cinematiche, eviti che un progetto di tipo statico possa essere incapace di adattarsi a cambiamenti

d'uso o di condizioni climatiche, rendendo le realizzazioni vetuste anzitempo. Un edificio adattivo verrà utilizzato in maniera più efficiente e risponderà ai cambiamenti con un costo economico minore senza ricorrere a complessi e rovinosi processi di demolizione. Evitare tali demolizioni e allungare il tempo di vita utile del costruito ne incrementano in maniera determinante la sostenibilità ambientale del ciclo di vita (Pizzi et al., 2012).

Anche Frei Otto, nel 1995, richiama, insieme ad un ritorno ad un'architettura di tipo minimale, al "bisogno di edifici sicuri e sani, ma più mobili e più adattabili" e ad usare i nuovi strumenti di calcolo per arrivare a "una nuova comprensione della natura", che generi "forme altamente performanti, ovvero forme classiche, che uniscano gli aspetti estetici ed etici. (...) L'architettura di domani sarà di nuovo un'architettura minimale, un'architettura di processi che si auto educano e si auto ottimizzano sotto la guida dell'uomo" (Otto e Rasch, 1995).

D'altro canto è da notare come allo stato attuale "l'architettura oggettivamente cinetica trova una valvola di sfogo nelle aree di nuova ricchezza ed espansione, Dubai in primis. Essa è però ancora legata all'idea di un movimento rotatorio dell'intero corpo di fabbrica attorno a un asse centrale, con l'intento di affascinare quanti si possono permettere di ammirare ogni ora uno squarcio di cielo diverso, e, tra qualche anno, un angolo di palazzo diverso" (Beatini, 2011).

Ciò che muove la ricerca presentata è invece la volontà di testare le possibilità di ottenere componenti edilizi cinetici con tecniche low cost e low tech, come strumento per la realizzazione di edifici in cui le prerogative di flessibilità e adattabilità ai cambiamenti (sia essi climatici o del quadro esigenziale) possano incrementarne la concorrenzialità economica e incoraggiare investimenti.



## 2 STATO DELL'ARTE

### 2.1 La ricerca scientifica

Lo stato dell'arte sul tema del cinematismo in architettura si divide tra la ricerca scientifica e le realizzazioni. La prima annovera al suo interno anche sperimentazioni che, vista la complessità della tematica, spesso dialogano con diversi campi dell'ingegneria (aerospaziale, elettronica,..). Tra i principali centri ad occuparsi di tali tematiche vi è l'**Institut Für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) di Stoccarda** in cui si portano avanti ricerche legate all'adattività degli edifici, ossia alla possibilità di modificare o regolare caratteristiche individuali ad una variazione dei parametri definitori. Le principali linee di ricerca sul tema portate avanti sono tre.

- La prima riguarda gli involucri edilizi multistrato tessili adattivi il cui esempio principale è il sistema *PlusMinus*, una gridshell composta da tubi di poliammide posti in pressione, a circa 0,5/0,7 bar, intrecciati a rete e fissati al suolo ad un supporto metallico. La forma, la rigidità e il mantenimento della mutua posizione tra i tubi vengono conferiti dal vuoto creato all'interno di una doppia pelle in ETFE (Etilene TetrafluoroEtilene) che avvolge i tubi.
- Una seconda linea di ricerca sperimenta la possibilità di creare involucri in vetro adattivi che, grazie alla presenza di cristalli liquidi, possono essere controllati in maniera continua e istantanea per regolare il flusso luminoso.
- Infine un'ultima linea di ricerca si occupa di elementi strutturali ibridi e intelligenti ed ha portato alla realizzazione nel 2012 dello *Smart Shell*. Questo prototipo è costituito da una superficie curva in legno, con uno spessore di soli 4 cm, e uno sviluppo che supera i 100 m<sup>2</sup>. L'estrema snellezza della geometria è resa possibile grazie all'impiego di una struttura portante adattiva. L'obiettivo che i ricercatori dell'ILEK hanno fissato è attuare una drastica economia di materiale attraverso la manipolazione attiva della struttura stessa, con lo scopo di ottenere una migliore risposta alle sollecitazioni di tipo dinamico. La manipolazione si attua per mezzo di meccanismi idraulici: i meccanismi sono collocati in corrispondenza dei punti di appoggio del guscio e generano movimenti che compensano in modo mirato le deformazioni e le sollecitazioni del materiale impresse alla struttura dall'azione del vento, dalla neve e da altri carichi accidentali. I meccanismi permettono in oltre lo smorzamento attivo delle sollecitazioni dinamiche (dovute per esempio all'azione di vento, a sismi o esplosioni).



Fig. 2.2 | *PlusMinus*, ILEK, Stoccarda, 2007



Fig. 2.3 | *Smart Shell*, ILEK, Stoccarda, 2012

Presso il **Deployable Structures Laboratory (DSL)** di Cambridge (UK), guidato per molti anni da Sergio Pellegrino, sono stati attivati numerosi nuovi campi di ricerca, inclusi quelli riguardanti le strutture intelligenti e adattive, sviluppando con un forte legame col mondo industriale, in particolare quello aerospaziale.

Al **Kinetic Design Group del Massachusetts Institute of Technology (MIT)** di Cambridge (USA) si sviluppano progetti sugli involucri sensibili degli edifici, adattabili alle necessità funzionali degli utenti e selettivi verso le condizioni climatiche esterne: le attuali e sempre più impellenti istanze di sostenibilità sembrano in qualche modo dare impulso allo sviluppo di sistemi intelligenti che, ad esempio, agiscono sul recupero energetico facendo largo impiego di componenti meccanici e di un adeguato apparato di sensori. Prototipi realizzati sono il *Kinetic Wall*, l'*Interactive Kinetic Facade* e il *Moderating Skylights*.

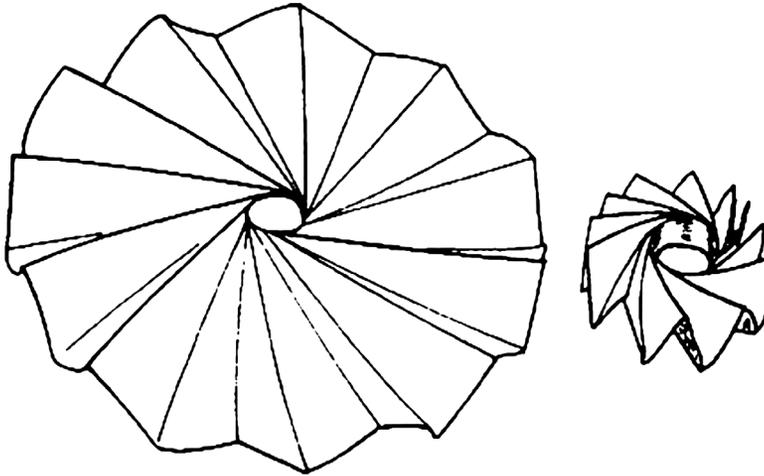


Fig. 2.4 | Studi sulle membrane dispiegabili per applicazioni aerospaziali, DSL, Cambridge, 1992

- Il *Kinetic Wall* non è altro che una partizione verticale, dotata però di estrema flessibilità: una struttura metallica a moduli triangolari che attraverso un sistema di sensori può conformarsi plasticamente a seconda delle esigenze.
- L'*Interactive Kinetic Facade* è un prototipo che tenta di integrare le tecnologie informatiche con quelle costruttive. Il sistema è costituito da una base verticale sotto la quale trovano posto dei motori che permettono la rotazione di tubi in metallo che si estendono a mensola dalla base stessa. All'estremità di ogni tubo è presente un sensore sonoro collegato alla base e ai motori, che permette l'allineamento costante delle barre alla sorgente sonora che si trova di fronte il muro. Il progetto è pensato per essere utilizzato come facciata di un edificio che si orienta continuamente seguendo i rumori provenienti dalla strada e, nonostante mostri di non rispondere a precise esigenze funzionali, rappresenta un'importante sperimentazione di integrazione tra tecnologie informatiche ed edilizia.
- Il *Moderating Skylights* è una chiusura orizzontale di copertura trasparente realizzata in lastre di vetro con struttura portante in aste e cavi metallici. Sull'estradosso della chiusura sono posizionati una serie di sensori che dialogano con una centralina che elabora le informazioni. L'output viene indirizzato ad una serie di attuatori capaci di regolare le lastre in modo da variarne l'apertura e l'orientamento, ottimizzando quindi l'intensità luminosa e l'aerazione in maniera interattiva in risposta alle condizioni termigrometriche.

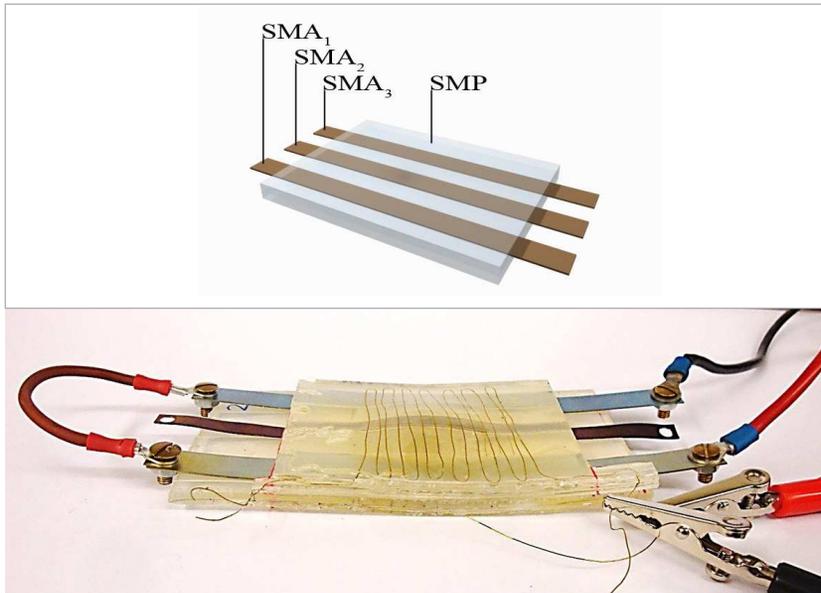


Fig. 2.5 | Adaptive Building Component (ABC), TU, Delft, 2013

Il gruppo di ricerca **Adaptive Building Systems della Technische Universiteit di Delft (TU Delft)** ha dato un importante contributo nel tentativo di sistematizzazione della nomenclatura esistente sul tema, come già accennato nel primo capitolo, ed ha portato avanti ricerche sulla possibilità di applicare i cosiddetti *smart material* per la realizzazione di un componente edilizio adattivo (ABC, *Adaptive Building Component*). La ricerca ha fondato i suoi sforzi sulla considerazione che ad oggi la possibilità di creare componenti edilizi a cambiamento di forma è stata associata a soluzioni di tipo meccanico che hanno portato a sistemi di movimentazione complessi e spesso ingombranti generando elevati livelli di rumore ed in alcuni casi anche importanti costi. Nell'ambito di questa ricerca Charlotte Lelieveld ha messo a punto un materiale composito innovativo che è costituito da strisce di leghe a memoria di forma (SMA, *Shape Memory Alloy*) immerse in una matrice di polimero a memoria di forma (SMP, *Shape Memory Polymer*). Nel composito sono inoltre annegati dei cavi riscaldanti connessi alle strisce in lega per attivare le deformazioni del polimero. Aumentando la temperatura il polimero passa alla fase gommosa e "accetta" le deformazioni che il calore induce nelle strisce in lega metallica, che fungono in questo caso da attuatori. Una volta interrotto il riscaldamento il polimero tornerà alla fase solida fissando la deformazione per tenere la quale le strisce in SMA avrebbero bisogno di una continua erogazione di energia.

Anche presso l' **Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)** della **University of Stuttgart** le ricerche degli ultimi anni sui componenti cinetici sono state impostate con un approccio innovativo che mira ad eliminare complessi sistemi meccanici per realizzare cerniere. Questi ultimi componenti risultano spesso soggetti a decadimento prestazionale con conseguente esigenza di frequente manutenzione. Essa non è sempre agevole o comunque comporta spese di gestione spesso eccessive. In tal senso la ricerca si è concentrata su componenti privi di cerniere, che sfruttano la piegatura con deformazione elastica del materiale. È così nato il progetto **Flectofold**, ispirato dal meccanismo di deformazione del fiore della *Strelitzia reginae*. Tale fiore presenta antere composte da due petali chiusi a protezione del polline. Quando un volatile si poggia su tali elementi la deformazione flessionale dell'antera determina una rotazione dei petali e l'apertura del sistema che rilascia il polline sul corpo degli uccelli. Quando il volatile si allontana l'elasticità del sistema consente di invertire la deformazione e richiudere i due petali. Tale movimentazione ha ispirato un componente realizzato con un materiale polimerico rinforzato con fibre (FRP, *fiber reinforced polymers*). Questi materiali presentano un vantaggio rispetto ai tradizionali materiali impiegati nel settore edilizio come l'acciaio o l'alluminio per la loro elevata deformazione elastica dovuta al ridotto rapporto rigidità-resistenza. In particolare il materiale impiegato è realizzato con un tessuto in fibre di vetro con armatura a tela e peso di 80 g/m<sup>2</sup>. I layer di tessuto sono variabili da 4 a 8 in relazione alla distribuzione delle tensioni sulla superficie.



Fig. 2.6 | Fiore della *Strelitzia reginae*

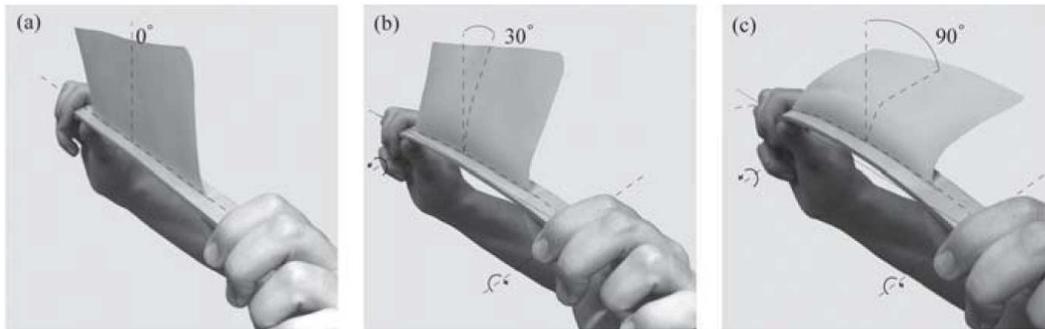


Fig. 2.7 | *Flectofold*, ITKE, Stuttgart, 2011

La matrice del composito è realizzata in resina epossidica ultra flessibile. Il processo di produzione scelto è il VAP (*Vacuum Assisted Process*). Il profilo che costituisce la spina dorsale del componente è prodotto con processo di pultrusione ed è vincolato con le “ali” laterali formando un sistema ad L (una sola ala) o a U (doppie ali). Tale profilo è realizzato in materiale polimerico rinforzato con fibre di vetro (GFRP, *glass fiber reinforced polymers*) orientate nella direzione degli sforzi longitudinali. La principale applicazione pensata per il componente è nelle schermature solari di facciata in cui un sistema di attuatori genera la flessione della spina dorsale centrale del componente che a sua volta determina l’apertura delle due lamelle laterali.

Gli approcci contemporanei al tema della responsività dei componenti architettonici tendono quindi a semplificare il più possibile i cinematismi evitando il ricorso a sistemi meccanici complessi. In particolare, nel caso di superfici pieghevoli si cerca di soppiantare le soluzioni con cerniera attraverso la piegatura per deformazione elastica del materiale. In questi casi si parla in letteratura di sistemi con cinematismo elastico (Barozzi et al., 2016)





## 2.2 Le realizzazioni

Alla ricerca scientifica si affiancano le applicazioni della pratica progettuale di architetture dotate di componenti con cinematismo. L'analisi tipologica sulle realizzazioni è un passaggio fondamentale per indirizzare il successivo lavoro. In particolare si è deciso di partire dal primo approccio all'argomento, realizzato da Frei Otto e dal suo gruppo di ricerca presso l'ILEK di Stoccarda, per implementarlo in considerazione delle realizzazioni più recenti.

### 2.2.1 Sistemi costruttivi

Gli studiosi tedeschi, pur concentrando la loro attenzione prevalentemente sui sistemi di copertura, hanno individuato tre sistemi costruttivi che consentono ai componenti edilizi di modificare la propria configurazione:

- sistemi a membrana mobile supportata da strutture fisse;
- sistemi a membrana supportata da struttura dotata di cinematismo;
- sistemi a elementi rigidi.

A questi vanno sicuramente aggiunti:

- sistemi pneumatici

#### 1. Sistemi a membrana mobile supportata da strutture fisse

Questo tipo di sistemi sono sicuramente i più antichi impiegati dall'uomo per la costruzione di componenti movimentabili ed hanno origine dalle esperienze, sviluppate nel corso dei millenni, nella movimentazione delle vele delle navi. Similmente un importante contributo deriva dall'esperienza delle popolazioni nomadi nella realizzazione delle tende e dalla costruzione di accampamenti di battaglia. Nei sistemi costruttivi a membrana mobile e strutture fisse la struttura portante è realizzata con materiali leggeri come legno o metalli da costruzione e può essere realizzata con semplici cavi tesi fra supporti rigidi, mentre l'involucro movimentabile può essere costituito da tessuti, naturali e sintetici, da film sottili di materie plastiche (come ad esempio film di ETFE) o da materiali compositi flessibili. Tali membrane sono movimentate da un sistema di cavi, in taluni casi anche molto complesso, cui esse sono fissate, mentre il vincolo con la struttura portante è in genere un giunto che consente il movimento. Un sistema di tal genere è caratterizzato da una notevole semplicità realizzativa ma, di contro, affida le sollecitazioni dinamiche legate al movimento a giunti di connessione tra struttura portante e membrana. Quest'ultima dovrà quindi essere adeguatamente rinforzata per evitare strappi e lacerazioni.

## 2. Sistemi a membrana supportata da struttura dotata di cinematismo

In questo sistema costruttivo il cinematismo è affidato alla struttura portante che è caratterizzata dalla presenza di snodi per la sua movimentazione. Le membrane sono vincolate alla struttura portante ed essendo costituite da materiali morbidi tendono a seguirne i movimenti adattandosi alle diverse configurazioni.

Rispetto al sistema precedente il tessuto risulta sottoposto a sollecitazioni minori poichè vincolato con nodi fissi alla struttura portante, ma deve essere posta particolare cura progettuale nelle configurazioni di ripiegatura delle membrane, che non devono venire in contatto con i meccanismi di movimentazione dello scheletro, per non rischiare di rimanervi impigliate (Beatini, 2011). In alcuni casi si può fare ricorso alla membrana per fini strutturali, prevedendo che il cinematismo dello scheletro, una volta che questo risulti dispiegato, metta in tensione la membrana stessa, rendendola collaborante con il funzionamento meccanico globale (Zanelli, 2003).

Esistono un gran numero di strutture portanti dotate di cinematismo.

### - Strutture a ombrello

Nella loro configurazione base o pieghevole, si basano sull'unione simmetrica di un certo numero di aste tutte uguali, raccolte attorno ad un asse centrale cui sono connesse attraverso una cerniera cilindrica che scorre in verticale. Il movimento della cerniera cilindrica genera l'apertura e la chiusura contemporanea dei singoli elementi.

### - Strutture collassabili

Sono dette così strutture basate su catene cinematiche che fra le infinite configurazioni che possono assumere, ne presentano una in cui tutte le membrature giacciono sul piano

### - Strutture tensegrali

Possono essere definite come strutture caratterizzate da un insieme discontinuo di componenti compressi all'interno di una rete continua di componenti tesi (Buckminster Fuller, 1962).

L'impiego di tali strutture per realizzare componenti dotati di cinematismo è limitato a numerosi prototipi di tipo sperimentale in cui la movimentazione viene attivata o agendo sul tensionamento dei cavi tesi con l'impiego di motorini o utilizzando come

elementi compressi delle barre telescopiche azionate da pistoni (d'Estrée Sterk, 2003, Ruscica, 2008, Cimmino et al, 2017).

- Strutture scorrevoli

Sono basate sulla ripetizione di moduli disposti in serie, in genere con movimento in direzione lineare, che assumono una configurazione chiusa raccogliendosi su piani paralleli ravvicinati (Beatini, 2011).

- Strutture reciproche

Sono strutture spaziali costituite da travi che si sostengono reciprocamente mediante vincoli di semplice appoggio. Come nel caso delle strutture tensegrali, il loro impiego in componenti cinetici è prevalentemente per soluzioni sperimentali. Possono essere usate come strutture pieghevoli con apertura perimetrale se gli elementi vengono disposti in modo da formare quadrilateri anziché i consueti triangoli (Saidani & Bavarel, 1998)

- Strutture estensibili

Le strutture estensibili possono essere definite come strutture che passano da una configurazione chiusa e compatta ad una predeterminata forma estesa, nella quale sono stabili e in grado di sostenere carichi (Beatini, 2011). Fra queste le più impiegate sono le strutture a forbice, caratterizzate dalla ripetizione di moduli costituiti da due barre, non necessariamente rettilinee, con cardini agli estremi ed incernierate tra loro in un punto intermedio. Quest'ultimo consente come unico movimento la rotazione relativa.

- Strutture a rotazione radiale

Sono un'evoluzione delle strutture a forbice che prevede la connessione di più elementi detti elementi angolati generalizzati (GAE, *Generalised Angulated Elements*) (Pellegrino & You, 1997). Quest'ultimo è costituito da un insieme di aste angolate interconnesse a formare una catena di un numero qualsiasi di parallelogrammi e triangoli isosceli (GAE tipo1) o triangoli simili (GAE tipo 2). La realizzazione più celebre di tale struttura è l'Iris Dome di Chuck Hoberman.

### 3. Sistemi a elementi rigidi

In questi sistemi costruttivi l'elemento di chiusura coincide con la struttura portante ed è costituito da pannelli rigidi. L'impiego di elementi rigidi da un lato limita le possibilità di cinematismo, ma dall'altro generalmente consente di sostenere condizioni di carico più gravose.

Tra questi sistemi posso essere distinte due categorie principali. La prima prevede il mutuo scorrimento dei pannelli, che possono determinare un cinematismo complessivo di scorrimento lineare, di scorrimento telescopico o di movimentazione radiale. Una seconda categoria interessa i sistemi in cui i pannelli sono incernierati tra loro ed il movimento complessivo è dato dalla muta rotazione degli elementi. In questa andrebbero ascritte le strutture che vanno dalla semplice "concertina", sistema basato sulla ripetizione di pannelli rettangolari incernierati in sequenza, impacchettabili e dispiegabili con movimento a soffietto, a sistemi con tassellazioni più complesse derivate dallo studio degli origami. In questi ultimi i pannelli vengono incernierati secondo specifiche linee di piega e dalla configurazione piana dispiegata possono muoversi assumendo anche configurazioni spaziali molto complesse.

### Sistemi pneumatici

Il sistema costruttivo pneumatico può essere considerato come un particolare sistema a membrana supportato non da uno scheletro tradizionale ma dalla pressurizzazione dell'aria. La pressurizzazione può essere applicata all'intero spazio definito in maniera globale dalla membrana, o può essere impiegata per conferire capacità resistente a singoli elementi realizzati con membrane gonfiabili (archi, pilastri, ...). In entrambi i casi il cinematismo consente di passare da una configurazione completamente amorfa, quando gli elementi risultano sgonfi, ad una configurazione finale con pressurizzazione tale da supportare i carichi previsti in progetto. Questo comportamento fa sì che i sistemi pneumatici siano impiegati prevalentemente per oggetti architettonici trasportabili più che per singoli componenti trasformabili. Per tale motivazione e poiché la complessità del tema meriterebbe una specifica trattazione, nel lavoro di ricerca presentato lo studio dei sistemi costruttivi pneumatici non viene approfondito.

## 2.2.2 Tipi di movimento

I tipi di movimento, individuati dagli studiosi dell'ILEK, che consentono ai componenti edilizi di modificare la propria configurazione sono:

- il raggruppamento;
- l'arrotolamento;
- lo scorrimento;
- la piegatura;
- la rotazione.

BAUART/ CONSTRUCTION SYSTEM	ART DER BEWEGUNG/ TYPE OF MOVEMENT	BEWEGUNGSRICHTUNG/DIRECTION OF MOVEMENT			
		PARALLEL/PARALLEL	ZENTRAL/CENTRAL	ZIRKULÄR/CIRCULAR	PERIPHER/PERIPHERAL
1 MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION FESTSTEHEND/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE STATIONARY	RAFFEN/ BUNCHING				
	ROLLEN/ ROLLING				
2 MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION BEWEGLICH/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE MOVABLE	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				
3 STEIFE KONSTRUKTIONEN/ RIGID CONSTRUCTIONS	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				

Fig. 2.10 | Otto F. et al., *Convertible roofs*, 1972  
Relazione tra sistemi costruttivi e tipi di movimento

### 2.2.3 Scopi del movimento

Alla classificazione tipologica consolidata vista nei paragrafi precedenti è stata affiancata una ulteriore scomposizione, utile da considerare per gli studi seguenti. Essa si basa sull'individuazione degli scopi progettuali per cui si prevede l'impiego di elementi dotati di cinematismo. Una prima classificazione può essere fatta distinguendo la fase di costruzione dalla fase di esercizio del bene architettonico.

#### In fase di realizzazione

Le prestazioni che consentono di rendere effettiva la velocità di messa in opera del bene, esigenza primaria nel caso di oggetti architettonici trasportabili come unità residenziali di emergenza, unità di primo soccorso, padiglioni espositivi o commerciali temporanei, sono due: l'assemblabilità (o facilità di montaggio) e la trasportabilità. Il cinematismo dei componenti può essere impiegato per compattarli in modo da minimizzare i tempi di assemblaggio, facilitarne il trasporto e al contempo limitare le attività previste in opera alla sola "apertura" del componente stesso. Un esempio in tal senso è la copertura del Kiosque progettato dai fratelli Bouroullec nel 2015 che è realizzata con una ripetizione modulare di pannelli metallici. Per facilitarne il trasporto e velocizzare la posa ogni modulo è costituito da due pannelli accostati, incernierati lungo un lato. Il modulo viene trasportato chiuso ed una volta in cantiere aperto a libro e montato sul padiglione.

#### In fase di esercizio

Per la fase di esercizio è stata realizzata un'analisi in funzione delle classi esigenziali cui le architetture dotate di cinematismo cercano di dare risposta attraverso specifici requisiti. Analizzando le opere degli ultimi anni i cinematismi vengono impiegati per dare risposta ai seguenti rapporti esigenze-requisiti:

Classi di esigenze	Requisiti
Sicurezza	Resistenza meccanica alle azioni dinamiche
	Resistenza alle intrusioni
Fruibilità	Attrezzabilità (adattabilità degli spazi)
Benessere	Controllo del fattore solare/flusso luminoso
	Controllo del rumore /isolamento/assorbimento acustico

- Resistenza meccanica

Rappresenta secondo la norma UNI 8290-2 l' idoneità a contrastare efficacemente il prodursi di rotture o deformazioni gravi sotto l' azione di determinate sollecitazioni. Soprattutto per contrastare le sollecitazioni di tipo dinamico, come quelle dei sismi, possono essere applicate tecniche di controllo che prevedono l' impiego di cinematismi. Oltre alle tecniche convenzionali, che prevedono ad esempio la riduzione della massa del fabbricato o l' adozione del criterio della gerarchia delle rigidità, solo per citarne alcuni, possono essere impiegate le così dette tecniche di controllo passivo o le tecniche di controllo attivo e semi-attivo. Le prime non prevedono l' applicazione diretta a componenti dell' edificio di cinematismi, ma la modifica di alcuni componenti, attraverso ad esempio l' introduzione di isolatori sismici, per consentire la formazione di movimenti controllati in caso di sisma. Le tecniche attive o semi-attive invece prevedono la presenza di un sistema sensoriale che percepisce le sollecitazioni dinamiche, di un sistema di elaborazione per formulare la risposta e di attuatori che o modificano la rigidità della struttura o generano su di essa delle forze e quindi un cinematismo che possa contrastare l' azione del sisma (come nel caso dello Smart Shell dell' ILEK visto al paragrafo 2.1 in cui pistoni idraulici generano un cinematismo di risposta alle sollecitazioni dinamiche).

- Resistenza alle intrusioni

Rappresenta secondo la norma l' attitudine ad impedire, con appositi accorgimenti, l' ingresso ad animali nocivi o persone indesiderate. È uno dei requisiti che viene meglio esplicitato da componenti cinetici. Infatti è difficile, ad esempio, assicurare la resistenza alle intrusioni delle chiusure verticali, quando esse devono anche rispondere ai requisiti di controllo del flusso luminoso o di ventilazione. Superfici vetrate o apribili sono punti di accesso agevoli ed è per questo che tradizionalmente la resistenza alle intrusioni è affidata a componenti che hanno possibilità di cinematismo come scuri esterni, saracinesche, inferriate, ...

- Attrezzabilità (adattabilità degli spazi)

L' attitudine a consentire l' installazione di attrezzature ed arredi è uno dei requisiti per i quali il cinematismo permette di conferire massima flessibilità al componente. L' impiego di partizioni scorrevoli, pieghevoli o rotanti ha caratterizzato l' architettura dalla rivoluzione razionalista fino ai giorni nostri per consentire una

molteplicità d'uso degli spazi, legata alla mutevolezza delle esigenze della vita moderna e contemporanea.

- Controllo del fattore solare/flusso luminoso  
L'attitudine a consentire un adeguato ingresso di energia termica raggiante/energia luminosa attraverso le superfici in funzione delle condizioni climatiche necessita proprio per questa sua dipendenza da variabili condizioni climatiche una chiara esigenza di modulazione delle prestazioni che solo componenti cinetici sono capaci di esplicitare, da sistemi più semplici a controllo manuale come tende, persiane o frangisole ai più complessi involucri automatizzati controllati da un Building Management System.
- Controllo del rumore /isolamento/assorbimento acustico  
Come nel caso precedente, la variabilità delle condizioni da controllare rende molto performante l'impiego di cinematismi che possono conferire al componente che deve esplicitare tali prestazioni una adattività al contesto.

Partendo da queste considerazioni si è provveduto a catalogare i più recenti progetti seguendo le due classificazioni tipologiche per individuare possibili sviluppi futuri della tematica.

Attraverso l'analisi del quadro sinottico delle realizzazioni si evince facilmente come la piegatura risulti il tipo di movimentazione più utilizzato grazie alla sua potenzialità espressiva e alla propensione al movimento. Per tale motivo la ricerca si è concentrata prevalentemente sulle superfici pieghevoli o *foldable surfaces*.

Categorie essenziali	Tipo di movimento			Scorrimento			Piegatura			Rotazione			
	Direzione del movimento	Parallelo	Centrale	Circolare	Periferico	Parallelo	Centrale	Circolare	Periferico	Parallelo	Centrale	Circolare	Periferico
Requisiti													
Sicurezza	Resistenza alle intrusioni												
Fruibilità	Attrezzabilità (adattabilità degli spazi)												
Benessere	Controllo del fattore solare / flusso luminoso												
	Controllo del rumore / Isol. acustico / Assorbimento												

- 1 DRMM, SLIDING HOUSE, SUFFOLK, 2009.
- 2 PINO ZOPPINI, PISCINA ALLA SCIORBA, GENOVA, 1993.
- 3 TAKENAKA KOMUTEN, DOME STADIUM, FUKUOKA, 1996.
- 4 JEAN NOUVEL, GRAN STADE DE FRANCE, SAINT DENIS, 1994.
- 5 ERNST GISELBRECHT, KIEFER TECHNIC SHOWROOM, BAD GLEICHENBERG, 2007.
- 6 STEVEN HOLL, VOID SPACE/HINGED SPACE, FUKUOKA, 1989.
- 7 HOBERMAN, EXPANDING FABRIC DOME, 1997.
- 8 AEDAS, AL BAHR TOWERS, ABU DHABI, 2012
- 9 RVTR, RESONANT CHAMBER, 2007.
- 10 MAKE ARCHITECTS, KIOSK, LONDRA, 2012.
- 11 DAVID PENNER, COROGAMI HUT, 2010.
- 12 MATTHEW MALONE, ACCORDION RECOVER SHELTER, 2006.
- 13 GANG ARCHITECTS, STARLIGHT THEATRE, ROCKFORD, 2003.
- 14 MING TANG, FOLDED BAMBOO HOUSE, 2008.
- 15 ROLF DISH, HELIOTROP HOUSE, FRIBURGO, 1995.
- 16 JEAN NOUVEL, INSTITUT DU MONDE ARABE, PARIGI, 1987

## KIEFER TECHNIC SHOWROOM

**Progettista:**  
Ernst Giselbrecht + Partner  
**Località:**  
Bad Gleichenberg  
**Anno:**  
2007

### Descrizione:

Edificio per uffici e spazi espositivi, presenta un involucro frangisole in pannelli di alluminio traforato dotati di cinematismo automatizzato che permette una chiusura a "libro" orizzontale. Il controllo automatico del sistema permette di ottimizzare il clima interno, ma anche di personalizzare l'illuminazione degli spazi su comando dell'utente.

### Requisiti prestazionali:

Resistenza alle intrusioni  
Controllo del fattore solare/fluxo luminoso

### Tipo di movimento:

Piegatura

### Direzione del movimento:

Parallelo



## AL BAHR TOWERS

**Progettista:**  
Aedas  
**Località:**  
Abu Dhabi  
**Anno:**  
2012

### Descrizione:

Le Al Bahr Tower sono uno dei più popolari progetti di edifici adattivi. Ispirato alle mashrabiya, l'involucro degli edifici è composto da una serie di moduli frangisole in pannelli di PTFE (polytetrafluoroethylene) controllati da un complesso building management system. Ogni singolo modulo ha un movimento di piegatura di tipo centrale, ad ombrello, per filtrare e modulare la radiazione solare incidente nel corso della giornata ottimizzando le condizioni termo-igrometriche interne.

### Requisiti prestazionali:

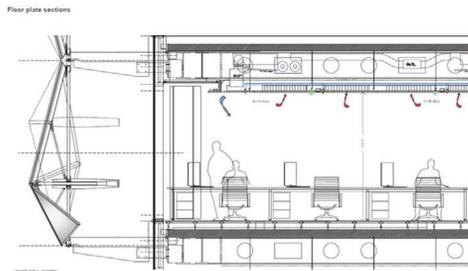
Controllo del fattore solare/fluxo luminoso

### Tipo di movimento:

Piegatura

### Direzione del movimento:

Centrale



## RESONANT CHAMBER

**Progettista:**

*RVTR*

**Località:**

*Variabile*

**Anno:**

*2011*

**Descrizione:**

*Il cinematismo, attraverso pistoni elettrici, permette di variare la risposta acustica dell'ambiente in cui il Resonant Chamber, sistema di pannelli per interni, è inserito. Il pattern di piegatura utilizzato consente di alternare pannelli fonoassorbenti o fono-riflettenti e, una volta messo in movimento e ripiegato, di bilanciarne la presenza in relazione alle diverse attività svolte all'interno della sala.*

**Requisiti prestazionali:**

*Controllo del rumore/isolamento  
Acustico/assorbimento*

**Tipo di movimento:**

*Piegatura*

**Direzione del movimento:**

*Centrale*



## KIOSK

**Progettista:**

*Make architects*

**Località:**

*Londra*

**Anno:**

*2014*

**Descrizione:**

*Basati sul concetto degli origami, i due chioschi sono stati realizzati interamente in stabilimento e trasportati, grazie alla loro leggerezza, facilmente attraverso rimorchiatori. L'involucro è realizzato in pannelli in alluminio incernierati tra loro che permettono un movimento rotatorio che chiude completamente il chiosco quando non è in servizio, facendogli assumere un aspetto monolitico.*

**Requisiti prestazionali:**

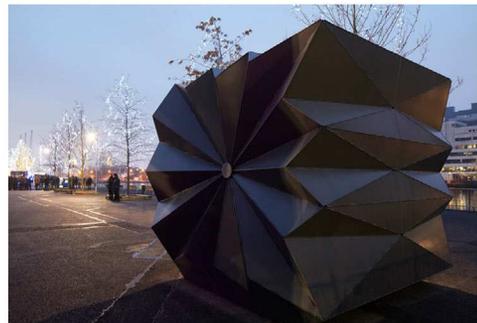
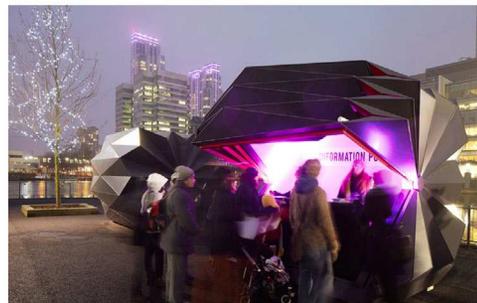
*Resistenza alle intrusioni*

**Tipo di movimento:**

*Piegatura*

**Direzione del movimento:**

*Centrale*



## ACCORDION RECOVER SHELTER

**Progettista:**

M. Malone, A. Goldberg, J. Metcalf e G. Meacham

**Località:**

Variabile

**Anno:**

2006

### Descrizione:

Prototipo a scala reale realizzato in due esemplari dai progettisti che lo hanno pure testato vivendoci dentro per quattro giorni, questo ricovero temporaneo per una famiglia di quattro persone è stato pensato per essere velocemente dispiegato, come una fisarmonica, e posto in opera da una sola persona. Realizzato in polipropilene è riciclabile al 100%

### Requisiti prestazionali:

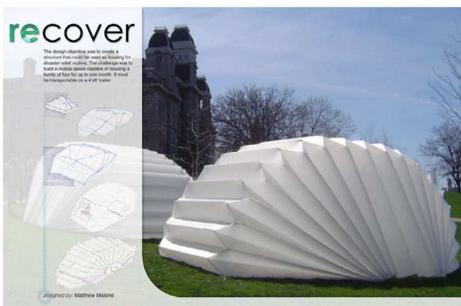
Attrezzabilità/adattabilità degli spaziale  
Controllo del fattore solare/flusso luminoso

### Tipo di movimento:

Piegatura

### Direzione del movimento:

Centrale



## COROGAMI HUT

**Progettista:**

David Penner

**Località:**

Winnipeg

**Anno:**

2010

### Descrizione:

Realizzato come ricovero temporaneo a servizio di una pista di pattinaggio, prende il nome dalla fusione di Coroplast, nome commerciale dei pannelli estrusi in polipropilene impiegati, e Origami, l'arte giapponese che ne ispira la geometria e il sistema di dispiegamento. L'idea alla base del progetto è quella di sfruttare a pieno le proprietà di un singolo materiale (leggerezza, economicità e sostenibilità) utilizzandolo come unico componente edilizio.

### Requisiti prestazionali:

Attrezzabilità/adattabilità degli spaziale  
Controllo del fattore solare/flusso luminoso

### Tipo di movimento:

Piegatura

### Direzione del movimento:

Parallelo



## SLIDING HOUSE

**Progettista:**  
dRMM  
**Località:**  
Suffolk  
**Anno:**  
2009

### **Descrizione:**

Una serie di volumi residenziali con funzioni diverse, separati tra loro, sono raccordati e trasformati da un involucro di 20 tonnellate che attraversa il sito creando in base alla posizione differenti condizioni di recinzione, di apertura e di inquadramento di vedute. l'involucro, in acciaio e legno, è completamente indipendente e scorre su binari ferroviari. il movimento è garantito da ruote nascoste nello spessore dell'involucro, alimentate da motori elettrici

### **Requisiti prestazionali:**

Resistenza alle intrusioni  
Controllo del fattore solare/flusso luminoso

### **Tipo di movimento:**

Scorrimento

### **Direzione del movimento:**

Parallelo



## BENGT SJOSTROM STARLIGHT THEATRE

**Progettista:**  
Studio Gang e Uni-System  
**Località:**  
Rockford  
**Anno:**  
2003

### **Descrizione:**

La nuova copertura del teatro nasce dall'esigenza di estendere la possibilità di ospitare spettacoli pure nelle stagioni piovose, mantenendo quando possibile, la teatralità degli spettacoli all'aperto. Sei pannelli lunghi 13 metri e larghi 11 metri a forma di triangolo sono incernierati su di un lato per permettere l'apertura della parte centrale del teatro.

### **Requisiti prestazionali:**

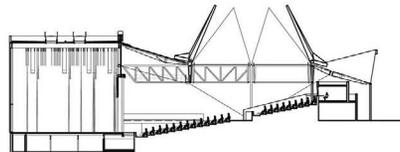
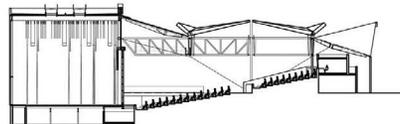
Adattabilità degli spazi  
Controllo del fattore solare/flusso luminoso

### **Tipo di movimento:**

Piegatura

### **Direzione del movimento:**

Periferico



## GRAN STADE DE FRANCE

**Progettista:**

Jean Nouvel

**Località:**

Saint Denis

**Anno:**

1994

### **Descrizione:**

Progetto di uno stadio, non realizzato, che si avvale di un sistema di coperture retrattili tramite cavi trattori e di tribune mobili che scorrono su rotaie garantendo un'adattabilità del complesso sportivo alle diverse manifestazioni ospitate.



### **Requisiti prestazionali:**

Attrezzabilità (adattabilità degli spazi)/controllo del fattore solare/ flusso luminoso

### **Tipo di movimento:**

scorrimento

### **Direzione del movimento:**

periferico



## VOID SPACE/HINGED SPACE

**Progettista:**

Steven Hall

**Località:**

Fukuoka

**Anno:**

1989

### **Descrizione:**

Nei ventotto appartamenti che costituiscono il complesso residenziale il progettista reinterpreta i pannelli scorrevoli delle abitazioni tradizionali giapponesi (Fusuma). Gli spazi sono definiti da pannelli incernierati che consentono massima flessibilità d'uso nel corso della giornata, ma anche di aggiungere ed eliminare stanze nel corso degli anni.



### **Requisiti prestazionali:**

Attrezzabilità (adattabilità degli spazi)

### **Tipo di movimento:**

piegatura

### **Direzione del movimento:**

parallelo



## PISCINA ALLA SCIORBA

**Progettista:**

Pino Zoppini

**Località:**

Genova

**Anno:**

1993

### **Descrizione:**

L'involucro della piscina è costituito da un sistema telescopico ad elementi rigidi. Questi costituiscono contemporaneamente le chiusure esterne verticali ed orizzontali e sono vincolati tra loro tramite un sistema a pantografo. Il sistema di scorrimento invece si avvale di due binari sui quali scorrono le sezioni fino a scomparire sotto ad una porzione di copertura fissa.

### **Requisiti prestazionali:**

Attrezzabilità ( adattabilità degli spazi)/controllo del fattore solare/ flusso luminoso

### **Tipo di movimento:**

scorrimento

### **Direzione del movimento:**

parallelo



## DOME STADIUM

**Progettista:**

Takenaka Komuten

**Località:**

Fukuoka

**Anno:**

1996

### **Descrizione:**

Il progetto prevede una grande cupola metallica a copertura dello stadio di Fukuoka.

Essa è costituita da tralici in acciaio assemblati in modo da costituire tre sezioni indipendenti, di cui una fissa e due mobili, incernierate in sommità. La chiusura/apertura avviene per rotazione in direzioni opposte delle due sezioni mobili lungo il perimetro circolare dello stadio.

### **Requisiti prestazionali:**

Controllo del fattore solare/ flusso luminoso

### **Tipo di movimento:**

scorrimento

### **Direzione del movimento:**

circolare



## EXPANDING FABRIC DOME

**Progettista:**

Hoberman

**Località:**

**Anno:**

1997

**Descrizione:**

Il progetto di questo prototipo in scala si basa sul funzionamento della sfera di Hoberman, struttura geodetica espandibile grazie alla presenza di una sistematica ripetizione di strutture a forbice. Un tessuto continuo è vincolato internamente ai nodi e segue il movimento complessivo definendo uno spazio mutevole.

**Requisiti prestazionali:**

Attrezzabilità ( adattabilità degli spazi)

**Tipo di movimento:**

piegatura

**Direzione del movimento:**

centrale



## FOLDED BAMBOO HOUSE

**Progettista:**

Ming Tang

**Località:**

**Anno:**

2008

**Descrizione:**

Il progetto di queste strutture pone al centro i requisiti di economicità, ecocompatibilità e facilità di produzione per rispondere in maniera tempestiva alle esigenze di ricovero in caso di calamità naturali. Una successione di telai preassemblati in bambù incernierati su di un lato vengono trasportati e dispiegati in loco. Una superficie continua derivante dal riciclo della carta consente di definire lo spazio interno.

**Requisiti prestazionali:**

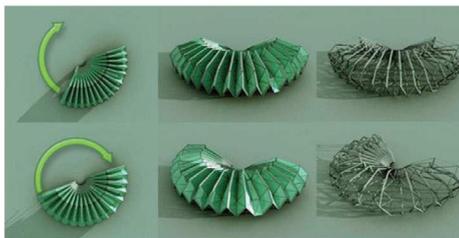
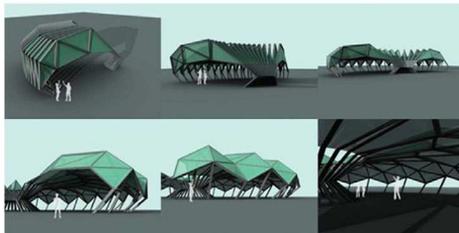
Attrezzabilità ( adattabilità degli spazi)

**Tipo di movimento:**

rotazione

**Direzione del movimento:**

centrale



## HELIOTROP HOUSE

**Progettista:**

Rolf Dish

**Località:**

Friburgo

**Anno:**

1995

**Descrizione:**

Edificio residenziale che sfrutta al massimo la radiazione solare grazie ad un sistema rotante che permette di ottimizzare gli apporti solari e garantire l'autosufficienza energetica dell'intero edificio. La rotazione coinvolge l'intero edificio ed avviene attorno ad un perno centrale (che ospita il corpo scala) dal quale si sviluppano ai vari piani gli alloggi.

**Requisiti prestazionali:**

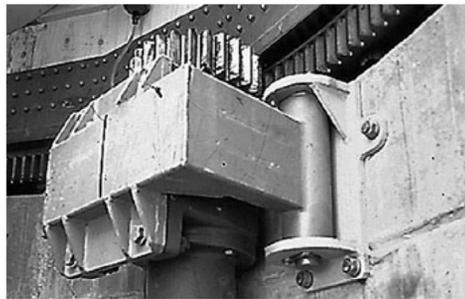
Controllo del fattore solare/ flusso luminoso

**Tipo di movimento:**

rotazione

**Direzione del movimento:**

centrale



## INSTITUT DU MONDE ARABE

**Progettista:**

Jean ouvel

**Località:**

Parigi

**Anno:**

1989

**Descrizione:**

Jean Nouvel progetta una facciata continua composta da pannelli vetrati nella cui intercapedine trova posto un complesso sistema di diaframmi metallici. Dei sensori opto-elettronici, permettono di mantenere costante la quantità di luce trasmessa all'interno dell'edificio. Tale espediente ha lo scopo di mantenere sempre un a condizione di luce attenuata.

**Requisiti prestazionali:**

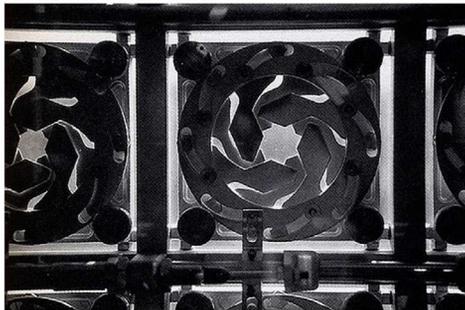
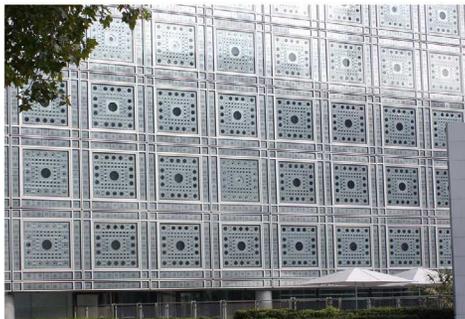
Attrezzabilità ( adattabilità degli spazi)  
Controllo del fattore solare/flusso luminoso  
Resistenza alle intrusioni

**Tipo di movimento:**

rotazione

**Direzione del movimento:**

periferica



## 2.2.4 Elementi per consentire il movimento

A seconda del sistema costruttivo adottato, la movimentazione può essere garantita con differenti soluzioni:

- sistemi rigidi e snodi;
- materiali con deformazione elastica;
- materiali flessibili.

### Sistemi rigidi e snodi

Per sistemi con strutture portanti dotate di cinematismo o per sistemi a elementi rigidi si rende necessario l'utilizzo di snodi che permettano il mutuo movimento degli elementi. Il tipo di snodo impiegato e i gradi di libertà di movimento che esso determina definiscono il cinematismo complessivo del sistema. Ad esso spetta anche il ruolo di trasferire le sollecitazioni da un elemento all'altro al fine di garantire la resistenza meccanica complessiva del sistema. Il tipo più semplice e diffuso è sicuramente la cerniera, che consente un solo grado di libertà di movimento agli elementi connessi che possono ruotare intorno all'asse della cerniera stessa. Sistemi più sofisticati sono rappresentati dai cuscinetti volventi, che consentono anch'essi la rotazione intorno ad un asse, mentre i cuscinetti scorrevoli consentono il reciproco movimento lineare tra due elementi. La progettazione e la scelta di tali snodi è legata al tipo di sollecitazione sia statica che dinamica cui essi vengono sottoposti e alla loro frequenza di utilizzo e di manutenzione.

### Materiali con deformazione elastica

Come già visto (cfr par. 2.1), le ricerche scientifiche più recenti tendono a limitare il più possibile il ricorso a sistemi meccanici per garantire la possibilità di movimentazione. Ciò è ascrivibile essenzialmente ad una necessità di semplificazione dei componenti cinetici, non tanto nella fase di realizzazione quanto piuttosto per la loro gestione. I sistemi meccanici, anche i più sofisticati, necessitano infatti di una manutenzione che comporta la predisposizione di piani ed attività periodiche di manutenzione. Spesso questi, per negligenza o per esigenze economiche, non vengono messi in atto causando un prematuro decadimento prestazionale degli elementi (si pensi ad esempio al sistema di schermature metalliche del prospetto dell'Istituto del Mondo Arabo a Parigi di Jean Nouvel del 1987). Una soluzione alternativa è rappresentata da sistemi con cinematismo elastico (Lienhard, 2014; Barozzi et al., 2016). In questi sistemi vengono impiegati materiali capaci di subire una deformazione,

immagazzinando energia, e di tornare alla posizione iniziale quando non più sollecitati. Tali sistemi, grazie all'assenza di cerniere hanno una esigenza di cicli di manutenzione molto inferiore rispetto ai precedenti e risultano quindi economicamente più sostenibili. I materiali impiegati nelle prime sperimentazioni architettoniche sono dei compositi come i polimeri rinforzati con fibra di vetro (GFRP) impiegati nella realizzazione delle lamelle frangisole del Thematic Pavilion all' EXPO 2012 a Yeosu o per il prototipo Flectofin dell'ITKE. Sempre in materiale composito è realizzato il pannello Hylite, costituito da un doppio strato di alluminio ed uno strato di polipropilene interposto. Tale pannello può essere piegato per componenti piegabili, se viene realizzata una fresatura di solchi paralleli su entrambe le superfici di alluminio esterne. Per esso i produttori garantiscono la possibilità di realizzare più di 80.000 cicli di chiusura. Tali proprietà hanno stimolato le ricerche su possibili applicazioni per *deployable shelter* (Curletto & Gambarotta, 2016). Oltre ai materiali compositi più innovativi, anche geometrie di lavorazione innovative di un materiale tradizionale come il legno consentono di ottenere componenti con un cinematismo legato alla deformazione elastica. Usando un sistema di taglio 2D ripetitivo gestito da una taglierina a controllo numerico (CNC, *Computer Numerical Control*) è possibile ottenere un materiale a pattern ripetitivo (RPM, *Repetitive Pattern Material*). Questi sono dotati di una elasticità che il materiale base costituente non possiede, ma che deriva dalla geometria di taglio (Ohshima et al., 2015).

### Materiali flessibili

Nei sistemi a membrana l'elemento di chiusura è realizzato con materiali molto flessibili (tessuti, film di materie plastiche e compositi flessibili) che tendono a seguire i movimenti cui vengono sottoposti dalla struttura portante. In questi casi il materiale non viene deformato, ma semplicemente dispiegato o ripiegato secondo le esigenze.

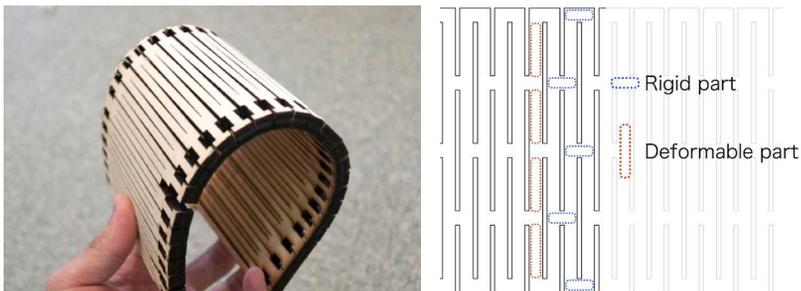


Fig. 2.11 | Pannello in legno intagliato con pattern ripetitivo per generare la curvatura

## 2.2.5 Modalità di movimento

L'introduzione di un cinematismo in un componente architettonico deriva dalla necessità di attuare un controllo attivo su di un sistema. Come accennato (cfr par. 2.2.3) i parametri da controllare possono essere di vario tipo (il comfort termico, il comfort acustico, la fruibilità di un ambiente, il comportamento meccanico di una struttura, ...) e la loro correzione può essere attivata sia manualmente che in maniera automatizzata.

Le modalità con cui può avvenire la movimentazione dei componenti sono strettamente legate allo scopo per cui il cinematismo viene impiegato. Nei casi in cui il cinematismo è funzionale ad esigenze fortemente variabili e difficilmente quantificabili, legate alle specifiche esigenze dell'utilizzatore, esso generalmente viene attuato manualmente. Si pensi ad esempio ad una parete scorrevole di separazione tra due ambienti; la sua apertura o chiusura dipende dalle estemporanee esigenze di fruizione che solo il fruitore stesso può conoscere e di conseguenza attuare. In questo caso, sia la percezione delle esigenze, sia la valutazione delle correzioni necessarie, sia l'attuazione del cinematismo per alterare il sistema vengono effettuate dall'utilizzatore.

Rimanendo nell'ambito dei sistemi a diretto controllo dell'utente un primo passo verso sistemi automatizzati si ha quando la sola attuazione, per evitare sforzi eccessivi dell'utente o perché impossibile con la sola forza umana, avviene attraverso sistemi elettrici meccanizzati. Sono questi ad esempio i casi di saracinesche automatizzate, sistemi cinetici mossi elettricamente per partizioni interne di sale polivalenti, gradonate di auditorium retrattili, ...

In altri casi invece un controllo diretto dell'utilizzatore è impossibile o sconveniente e pertanto viene impiegato un sistema di controllo interamente automatizzato. In questi casi lo stato del sistema viene valutato attraverso una serie di sensori, che captano anche le sue eventuali variazioni. Tali informazioni, una volta raccolte, vengono elaborate con un algoritmo decisionale che formula una risposta per la riconfigurazione secondo precise esigenze. Essa si ottiene grazie ad attuatori di moto, la parte del sistema di controllo che rende effettivo il cambiamento richiesto. È questo, ad esempio, il caso di un edificio per uffici con una schermatura solare che si attiva automaticamente quando la radiazione solare incidente sull'involucro esterno supera una certa soglia limite.

Spesso i parametri da valutare per definire lo stato di un sistema però non sono univoci ed è quindi necessario impiegare una serie di sensori, di diverso tipo, per fornire informazioni all'algoritmo decisionale.

L'elaborazione dell'algoritmo può essere inoltre impostata in maniera da sviluppare la scelta migliore agendo con più output e quindi più attuazioni. Un esempio in tal senso è il comfort ambientale, che deve essere valutato registrando diversi parametri (temperatura, umidità dell'aria, ventilazione diretta, ...) e pertanto per variare lo stato di un sistema in discomfort è spesso necessario attuare diverse strategie contemporaneamente (attivazione di schermature, apertura di finestre, apertura di riscontro di ventilazione, ...).

I sistemi di controllo più complessi riescono ad andare oltre quanto visto grazie alla capacità di complessi algoritmi decisionali di interagire con gli utenti e/o con l'ambiente. Questi sistemi sono infatti in grado di "leggere" le attività dell'utente e adattare le strategie di modifica del sistema in base alle sue specifiche esigenze. È questo ad esempio il caso di sistemi di controllo del comfort ambientale capaci di interpretare le attività umane, cioè sistemi che, rispetto alle condizioni standard di comfort, possono valutare le specifiche esigenze degli occupanti in base ai loro comportamenti (come utenze che tendono ad aprire le finestre in maniera più frequente o che impostano manualmente temperature più alte o più basse dello standard) adattando le risposte in termini di output da indirizzare al sistema di attuazione. Per semplicità sino ad ora sono stati distinti in maniera netta i componenti del sistema di controllo in sensori, algoritmi decisionali e attuatori. Le più recenti ricerche scientifiche si muovono verso una semplificazione di tali sistemi grazie all'impiego di *smart material* progettati ad hoc per uno specifico scopo. La possibilità di produrre un materiale con caratteristiche controllate in fase progettuale permette infatti di realizzare componenti che "reagiscono" a stimoli esterni ben precisi. Siano leghe o polimeri a memoria di forma, materiali compositi attivi, leghe bimetalliche o altro ancora, essi vengono impiegati nelle ricerche sui componenti architettonici per elementi capaci di reagire al cambiamento del sistema da controllare, modificando la propria forma o innescando sollecitazioni meccaniche su altri elementi non appena subiscono una variazione di input (di temperatura, di umidità, elettrica,...). Se da un lato l'impiego di tali materiali semplifica molto il sistema di controllo dall'altro bisogna tenere in considerazione che essi sono regolati da una reazione univoca che, una volta stabilita, non può essere modificata dall'utente durante il ciclo di vita del componente. Ad esempio un sistema di frangisole realizzato con materiali smart che si chiude automaticamente quando raggiunge una temperatura definita in fase progettuale, non potrà essere "forzato" dall'utilizzatore ad aprirsi per una sua specifica volontà temporanea. Allo stato attuale della ricerca quindi tali materiali permettono una

grande semplificazione dei sistemi di controllo a discapito di un basso livello di regolazione da parte della singola utenza.

A questa famiglia di materiali appartengono le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloys*, SMAs), ossia leghe metalliche che hanno la proprietà di avere due fasi nel loro stato solido. A basse temperature la lega si trova nella fase martensite, con basso modulo di elasticità e resistenza a trazione, e può quindi essere facilmente deformata. Quando viene invece riscaldata e portata oltre una certa temperatura caratteristica, propria di ogni tipo di lega, raggiunge la fase austenitica, nella quale recupera la rigidità e la forma precedente alle eventuali deformazioni subite a basse temperature. Questa importante proprietà fa sì che spesso tali leghe vengano utilizzate come attuatori per semplificare sistemi meccanici complessi. La problematica legata all'uso di questi materiali è che per mantenere la configurazione è necessario un continuo apporto di energia per non farne variare la temperatura. È inoltre importante tenere presente in fase progettuale il numero di cicli di trasformazione che il materiale è capace di subire.

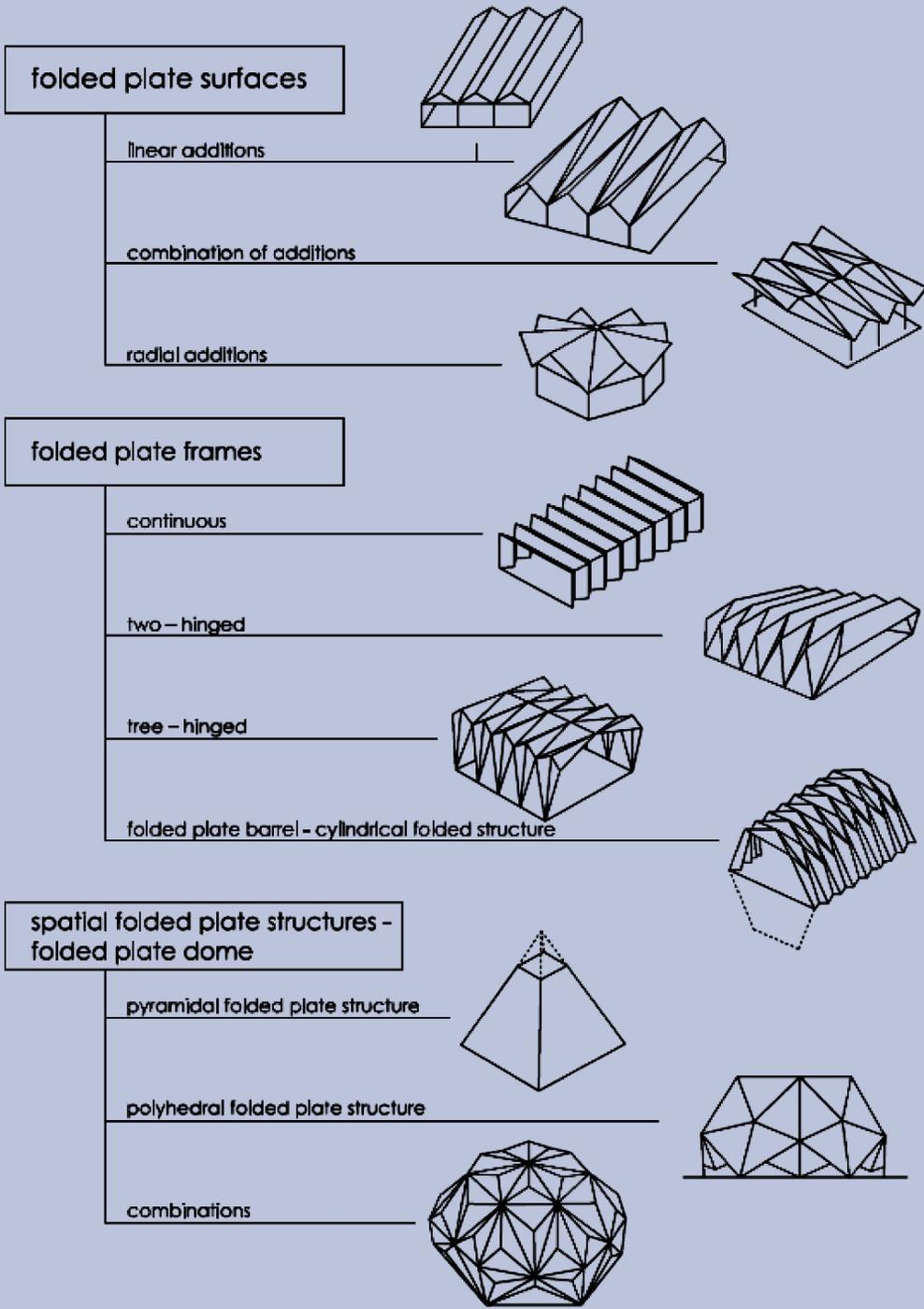
Anche i materiali termostatici (Ohkata & Suzuki, 1998) composti da strisce bimetalliche realizzate sovrapponendo due fogli di lamiera possiedono proprietà interessanti per gli scopi detti. Riscaldando il materiale infatti si genera una piegatura, dovuta all'impiego di metalli per la superficie superiore ed inferiore con differenti coefficienti di dilatazione. Non appena viene rimosso il carico termico l'elemento ritorna alla sua forma iniziale. La velocità con la quale avviene la piegatura dipende dalla conduzione termica e dai coefficienti di dilatazione termica dei materiali base coinvolti ed è in genere piuttosto bassa.

Questo materiale è al momento in fase sperimentale, con il nome di *Thermo-Bimetal*, presso la University of Southern California per creare il prototipo di un involucro edilizio responsivo autoventilante. È già stata condotta un'applicazione sperimentale realizzando un intreccio di nastri di *Thermo-Bimetal* che, una volta surriscaldato dalla radiazione solare, allarga la propria maglia, come conseguenza dell'allungamento delle "fibre" permettendo una maggiore ventilazione.

I polimeri a memoria di forma (SMPs, *Shape Memory Polymers*) hanno temperatura di transizione ( $T_g$ , *glass transition temperature*) tra la fase solida vetrosa e quella gommosa relativamente bassa, compresa tra i 50 e i 100 gradi centigradi, con brusco cambio di modulo di elasticità. Quindi, per temperature inferiori a questa il polimero è solido, mentre quando la supera, assume la fase gommosa e può essere facilmente deformato sotto le azioni di sollecitazioni esterne. Infine, esso mantiene la forma imposta quando è riportato al di sotto di una certa

temperatura. Se però viene riportato ad alte temperature (al di sopra della  $T_g$ ) e se non vincolato, riprende la sua forma originaria. I polimeri a memoria di forma sono in grado di recuperare deformazioni di circa il 100-400% per attivazione termica (Otsuka, et al 1998; Leng, et al 2011). Il ciclo di deformazione e di recupero della forma può essere ripetuto molte volte senza degrado delle prestazioni dei materiali.

folded plate structure systems



## 2.3 Le superfici corrugate (folded plate structure)

Negli ultimi anni, le superfici piegabili hanno trovato riscontro positivo in ambito ingegneristico e architettonico grazie alle prestazioni che sono capaci di esplicare. Ciò dipende in parte dalle proprietà meccaniche delle strutture corrugate (*folded plate structures*). La piegatura di una superficie produce un irrigidimento nella direzione della piega stessa; infatti una superficie piegata è capace di coprire uno spazio molto più grande rispetto ad una superficie piana, realizzata con lo stesso materiale e con pari spessore.

Questo incremento di prestazioni viene definito “resistenza per forma” (Salvadori & Heller, 1963). Tale proprietà è utilizzata in numerose applicazioni in cui è necessario ottimizzare l'impiego di materiale. Il risultato è una forma articolata il cui fascino consiste nella complessità delle geometrie di tassellazione, unitamente alla chiarezza compositiva della distribuzione delle tensioni nella forma.

In letteratura (Šekularac et al., 2012) le *folded plate structure* sono suddivise, in relazione alla geometria, in:

- *folded plate surfaces*;
- *folded plate frames*;
- *spatial folded plate structures*.

Le prime sono geometrie in cui tutti i vertici delle superfici costituenti sono contenuti in due piani, uno superiore ed uno inferiore, limiti del volume in cui si articola la superficie.

Nella seconda categoria rientrano geometrie costituite da due o più elementi della prima disposti su piani differenti.

Nelle *spatial folded plate* le superfici piegate sono combinate mutuamente in un insieme costruttivo spaziale.



Fig. 2.13 | Resistenza per forma delle superfici piegate

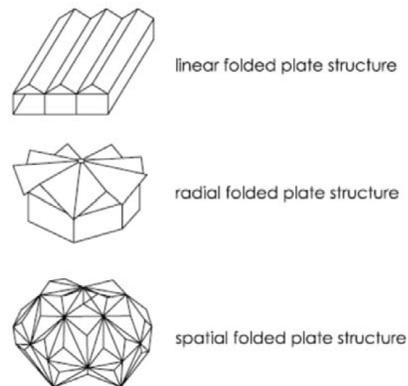


Fig. 2.14 | Šekularac N. et al., *Folded Structures In Modern Architecture*, 2012



Fig. 2.15 | Aula universitaria di Van den Broek en Bakema, Delft, 1966

Come ovvio la geometria influenza fortemente la trasmissione dei carichi determinando una ulteriore possibile divisione in:

- *linear folded plate structure;*
- *radial folded plate structure;*
- *spatial folded plate structure.*

I materiali impiegati per realizzare tali geometrie sono stati nel tempo molteplici: il calcestruzzo armato, il legno, il metallo, il vetro e le materie plastiche.

Il calcestruzzo armato è stato ampiamente impiegato nel corso del novecento per realizzare superfici corrugate ove fosse necessario coprire grandi luci minimizzando l'impiego di materie prime, sia attraverso l'uso di elementi prefabbricati, sia gettati in opera. Ne è un esempio l'Aula alla Delft University of Technology dello studio Van den Broek en Bakema

L'iniziale grande successo delle strutture corrugate nella prima metà del novecento ha profondamente legato queste realizzazioni alla pratica più ricorrente con cui esse venivano realizzate, ossia il calcestruzzo armato. La progressiva presa di consapevolezza delle debolezze prestazionali di questo materiale in termini di durabilità ha causato un allontanamento, sul piano progettuale, da questo tipo di strutture. Negli ultimi anni è possibile rilevare un rinnovato interesse grazie alle innovazioni tecnologiche sui materiali cosiddetti leggeri e alle possi-

bilità che il disegno digitale e gli strumenti di produzione a controllo numerico danno al progettista per l'ideazione e la realizzazione di queste complesse geometrie.

Il legno, quasi completamente trascurato nel corso del novecento, è oggi ampiamente utilizzato dall'industria edilizia grazie anche alla diffusione di soluzioni tecniche (legni lamellari, microlamellari, x-lam,...) che incrementano le caratteristiche prestazionali del legno massello. Queste innovazioni hanno dato seguito, nell'ultimo decennio, ad una serie di sperimentazioni sulla possibilità di impiego di elementi costruttivi in legno per realizzare strutture corrugate, sfruttandone la facilità di trasporto, di manovra e di assemblaggio. Rispetto alle soluzioni in cui la superficie corrugata in legno è supportata da strutture portanti (sempre in legno o in acciaio) a telaio, ad arco o spaziali, prevalgono le sperimentazioni e realizzazioni di strutture con pannelli portanti (Buri & Weinand, 2008). La struttura portante risulta in questo caso coincidente con l'elemento di chiusura.

L'utilizzo del vetro come materiale per l'edilizia ha oramai ampiamente superato l'applicazione univoca per elementi dell'involucro, riscuotendo oggi ampio successo nelle applicazioni di elementi costruttivi della struttura portante come solai, travi, pilastri, cupole. Questo progresso tecnico è dovuto in larga parte alla diffusione e al perfezionamento dei trattamenti del vetro (vetro temperato) e all'introduzione dei vetri stratificati. Anche per questo materiale, come nel caso del legno, si tende a far coincidere struttura e involucro. Ad oggi le realizzazioni di strutture corrugate in vetro nella pratica non sono molte, ma la ricerca e le sperimentazioni si stanno spendendo molto su questa tematica (Trometer & Krupna, 2006; Jamali, Nazar Pour & Barati Ardin,



Figg. 2.16-2.17 | Cappella temporanea di Localarchitecture + Danilo Mondada + Hani Buri + Yves Weinand, Pomaples, 2008

2015). Come nel caso del legno si tendono a limitare il più possibile l'impiego di altri materiali, ma in molti casi l'utilizzo dell'acciaio o di silicone strutturale per le connessioni tra le superfici rimane imprescindibile.

L'uso delle materie plastiche, ed in particolare delle resine di poliestere è diventato sistematico a partire dalla seconda metà del XX secolo e non mancano le applicazioni in strutture corrugate. Quando utilizzato come unico materiale si presta prevalentemente per la realizzazione di piccoli padiglioni temporanei o per emergenze (Corogami Hut e Accordion ReCover Shelter).

Nel 1966 Renzo Piano realizza una struttura temporanea per l'estrazione dello zolfo a Pomezia che rappresenta una delle prime sperimentazioni sull'uso di materie plastiche per geometrie corrugate. L'esigenza di un peso ridotto per garantirne una facile trasportabilità porta il progettista ad adottare una struttura corrugata in acciaio e pannelli romboidali in resina di poliestere agevolmente smontabili e trasportabili per permetter il riuso in zone estrattive differenti.

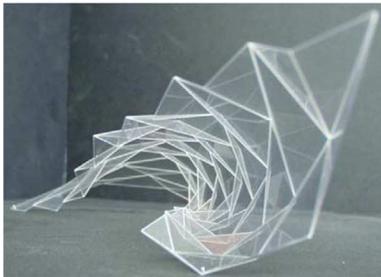


Fig. 2.18 | Trometer S. & Krupna M., *Development and design of glass folded plate structures*, 2006



Fig. 2.19 | Jamali M., Nazar Pour H. & Barati Ardin M., *Tensegrified Folded Glass Shells and Domes*, 2015



Fig. 2.20 | Struttura mobile per l'estrazione dello zolfo di Renzo Piano, Pomezia, 1967



## 2.4 Le superfici pieghevoli (foldable surfaces)

Le superfici pieghevoli hanno uno scarto in più rispetto alle superfici corrugate, rappresentato dalla piegabilità e quindi dalla possibilità di movimento, che conferisce loro un elevato grado di trasformabilità, pur mantenendo adeguate prestazioni meccaniche in tutte le possibili configurazioni assunte. Le sperimentazioni su tali temi, vista la complessità, spesso dialogano con i vari settori dell'ingegneria per coordinare aspetti legati alla natura dei materiali, al comportamento meccanico, alla composizione architettonica, alla produzione edilizia. Le caratteristiche viste rendono le superfici *foldable* degli ottimi strumenti per applicazioni in tipi di opere che necessitano di tali prestazioni: dalle emergenze ambientali agli eventi ricreativi, dalla prima accoglienza dei migranti alla protezione dei beni culturali. In questi settori, infatti, è possibile sfruttarne a pieno le prestazioni di leggerezza e reversibilità, riducendo i costi di trasporto, accelerando l'allestimento e sfruttando la forte capacità comunicativa delle geometrie impiegate.

Bisogna inoltre considerare che l'utilizzo di materiali leggeri come legno, vetro, lamiere metalliche e materie plastiche di ultima generazione nelle più recenti realizzazioni, reso possibile grazie alle innovazioni tecniche, esalta l'aspetto estetico-morfologico della superficie corrugata garantendo estrema leggerezza alla struttura complessiva.



Fig. 2.22 | Copertura mobile realizzata con struttura pieghevole in lastre di vetro sottili della SFL Technologies, prototipo, 2015



Fig. 2.23 | Chiosco di Make architects, Londra, 2014



## 2.5 Gli origami

L'approccio metodologico per la realizzazione e la gestione di geometrie attraverso il procedimento della piegatura delle superfici ha sicuramente un forte debito verso l'arte orientale degli Origami. Tradizionalmente il termine origami è associato all'arte di piegare la carta ("Ori" piegata "Kami" carta), ottenendo quindi geometrie astratte o ispirate alle forme della natura con la sola piega, senza altri tipi di deformazione (nessuno stiramento o lacerazione della superficie). Dagli anni '70 è nato un crescente interesse dei matematici verso le geometrie che è possibile creare con il principio degli origami e verso il cinematismo che alcune di queste sono capaci di esplicitare. Questo ha determinato che, nel corso dei quarant'anni passati, i principi alla base degli origami siano stati impiegati per: compattare strutture dispiegabili (ad es. gli airbag); strutture riconfigurabili in ambito robotico; core di strutture a sandwich ad elevate prestazioni meccaniche e di resistenza agli impatti; *deployable shelters*, ossia strutture a geometria dispiegabile per scopi militari o per emergenze umanitarie; *metamaterials*, materiali le cui performance non dipendono solo dalla struttura molecolare ma anche dalla geometria realizzative; dispositivi biomedici.

## 2.5.1 Geometria

Negli Origami la piega è la generatrice della morfologia e, come anticipato, consente di generare all'interno di una superficie una cerniera per il movimento e contemporaneamente un irrigidimento lungo la direzione di sviluppo. In particolare, fissato un sistema di riferimento XY sul piano della superficie, le pieghe possono essere distinte in pieghe di monte (*mountain fold*) e pieghe di valle (*valley fold*) a seconda che esse tendano a spostarsi, chiudendosi, nella direzione positiva o negativa della Z.

Il pattern di piegatura (*crease pattern*) è uno schema che mostra tutte le pieghe che sono richieste su di un foglio per piegarlo secondo un preciso intento. In genere le pieghe di valle sono indicate con linea continua mentre quelle di monte con linea tratteggiata.

Per descrivere il tipo di piega si individuano due parametri: l'angolo di piega e il raggio di curvatura della linea di piega. Per un foglio di spessore non infinitesimo infatti non è possibile immaginare una piega perfetta, affilata, ma bisogna considerare che una certa porzione del foglio, con centro la piega ideale, si curvi secondo un certo raggio di curvatura  $R$  (Peraza-Hernandez et al., 2014). L'angolo di piega interno  $\vartheta_i$  è l'angolo determinato dall'intersezione delle linee di estensione delle facce piegate, mentre l'angolo di piega esterno  $\vartheta_e$  è definito come la differenza  $180^\circ - \vartheta_i$ .

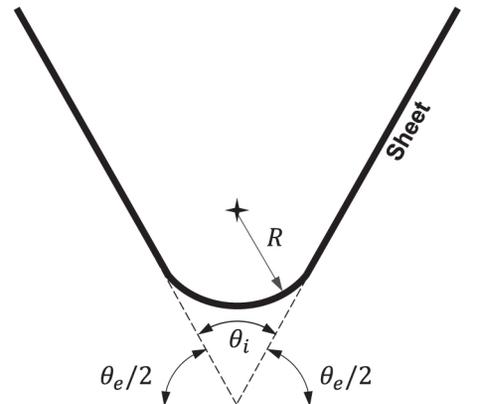


Fig. 2.25 | Angolo di piega  $\vartheta_e$  e raggio di curvatura  $R$

La realizzazione di una seconda piega (Casale & Valenti, 2012) o *reverse fold* è una ulteriore tecnica fondamentale degli Origami (Engel, 1989). Questa è una piega trasversale rispetto ad una piega principale che determina in quest'ultima un'inversione: una piega di monte che risulti attraversata da una *reverse fold* diventa di valle e viceversa, una di valle diventa di monte. Al contrario della prima categoria di pieghe che genera sulla superficie un'alternanza di monti e di valli, le pieghe trasversali si mantengono sempre o di monte o di valle. La relazione geometrica tra i due tipi di pieghe è determinata dall'angolo fisso  $\alpha$ , angolo acuto determinato fra la piega principale e la *reverse fold*, dall'angolo di inflessione  $\varphi$  e dall'angolo di apertura tra le pieghe principali  $\delta$ . Quando  $\varphi=180$  e  $\delta=180$  la superficie è distesa sul piano, mentre risulta completamente richiusa quando  $\delta=0$  e  $\varphi=180-2\alpha$  (Buri & Weinand, 2008).

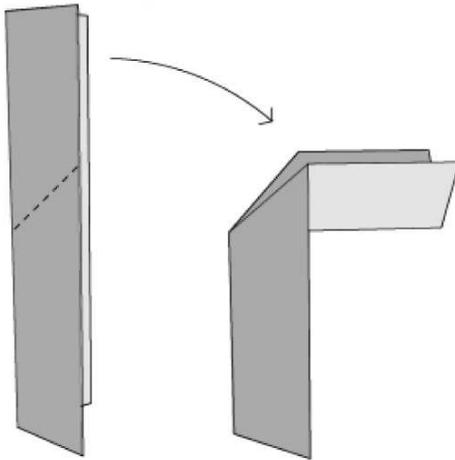


Fig. 2.26 | Come realizzare una *reverse fold*

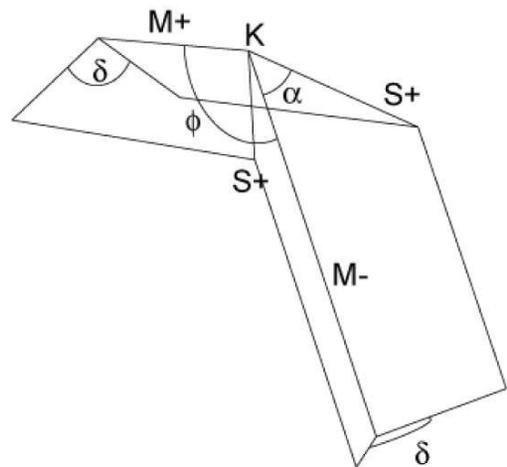


Fig. 2.27 | L'angolo fisso  $\alpha$ , l'angolo di inflessione  $\varphi$  e l'angolo di apertura  $\delta$

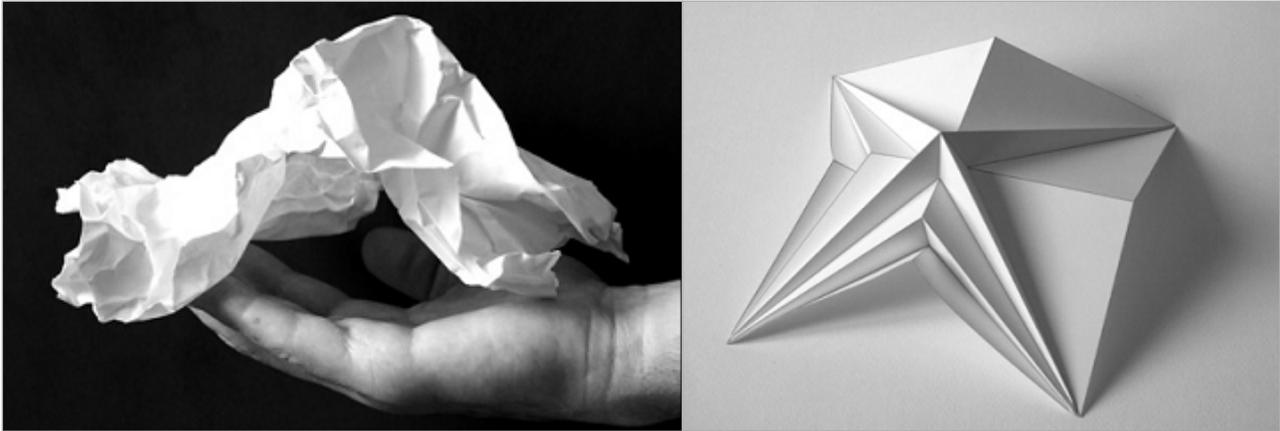


Fig. 2.28 | Ripetizione di pieghe con tassellazione fitta e disordinata e con tassellazione composta da poligoni differenti tra di loro

La ripetizione di pieghe sulla superficie può generare differenti tipi di configurazioni (Casale & Calvano, 2012):

- una tassellazione fitta e disordinata, con una superficie complessa e di difficile controllo;
- una tassellazione composta da poligoni differenti tra di loro, per raggiungere una specifica e fissa configurazione;
- una suddivisione in gruppi di tasselli uguali tra di loro che permette alla superficie di raggiungere una configurazione ordinata suscettibile di variazioni.

Questo terzo tipo rappresenta sicuramente quello più interessante per le applicazioni architettoniche, ingegneristiche e per i così detti *Smart Material* (Peraza-Hernandez et al. 2014). Tale suddivisione può generare nel piano texture con moduli base di differente geometria (triangolare, quadrangolare, pentagonale,...).

In particolare quelle quadrilatera possono essere generate da:

- pieghe longitudinali;
- pieghe longitudinali e trasversali parallele;
- pieghe longitudinali e trasversali contrapposte.

Mentre le texture triangolari da:

- pieghe longitudinali e trasversali

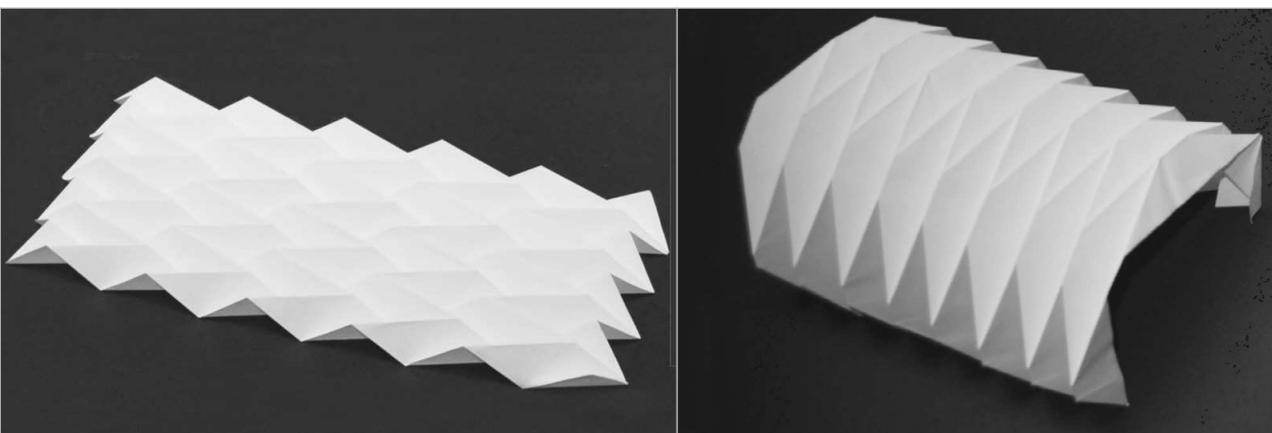


Fig. 2.29 | Ripetizione di pieghe con gruppi di tasselli uguali tra di loro: Miura Ori e Yoshimura pattern

Le tassellazioni più studiate in letteratura ed utilizzate nella pratica progettuale sono la Yoshimura e la Miura Ori.

Lo Yoshimura pattern (o Diamond pattern) (Yoshimura, 1955) è caratterizzato da una serie di pieghe longitudinali attraversate da reverse fold contrapposte che generano una continua inversione tra pieghe di monte e di valle. La tassellazione che viene a configurarsi tende a far richiudere la superficie su se stessa avvicinandosi alla geometria di un cilindro. A seconda della distribuzione delle reverse fold i tasselli generati, come già detto, possono essere triangolari o quadrilateri. Questa suddivisione ha importanti ripercussioni sul cinematismo della superficie. In caso di tasselli quadrilateri esiste una direzione preferenziale rettilinea di movimento della superficie, dalla configurazione completamente distesa sul piano a quella in cui tutti i vertici si toccano. Tale cinematismo sarebbe anche l'unico possibile se si considerassero i singoli tasselli infinitamente rigidi. Il pattern a tasselli triangolari conferisce, invece, alla superficie ulteriori gradi di movimento oltre la direzione rettilinea.

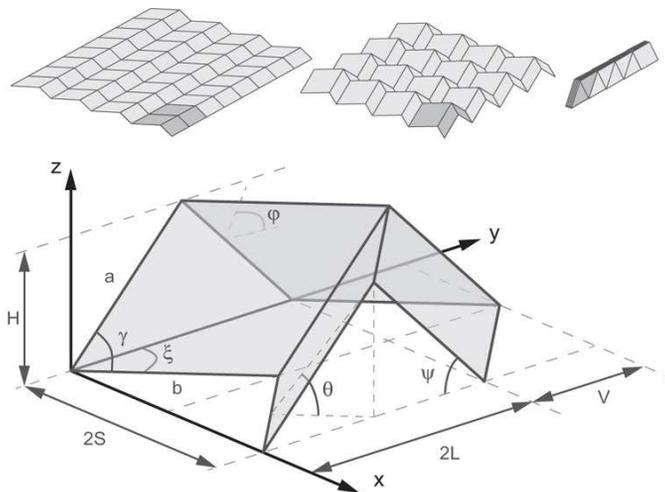
Il Miura Ori pattern (o Herringbone Pattern) (Miura, 1985) è anch'esso caratterizzato da una ripetizione di pieghe longitudinali attraversate da reverse fold, ma in questo caso queste ultime sono ripetute in maniera concorde. La tassellazione generata corruga la superficie pur tendendo a mantenerne la configurazione piana. I tasselli generati sono quadrilateri e il movimento imposto su di un tassello si ripercuote in maniera univoca su tutta la superficie. Il singolo tassello quadrilatero, definito dalle dimensioni  $a$  e  $b$  e dall'angolo  $\gamma$ , ha cinematismo definito dall'angolo diedro  $\vartheta \in [0, \pi/2]$  tra il tassello ed il piano orizz-

zontale  $xy$  (Schenk & Guest, 2013). Da questi dipendono tutti gli altri parametri che definiscono la geometria nelle varie configurazioni:

Il cinematismo di tale superficie è caratterizzato da un coefficiente di Poisson negativo nel piano, quindi quando essa viene allargata in una direzione tende ad allargarsi pure nell'altra; questa importante proprietà ne ha decretato il successo nell'uso aerospaziale (Miura, 1985; Miura & Tachi, 2010; Wilson, Pellegrino & Danner, 2013) e importanti studi nell'ambito dell'ingegneria dei metamateriali (Heimbs et al., 2010; Shenk, Guest & McShane, 2014).

La deformazione nel piano rimane l'unica possibile quando i moduli del pattern sono elementi rigidi, viceversa la superficie può deformarsi fuori dal piano. In questo caso si parla di *twisting* o di *saddle-shape deformation* (Schenk & Guest, 2013).

La metodologia di analisi delle geometrie ad origami ha necessità quindi sicuramente di partire dallo studio di semplici modelli fisici per poterne analizzare morfologia e cinematismo e per individuare quali abbiano la capacità di rispondere ai requisiti essenziali delle applicazioni edilizie.



$$H = a \cdot \sin \theta \sin \gamma$$

$$S = b \times \frac{\cos \theta \cos \theta t}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \gamma}}$$

$$L = a \times \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \gamma}$$

$$V = b \times \frac{1}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \gamma}}$$

## 2.5.2 Metodi di modellazione meccanica

I metodi proposti in letteratura per la modellazione meccanica degli origami possono essere raggruppati nei seguenti tipi: simulatori per origami rigidi (Tachi 2009); metodi che descrivono le superfici come gusci sottili attraverso un'analisi agli elementi finiti; approcci basati sulla modellazione della superficie parzialmente piegata come una struttura reticolare (Schenk 2011). In quest'ultimo caso, analizzato nei paragrafi seguenti, ogni vertice è modellato come una cerniera ed ogni piega come un'asta ed inoltre i tasselli generati dalle pieghe che non siano triangolari vengono triangolati, così da evitare soluzioni interne banali e fornire un'approssimazione del primo ordine alla piegatura dei tasselli.

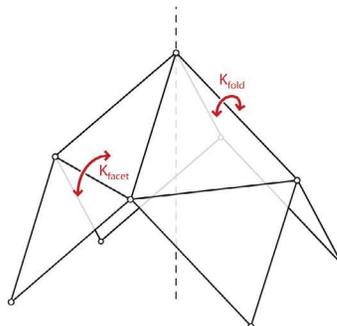
Nel modello vengono inoltre aggiunte la rigidezza a flessione attorno alle linee di triangolazione e di piegatura, rispettivamente  $K_{\text{facet}}$  e  $K_{\text{fold}}$ . Le proprietà meccaniche delle travi reticolari sono descritte da tre equazioni linearizzate: di equilibrio, di compatibilità e di proprietà dei materiali (Guest, 2006):

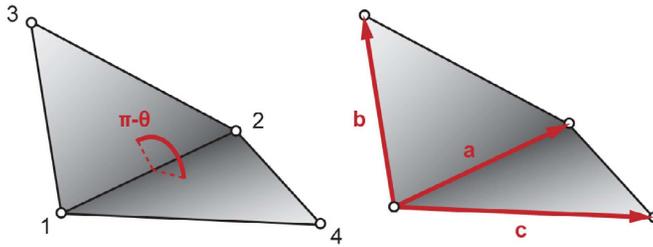
$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{t} &= \mathbf{f} \\ \mathbf{C}\mathbf{d} &= \mathbf{e} \\ \mathbf{G}\mathbf{e} &= \mathbf{t} \end{aligned}$$

Dove:

- $\mathbf{A}$  è la matrice di equilibrio, che lega la sollecitazione interna alle aste  $\mathbf{t}$  alle forze applicate nei nodi  $\mathbf{f}$ ;
- $\mathbf{C}$  è la matrice di compatibilità, che lega gli spostamenti nodali  $\mathbf{d}$  agli allungamenti delle aste  $\mathbf{e}$ ;
- $\mathbf{G}$  è la matrice la cui diagonale rappresenta la rigidezza assiale delle barre

Può inoltre essere dimostrato attraverso il principio dei lavori virtuali che  $\mathbf{C}=\mathbf{A}^T$ .





### Analisi cinematica

Il comportamento elastico lineare della travatura reticolare può essere descritto analizzando il sottospazio vettoriale delle matrici di equilibrio e compatibilità (Pellegrino & Calladine 1986).

Di principale interesse è lo spazio nullo della matrice di compatibilità  $C$ , in quanto fornisce gli spostamenti nodali che (per primo ordine) non determinano allungamenti delle aste.

$$Cd=0$$

Ma nel caso specifico delle superfici ad origami, lo spazio nullo della matrice di compatibilità convenzionale non fornisce informazioni molto utili. Infatti i tasselli triangolati possono facilmente “piegarsi”, e ciò si riflette in un numero equivalente di soluzioni interne banali.

Per risolvere tale inconveniente vengono introdotti dei vincoli aggiuntivi, riformulando la matrice di compatibilità come lo Jacobiano dei vincoli quadratici di lunghezza delle aste, rispetto alle coordinate nodali.

Nel nostro caso viene aggiunto un vincolo sull'angolo diedro tra due tasselli triangolati adiacenti.

Il vincolo angolare  $F$  è definito in termini dell'angolo diedro di piego  $\vartheta$  tra due tasselli. Utilizzando l'analisi vettoriale, l'angolo tra due tasselli può essere descritto in termini di prodotti vettoriali e scalari delle coordinate nodali  $\mathbf{p}$  delle due facce.

$$F = \sin(\theta) = \sin(\theta(\mathbf{p})) = \dots$$

E lo Jacobiano diventa:

$$J = \frac{1}{\cos(\theta)} \sum \frac{\partial F}{\partial p_i} dp_i = d\theta$$

Lo Jacobiano dei vincoli addizionali  $J$  può quindi essere concatenato con la matrice di compatibilità esistente

$$\begin{bmatrix} C \\ J \end{bmatrix} d = \begin{bmatrix} e \\ d\theta \end{bmatrix}$$

e lo spazio nullo di questo sistema di equazioni produce gli spostamenti nodali  $d$  che non comportano estensione delle aste, così come non violano i vincoli angolari.

Al fine di tracciare i movimenti dell'origami, si seguono iterativamente i meccanismi infinitesimali mentre si correggono gli errori usando la pseudo-inversa di Moore-Penrose (Tachi, 2009).

Il principale interesse rimane comunque negli spostamenti infinitesimali di primo ordine.

### Analisi di rigidezza

L'analisi cinematica, anche se con i vincoli addizionali, può fornire solo alcune informazioni. Il passaggio successivo è il passaggio ad una analisi della rigidezza. Le 3 equazioni (equilibrio, compatibilità e proprietà dei materiali) possono essere combinate in una singola equazione, che lega le forze esterne applicate  $f$  agli spostamenti nodali  $d$  attraverso la matrice di rigidezza del materiale  $K$ .

$$Kd=f$$

$$K=AGC=C^T GC$$

Questo viene esteso da Schenk agli altri tipi di vincoli estendendo la matrice di compatibilità.

$$K = \begin{bmatrix} C \\ J \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ J \end{bmatrix}$$

Da questi studi si evince come un parametro fondamentale per gli origami risulti essere  $K_{ratio} = K_{facet} / K_{fold}$ . Questo è un parametro adimensionale che rappresenta le proprietà del materiale con cui si realizza l'origami. Quando  $K_{ratio} \rightarrow \infty$  si è in una condizione di tasselli rigidi connessi con cerniere lineari prive di attrito; un valore  $K_{ratio} \approx 1$  caratterizza materiali in fogli di metallo, di plastica o di carta. Quando  $K_{ratio} < 1$  le linee di piegatura sono più rigide dei tasselli, ossia il caso di metalli temprati o di tasselli indipendenti uniti poi mediante saldatura.



### 2.5.3 Gli smart e gli active material per le superfici ad origami

Le ricerche sulla geometria e sul comportamento meccanico delle strutture ad origami si sono mosse di pari passo con la ricerca su materiali con caratteristiche prestazionali che li rendano adatti per questi scopi, andando oltre le simulazioni di ricerca sul semplice foglio di carta.

Nella gran parte delle applicazioni delle superfici ad origami, che spesso vanno oltre il mondo dell'architettura (Peraza-Hernandez et al, 2014) l'uso di attuatori esterni che generano le movimentazioni non è possibile (si pensi ad esempio ai dispositivi biomedicali per i quali gli origami sembra possano avere un florido futuro) o comunque potrebbero risultare antieconomici e di difficile manutenzione. Per tale motivo ci si rivolge a strutture *self-folding* che abbiano la possibilità di piegarsi e dispiegarsi senza manipolazioni esterne. Tale proprietà viene raggiunta nella maggior parte dei casi impiegando i così detti **active material**, materiali capaci di tradurre varie forme di energia in lavoro meccanico.

Le ricerche degli ultimi anni hanno portato ad una serie di sperimentazioni su quelli che vengono definiti *shape-morphing smart material system* (Lelieveld & Voorbij 2008): sistemi di materiali capaci di modificare le proprie caratteristiche dimensionali in risposta a input esterni. Ad esempio polimeri elettroattivi e materiali piezoelettrici utilizzano la corrente elettrica per generare piegatura delle superfici, ma hanno la necessità di un campo elettrico continuo o di elevati potenziali elettrici (circa 1000 V) per generare le deformazioni.

Nella stessa direzione si muovono le ricerche del *Self-Assembly Lab* diretto da Skylar Tibbits presso l'*International Design Center* del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) sui **programmable material**. Tali materiali sono stati progettati sfruttando le proprietà che è possibile ottenere grazie all'impiego dei materiali compositi e di un proces-



Figg. 2.30-2.31 | *Bloom* di Doris Kim Sung, Los Angeles, 2011

so di produzione basato sulla stampa 3D. Grazie a tali ritrovati sono stati prodotti materiali capaci di auto-assemblarsi, partendo da una configurazione piana che ne facilita il trasporto. Anche in questo caso l'idea alla base della ricerca è quella di fornire materiali innovativi capaci di compiere movimenti, alla stregua di sistemi robotici, senza sistemi meccanici complessi (sensori, attuatori...). Il risultato sono una serie di materiali tra i quali: *Programmable Carbon Fiber*; *Programmable Wood*; *Programmable Textile*.

Il Programmable Carbon Fiber è stato realizzato partendo da un tessuto in fibra di carbonio flessibile su cui è stato stampato un materiale attivo. L'attivazione, tramite calore, tende a fare incurvare il materiale secondo la geometria di deposizione del materiale attivo.

Il Programmable Wood è stato progettato per superare le tradizionali difficoltà nel piegare il legno realizzando un materiale ottenuto per stampaggio, tramite stampa 3D, di un materiale composito a base di legno. Il processo di produzione tramite stampa 3D consente di concentrare maggiori o minori quantità di materiale secondo specifiche geometrie.

Le prove condotte in laboratorio hanno sfruttato la diversa igroscopicità del materiale, in base alla quantità e alla geometria del deposito di composito, per utilizzare l'acqua come attivatore di movimento.

Se da un lato le ricerche su tali materiali mostrano grandi innovazioni, dall'altro le applicazioni in ambito architettonico rimangono limitate. La dimensione dei componenti architettonici, i pesi in gioco e quindi le tensioni necessarie per la movimentazione sono ancora lontani da quelli raggiungibili da questi materiali. Nonostante ciò la strada verso una estrema semplificazione dei componenti dotati di cinematismo è segnata e la liberazione da complessi elementi meccanici sempre più vicina.



Fig. 2.32 | *Programmable Wood*

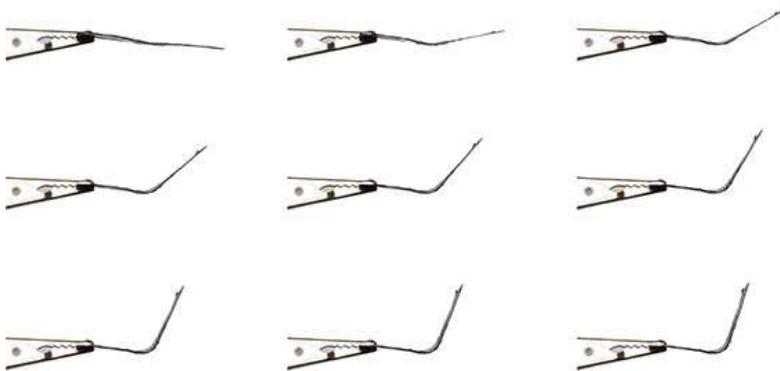
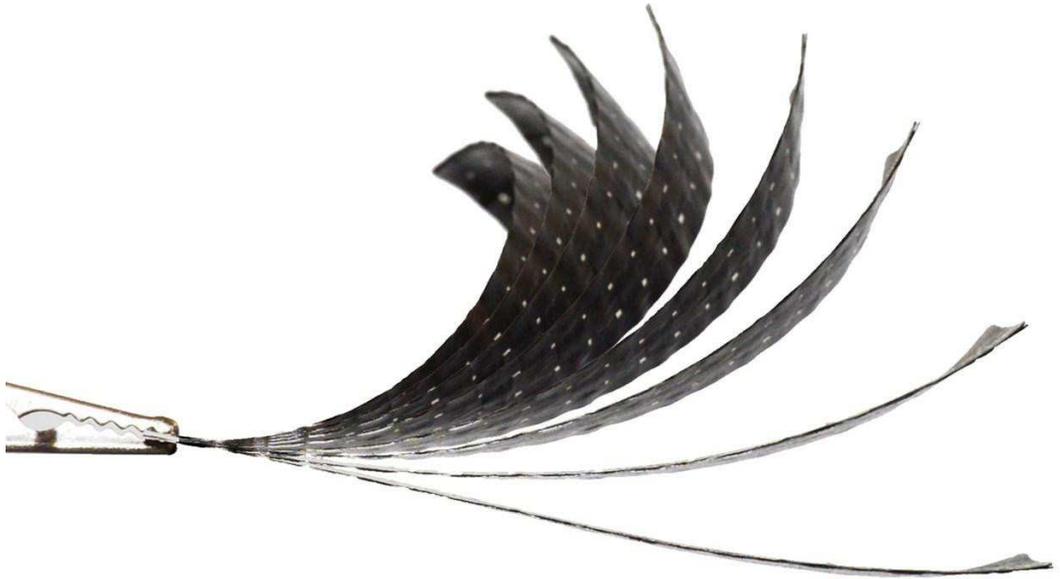


Fig. 2.33 | Programmable Carbon Fiber

### 3 OBIETTIVI

Il programma di ricerca KREO ha il suo punto di partenza nella ricognizione dello stato dell'arte (ricerche e realizzazioni), secondo il modello già presentato, al fine di individuare il contesto in cui la ricerca va ad inserirsi e rispetto al quale crea un avanzamento.

Lo studio di elementi di fabbrica ed involucri globali pieghevoli presuppone l'analisi di geometrie e cinematismi complessi che vengono gestiti attraverso modelli concettuali, fisici e parametrici. Questi permettono di studiare quale tra le diverse tassellazioni cui è possibile sottoporre una superficie siano più appropriate per applicazioni di cinematismi in architettura.

Per tali studi si è deciso di sperimentare l'uso di un unico materiale, che, similmente a quanto accade con il foglio di carta, possa avere una pre-piegatura in grado di fornire sia una certa resistenza per forma che linee preferenziali di movimento. Per garantire la possibilità di movimento si è deciso di sfruttare la deformazione elastica del materiale stesso. In particolare l'indagine coinvolge materiali compositi appositamente messi a punto, di cui è studiata la composizione ed il possibile processo di produzione. Quelli risultati idonei alle analisi preliminari sono stati testati per verificarne le caratteristiche meccaniche. Ricordando che l'obiettivo finale della ricerca è la sperimentazione su un componente applicabile nella pratica progettuale, un ulteriore aspetto su cui si è concentrata l'indagine è il tema della configurazione di tale componente realizzato con il materiale studiato, o meglio sulla gestione della differenti configurazione del componente ad origami.

A valle di ciò, sono stati individuati alcuni casi studio specifici per definire un quadro esigenziale concreto. Ciò ha permesso di calibrare le prestazioni del componente ed effettuare valutazioni sulla reale fattibilità di un oggetto edilizio *foldable* del materiale prescelto.

## 4 METODI E STRUMENTI

### 4.1 Conformazione del materiale KREO

#### 4.1.1 Il materiale e il processo di produzione

L'individuazione dello stato dell'arte e di metodi e strumenti per lo studio ed il controllo della morfologia delle superfici pieghevoli risolve lo snodo della possibilità di configurazione di tali oggetti edilizi e apre la strada alla ricerca di soluzioni innovative. Si reputa però necessario un approfondimento ulteriore nella direzione del modo per interpretare tali superfici nella realtà produttiva, alla luce soprattutto delle recenti evoluzioni nel campo degli *smart material*. Pertanto il contributo della ricerca si rivolge all'analisi della conformazione delle superfici, indirizzandosi sull'innovazione nel campo dei materiali.

L'idea è quella di ottenere un materiale facilmente controllabile, come un foglio di carta che, se piegato, viene agevolmente movimentato attorno all'asse definito dalla piega stessa. In ambito architettonico i materiali ad oggi più impiegati che possano avvicinarsi al comportamento di un foglio sono quelli utilizzati per le così dette *textile architecture* (Maurin & Motro, 2013) o *fabric structure* (de Llorens, 2015). Essi sono in genere tessuti, naturali o sintetici, rivestiti con materiali polimerici che ne incrementano le proprietà meccaniche e di durabilità (Houtman, 2015).

Le sperimentazioni condotte sono state pertanto concentrate sui materiali compositi, cioè materiali composti da più costituenti per garantire, combinandone le proprietà, un incremento prestazionale. Genericamente essi sono costituiti da una matrice, ossia una fase continua omogenea, ed un rinforzo, una fase dispersa in varie modalità all'interno della matrice. Il rinforzo conferisce il maggior contributo alla rigidità e resistenza meccanica, mentre la matrice fissa in posizione il rinforzo e determina la finitura superficiale e la resistenza al decadimento prestazionale del composito (Phol, 2010). Inoltre le modalità con cui il processo di realizzazione del composito viene messo in atto hanno importanti effetti sul componente finale.

Per le così dette *textile architecture* i materiali utilizzati sono tessuti, naturali o sintetici, annegati in materiali polimerici. I tessuti impiegati presentano caratteristiche molto differenti: da materiali economici e con tempo di vita utile piuttosto limitato, come il PET (polietilene tereftalato), a materiali con elevate performance come le fibre aramidiche o fibre di PTFE (Politetrafluoroetilene). Tra le fibre naturali, le più impiegate sono quelle di cotone, anche se hanno un tempo di vita

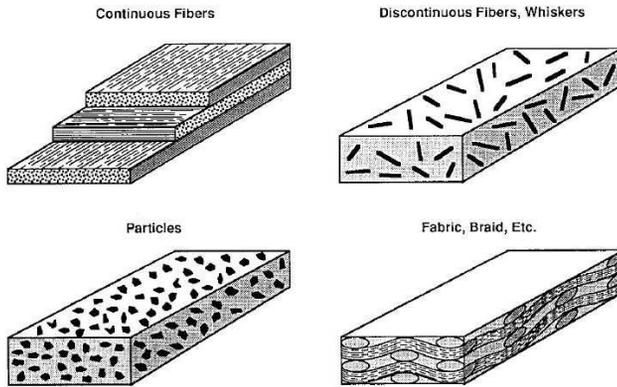


Fig. 4.1 | Tipi di rinforzo nei materiali compositi: fibre continue, fibre discontinue, particelle e tessuti

utile di circa 4-5 anni. Fibre in canapa o in lino hanno cicli di produzione più sostenibili, hanno prestazioni meccaniche migliori e migliore resistenza ai raggi UV rispetto a quelle in cotone ma nonostante ciò sono scarsamente impiegate (Houtman, 2015).

Nel caso specifico della ricerca si è scelto di utilizzare come rinforzo un tessuto in fibre e come matrice un elastomero termoplastico (TPE, *thermoplastic elastomer*). L'idea è quella di conservare le caratteristiche di leggerezza e versatilità proprie dei tessuti, conferendo però impermeabilità e protezione alle fibre dal degrado dovuto agli agenti atmosferici. L'utilizzo di un elastomero termoplastico, inoltre, garantisce, grazie al tipo di reticolazione delle sue strutture, la piegabilità del composito. Infatti, al contrario dei termoindurenti che una volta prodotti se riscaldati si degradano, l'impiego di un termoplastico permette di realizzare un processo di lavorazione secondario con modellazione a caldo del composito per conferire un determinato pattern di piegatura successivamente alla produzione del composito stesso. L'idea di una produzione in due fasi è strettamente legata all'esigenza di non creare una forma definita a priori, ma renderla personalizzabile per ogni singolo progetto, per diversi componenti e differenti cinematici. Il materiale base, un composito prodotto industrialmente, può poi essere configurato con uno specifico pattern di piegatura che garantisce la possibilità di movimentazione. In questo modo si cerca di avvicinare la produzione industriale a quella artigianale, come oggi viene richiesto in maniera sempre più pressante dal mercato del settore architettonico. L'esigenza di impiegare un elastomero mira a creare un materiale che, sulla scia delle più recenti ricerche possa sfruttare la propria deformazione elastica per garantire il cinematico al componente.

L'implementazione e le verifiche sul materiale sono state condotte

attraverso sperimentazioni presso i laboratori dell'Istituto Polimeri, Compositi e Biomateriali (IPCB) del CNR di Catania.

### Matrice

L'elastomero termoplastico scelto è il SEBS (Stirene-Etilene-Butilene-Stirene) fornito in pellets. Per ottenere un film sottile da sottoporre poi a termoformatura con il rinforzo, i pellets sono stati estrusi con CollinTeach-line con estrusore a testa piana tipo E16T e rulli di raffreddamento tipo CR72T. Con un primo processo di estrusione il film sottile ottenuto presentava uno spessore di  $500\ \mu\text{m}$ , ma, realizzati i primi provini, per tentare di ottimizzare il composito riducendo la percentuale di matrice, con un ulteriore processo di estrusione, è stato prodotto un film dello spessore di  $170\ \mu\text{m}$ .



Fig. 4.2 | SEBS (Stirene-Etilene-Butilene-Stirene) in pallet



Fig. 4.3 | Il processo per ottenere il film sottile di SEBS

## Rinforzo

Come rinforzo sono stati testati due tipi di tessuto allo scopo di ottenere due compositi per differenti campi di applicazione.

Il primo è il Biotex Flax 400 g/m<sup>2</sup> 2x2 Twill, un tessuto in fibre di canapa con armatura saia (*twill*) e con spessore di 600 μm fornito dalla Composite Evolution, mentre il secondo è il C-200/T fornito dalla Prochima, un tessuto in fibra di carbonio con armatura a tela (*plain-woven*).

Con l'impiego della canapa si ottiene un materiale con un basso impatto ambientale e un costo economico contenuto che possiede, di contro, prestazioni meccaniche e tempo di vita utile che ne limitano il campo di applicazione (Nabi Saheb & Jog, 1999).

Al contrario le fibre di carbonio sono un materiale dalle caratteristiche meccaniche molto performanti per applicazioni in cui le sollecitazioni degli agenti esterni siano maggiori o quando si ritenga necessario un tempo di vita utile prolungato (Chung, 2017).

Per queste sperimentazioni i tessuti non hanno subito trattamenti superficiali per migliorare l'interfaccia tra matrice e rinforzo, anche se, soprattutto nel caso delle fibre naturali, essi sono consigliati (Ku



Fig. 4.4 | Tessuto di fibre di canapa prodotto da Composite Evolution - Biotex Flax 400 g/m<sup>2</sup> 2x2 Twill

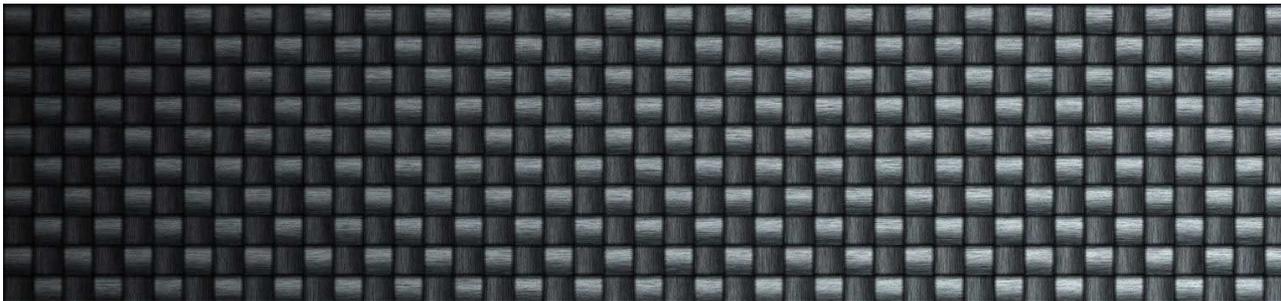


Fig. 4.5 | Tessuto di fibre di carbonio prodotta da Prochima - C-200/T

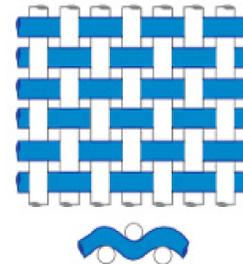
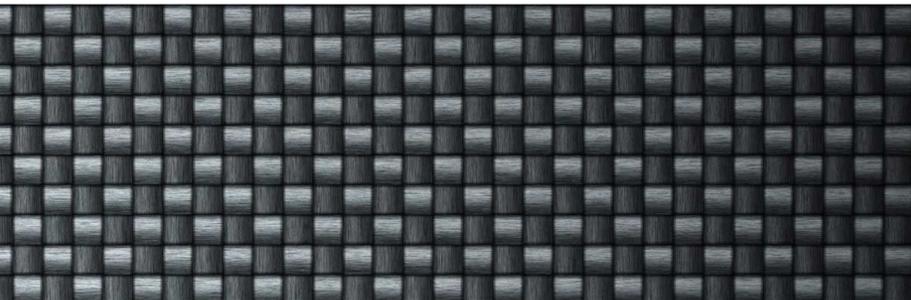
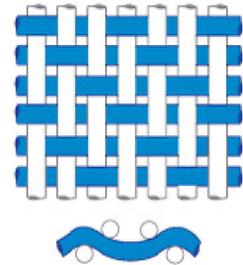
et al., 2011) così da ottenere dei materiali di riferimento per poi, con successive sperimentazioni, essere in grado di confrontare le implementazioni.

Il processo di produzione: realizzazione del composito e individuazione dei parametri di produzione

Per ottenere il materiale composito si è deciso di utilizzare un processo di stampaggio in pressa a caldo di film sottili, alternando il SEBS al tessuto di rinforzo. La pressa utilizzata è prodotta dalla Campana s.r.l. tipo PM20. I parametri variati per ottimizzare la produzione attraverso termoformatura del composito sono:

- rapporto matrice-rinforzo;
- pressione di termoformatura;
- tempi di sottoposizione a termoformatura;
- agenti per il distacco dalla pressa.

Tali parametri non sono stati definiti a priori ma individuati attraverso le prime prove di produzione del materiale. La temperatura di termoformatura è stata fissata in 180°C. Questa è infatti sufficiente affinché



avvenga una buona compenetrazione tra i materiali ma non sufficientemente alta da causare il degrado del SEBS.

Le dimensioni dei campioni realizzati sono strettamente legate alle dimensioni della pressa adottata e non possono pertanto superare le dimensioni di 20x20 cm.

#### Analisi preliminari e ottimizzazione dei parametri di produzione

Per una prima valutazione dei campioni realizzati questi sono stati sottoposti ad analisi visiva, analisi del tatto e i campioni che hanno superato queste valutazioni sono stati sottoposti ad un'ulteriore analisi con il metodo cross section. Infine, i campioni che hanno superato queste analisi sono stati sottoposti ad un processo di caratterizzazione meccanica.

#### Analisi visiva

Tale analisi ha lo scopo di rilevare attraverso l'osservazione eventuali difetti legati al processo di produzione che possono compromettere la funzionalità del materiale base nell'esercizio delle sue funzioni d'uso.

In particolare vanno rilevati:

- la presenza di bolle d'aria;
- la delocalizzazione delle fibre del rinforzo;
- la bruciatura del rinforzo.

#### Analisi al tatto

Con un controllo sensoriale del manufatto, viene sfregata, con il palmo della mano, la superficie del composito per verificarne la presenza di evidenti disomogeneità di spessori e di consistenza che forniscono un chiaro segnale di errata produzione.

#### Analisi dello spessore

I campioni realizzati vengono sottoposti a misurazioni con micrometro e vengono registrate almeno 5 misure per verificare la costanza di spessore come prova di una corretta fusione della matrice e composizione con il rinforzo.

#### Analisi cross section

Il campione viene tagliato e la sua sezione viene osservata al microscopio elettronico. L'analisi visiva della sezione permette di verificare se è avvenuta la completa compenetrazione tra matrice e rinforzo.



Fig. 4.6 | Delocalizzazione delle fibre di rinforzo in campione di prova durante il settaggio dei parametri di produzione



Fig. 4.7 | Opacizzazione della finitura della matrice in SEBS in campione di prova durante il settaggio dei parametri di produzione

## 4.1.2 Caratterizzazione meccanica

La caratterizzazione meccanica dei materiali compositi sperimentati consiste nella determinazione del modulo di Young  $E$  e del modulo di scorrimento a taglio  $G$ , come dati di base per poter intraprendere lo studio del comportamento meccanico di superfici continue realizzate con tali materiali. Per far ciò sono state individuate due prove da effettuare: una prova di trazione monoassiale su provini con rinforzo con ordito disposto parallelamente all'asse di trazione ed una con ordito disposto a  $45^\circ$  rispetto all'asse di trazione.

### Test di trazione monoassiale con ordito disposto parallelamente all'asse di trazione

Questo test è stato effettuato seguendo le direttive delle norme UNI EN ISO 527-4. La norma descrive i tipi di provette e le particolari condizioni di prova per determinare, seguendo i criteri generali dati dalla UNI EN ISO 527-1, le caratteristiche a trazione di materie plastiche composite rinforzate con fibre lunghe disposte in strati non unidirezionali. Seguendo tali normative sono stati realizzati campioni di tipo 2, con dimensione  $200 \times 25$  mm e distanza  $L_0$  pari a 150 mm. Nel caso dei campioni SEBS-Carbonio sono stati utilizzati talloncini in polimetilmetacrilato incollati con colla in etile cianoacrilato bicomponente come previsto dalla normativa in caso di scivolamento del campione dalle morse della macchina. Per i campioni in tessuto di fibre di canapa invece non è stato necessario fare ricorso a talloni per favorire la presa. Entrambi i compositi sono stati testati con fibre di ordito disposte parallelamente all'asse di trazione. I test sono stati eseguiti con una macchina di trazione monoassiale Zwick-Roell modello zO50 con cella di carico da 1 kN per il SEBS-Biotex e da 50 kN per il SEBS-Carbonio mentre la velocità di test è stata impostata a 2 mm/min. Sono state eseguite almeno 5 prove per ogni tipo di campione.

### Test di trazione monoassiale con ordito disposte a $45^\circ$ rispetto all'asse di trazione

L'esigenza di testare i compositi con la matrice con fibre disposte a 45 gradi rispetto all'asse di trazione ha reso necessario discostarsi dalla normativa precedentemente utilizzata e realizzare dei campioni rettangolari di dimensione  $150 \times 50$  mm con distanza  $L_0$  pari a 100 mm. Tali campioni sono stati sottoposti a test con macchina di trazione monoassiale con cella di carico da 2 kN. La velocità di trazione imposta è di 3 mm/min. e la pressione delle ganasce sul provino di 30 N/m.



Fig. 4.8 | Macchina di trazione monoassiale Zwick-Roell modello z050

### 4.1.3 Il processo di post-produzione per la realizzazione del pattern di piegatura

Per il processo di piegatura è necessario realizzare uno stampo da utilizzare in pressa per conferire al composito la geometria desiderata. Gli elevati costi per la realizzazione di uno stampo metallico professionale hanno portato alla scelta di una strada alternativa attraverso la prototipazione rapida con l'uso di stampanti 3D. Quelle disponibili per la sperimentazione lavorano con materiali polimerici che però non si prestano ad essere utilizzati per stampi per presse riscaldate poiché non sono dei buoni conduttori termici. È stato deciso pertanto di operare con un metodo che prevede la prototipazione rapida per creare una sorta di "cassaforma a perdere" in cui realizzare una colatura di resina bicomponente caricata con polvere di rame. L'insieme dei due elementi è stato poi utilizzato come stampo per il materiale.

## 4.1.4 Caratterizzazione della piega

### Prova di piegatura

Per valutare la rigidezza a flessione attorno alle linee di piegatura è stata impostata una prova di trazione ed una di compressione monoassiale su un campione piegato. La macchina di test impiegata è la Zwick Roel zO50 con cella di carico da 1 kN tipo KAP - TC della AST Mess & regeltechnik. Non essendo disponibile una norma specifica le prove sono state condotte seguendo le indicazioni della già citata normativa UNI EN ISO 571-4 impiegando in questo caso provini di larghezza 70mm per poter eseguire più agevolmente la piegatura.

Per realizzare i campioni da sottoporre a test è stato realizzato uno stampo sagomato in alluminio. Questo ha permesso di realizzare il processo di piegatura similmente con quanto fatto con il modello di stampo realizzato attraverso il processo di prototipazione rapida. L'angolo di piegatura prescelto per conferire la geometria è di  $90^\circ$  in mezzeria, mentre in prossimità dei morsetti di vincolo è stata realizzata una piega a  $135^\circ$  come rappresentato in figura.

La prova di trazione è stata condotta portando il campione ad una apertura di  $120^\circ$ , mentre quella di compressione chiudendolo fino ad un angolo di  $30^\circ$ .

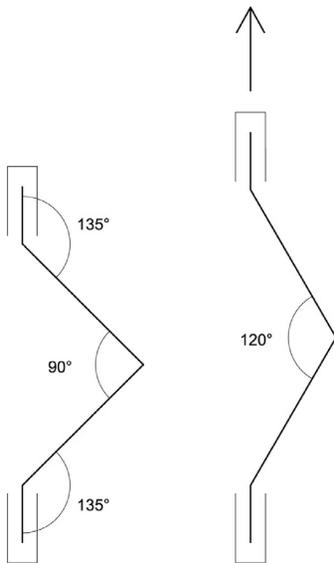


Fig. 4.9 | Schematizzazione test apertura

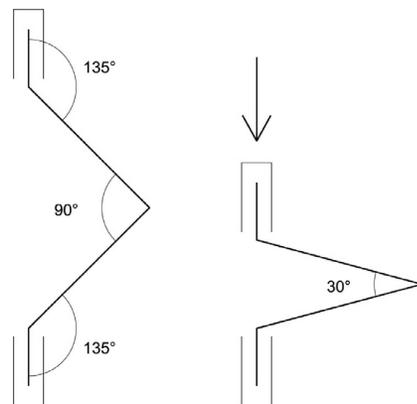


Fig. 4.10 | Schematizzazione test chiusura

#### 4.1.5 La realizzazione dei sistemi di giunzione

Per garantire la possibilità di creare un sistema di collegamento tra il materiale composito realizzato ed altri materiali (cavi in acciaio, profili pultrusi...), al fine di creare rinforzi o sistemi di ancoraggio, è stato ipotizzato un sistema di giunzione attraverso la realizzazione di una tasca, similmente con quanto viene fatto per le tensostrutture. La realizzazione di tale giunzione necessita di una modalità di incollaggio tra due lembi del materiale, incollaggio che peraltro si rende necessario anche quando si debbano realizzare grandi superfici, impossibili da coprire con un unico “foglio” di materiale composito. Studi preliminari sullo stato dell’arte hanno portato ad individuare due sistemi, la saldatura e la cucitura, come i più adatti per gli scopi prefissati.

##### Giunzione saldata

La saldatura è stata realizzata in laboratorio interponendo tra due porzioni di materiale composito un film sottile di SEBS, della dimensione della saldatura necessaria, e riposizionando in pressa gli elementi a 180° per 20 secondi, facendo avvenire il solo contatto con i piatti riscaldati, senza sottoporre gli elementi a pressione.

Per evitare di rifondere il materiale composito oltre la porzione di saldatura esso è stato inserito sotto la pressa solo nella porzione da saldare o eventualmente isolando le porzioni di composito da non fondere.

##### Giunzione cucita

I test iniziali effettuati sulle giunzioni saldate hanno mostrato delle criticità soprattutto da un punto di vista produttivo, che, in caso di realizzazione in opera, sarebbero ulteriormente accentuate. Si è pertanto deciso di proporre un metodo differente di giunzione tramite cucitura, più rapido ed economico di quello saldato. Le saldature ipotizzate sono quelle che vengono tradizionalmente utilizzate per giuntare i tessuti impiegati per realizzare le tende per ombreggiamento di edifici.



Fig. 4.11 | Dettagli di alcuni sistemi di connessione e di giuntura utilizzati per le *textile architecture*.

#### 4.1.6 Caratterizzazione meccanica dei sistemi di giunzione

I tipi di sollecitazione cui sono sottoposte le giunzioni del materiale composito sono varie, così come numerose sono le prove di caratterizzazione che è possibile effettuare per testare l'adesione realizzata. La giunzione tra due lembi di composito per realizzare tasche per interfaccia con altri materiali può essere sollecitata secondo diversi angoli che vanno da una configurazione con  $\delta=90^\circ$  ad una con  $\delta=180^\circ$ .

Sono stati quindi presi in considerazione i due casi estremi valutando quali fossero le prove di caratterizzazione più adatte per conoscere il comportamento del materiale nelle due condizioni limite.

Alla configurazione  $\delta=180^\circ$  corrisponde una sollecitazione riprodotta dal tradizionale test di trazione monoassiale su giunto singolo (*single-lap joint shear test*)

Alla configurazione  $\delta=90^\circ$  corrisponde una sollecitazione riprodotta dal test di pelatura (*T-peel test*).

##### Single-lap joint shear test

I test sono stati eseguiti con una macchina di trazione monoassiale Zwick-Roell modello z050 con cella di carico da 1kN e con le stesse dimensioni e le stesse condizioni seguite per la prova effettuata sul campione singolo (norma UNI EN ISO 527-4).

##### T-peel test

I test preliminari sono stati condotti impiegando la stessa dimensione dei campioni semplici sottoposti a prova di trazione monoassiale per confrontare i risultati con quelli del *Single-lap joint shear test*.

Ulteriori *T-peel test* sono stati condotti seguendo la normativa UNI EN 12814-4 del 2003: "Prove di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico: Prova di pelatura". Questa specifica la dimensione, il campionamento, la preparazione dei provini, le condizioni per la prova di pelatura sulla saldatura di giunti di prodotti semifiniti di materiale termoplastico per determinare la resistenza alla pelatura ed il comportamento alla rottura.

Da normativa, i campioni essendo realizzati in materiale rinforzato devono avere dimensione b pari a 50 mm

La velocità cui realizzare la prova non è tabellata per il SEBS. Si è comunque deciso di condurre la prova a velocità di 10 mm/min.

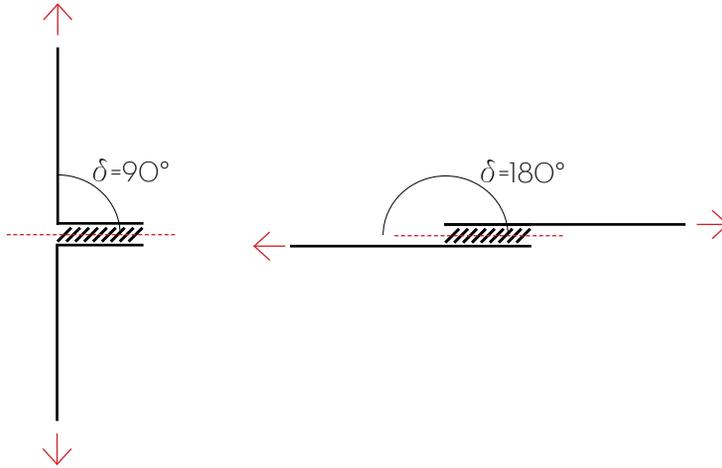
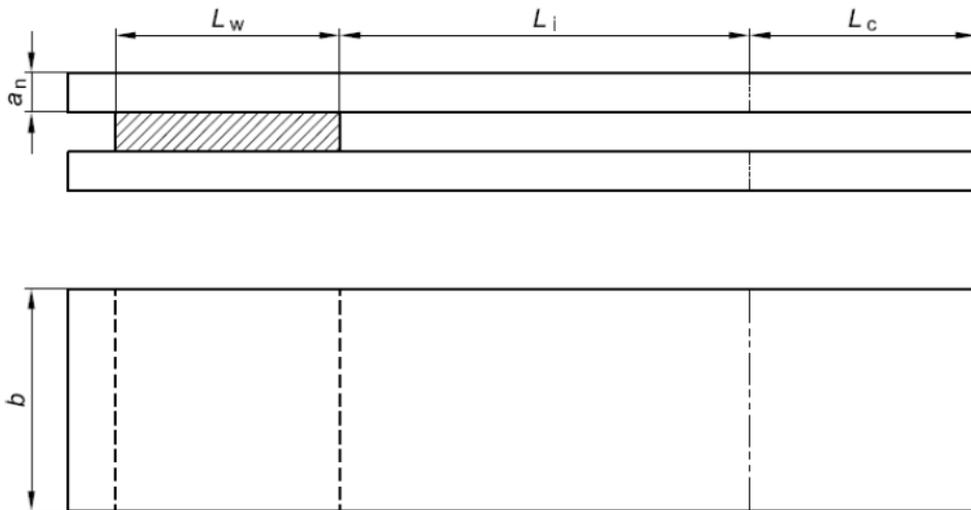
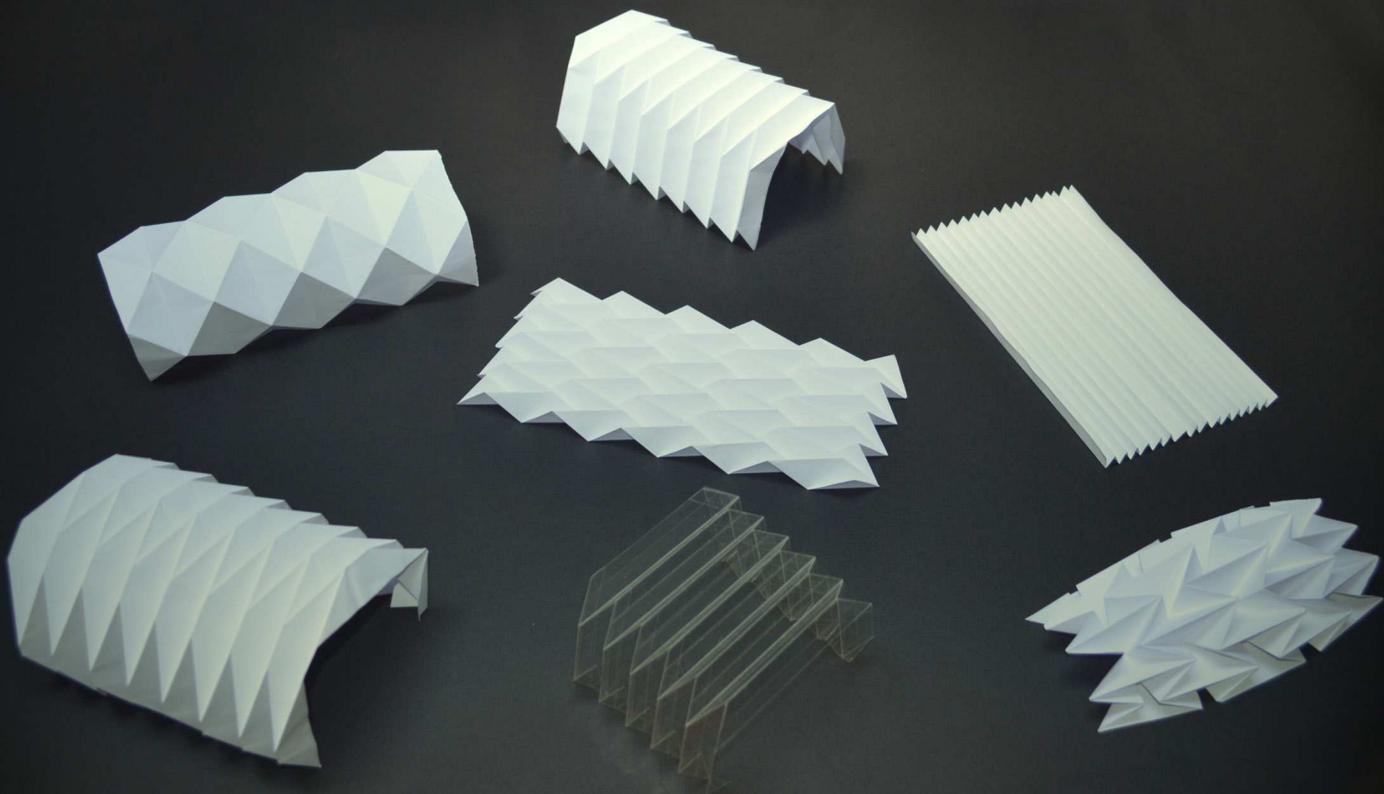


Fig. 4.12 | Le due sollecitazioni analizzate, con  $\delta$ = angolo fra la sollecitazione e l'asse della saldatura



$a_n$	$\beta^1)$	$L_i$
$a_n \leq 1,5$	15	$\geq 15$
$1,5 < a_n \leq 3$	15	$\geq 10 \times a_n$
$3 < a_n \leq 5$	25	$\geq 10 \times a_n$
$a_n > 5$	$5 \times a_n$	$\geq 10 \times a_n$
a) Per materiali rinforzati, $b$ deve essere 50 mm.		

Tabella 4.1 | Dimensione dei provini secondo la norma UNI EN 12814-4 del 2003



## 4.2 Configurazione geometrica del componente KREO

### 4.2.1 Metodologia per il progetto architettonico

#### Modelli di carta

La realizzazione di una serie di modelli in carta in scala rappresenta un primo imprescindibile approccio per la scelta della configurazione che la superficie cinetica del componente può avere e per un primo controllo del cinematismo che è capace di subire.

Come suggerito da Paul Jackson sono stati adottati tre metodi differenti per eseguire i modelli in base al grado di complessità (Jackson, 2011).

Il primo prevede la realizzazione manuale delle pieghe anche con soluzioni veloci e approssimate, come primitivo approccio al tema e per il controllo dei pattern di piega e delle geometrie connesse.

Un secondo metodo consiste nell'impiego di strumenti di disegno analogico per realizzare sul foglio i pattern di piegatura, eseguendo successivamente le pieghe stesse. Essendo uno strumento più raffinato è spesso accompagnato dall'impiego di materiali come cartoncino, cartone o fogli di materiale plastico che presuppongono la parziale incisione della linee di piega sul lato su cui avviene la chiusura.

Un terzo metodo prevede il disegno digitale del pattern di piega. Tale metodo è impiegato per i pattern più complessi, in cui l'estrema precisione del disegno è essenziale. Un disegno informatizzato ha l'indubbio vantaggio di consentire di modificare facilmente le geometrie, scalare il modello e ripetere iterativamente i moduli base. Realizzare un modello digitale del pattern di piega permette inoltre di operare con macchine a controllo numerico, come un cutter CMC, sui materiali dotati di un certo spessore, come ad esempio il cartone, realizzando la parziale incisione delle pieghe per facilitare la realizzazione del modello.

## Modelli virtuali: il progetto parametrico attraverso la modellazione algoritmica

Passaggio successivo all'individuazione del pattern più adeguato al caso è la realizzazione di un modello 3D virtuale. Questo consente la realizzazione di simulazioni sul movimento del componente inserito nel suo contesto (prospetto di un edificio, copertura di spazio aperto, ...) verificandone gli ingombri nelle varie configurazioni e l'eventuale interazione con sottostrutture.

Dai ricercatori del settore sono stati sviluppati una serie di software che permettono la simulazione 3D di origami e del loro movimento (Freeform Origami di Tomohiro Tachi, TreeMaker di Robert J. Lang, Origami Folder di Zhonghua Xi e Jyh-Ming Lien, ...). Di contro, si è manifestata l'esigenza di produrre un modello virtuale gestibile con diversi approcci (compositivo, meccanico, energetico, ...), capace cioè di garantire l'interoperabilità all'interno del processo progettuale.

È stato pertanto scelto il software Rhinoceros, uno dei più utilizzati nel settore architettonico, facendo ricorso al plug-in Grasshopper che consente un approccio al progetto di tipo parametrico. La già citata complessità geometrica e cinetica, seppur controllabile da un punto di vista matematico, rende infatti necessario un approccio attraverso metodi semplici e iterativi che è possibile implementare attraverso il progetto parametrico (*parametric design*).

Il termine parametrico ha origine nel mondo delle scienze matematiche e si riferisce all'utilizzo di parametri o variabili, che possono essere modificati per manipolare i risultati di una equazione.

Lo stesso principio può essere applicato alla progettazione con la così detta progettazione parametrica nella quale, come nelle scienze matematiche, la definizione degli elementi e le loro relazioni sono modellate come parametri e, grazie ad essi, è possibile generare complesse geometrie. Tali parametri possono poi essere facilmente alterati, dando origine in maniera interattiva a nuove forme. Le potenzialità di un approccio metodologico di tipo parametrico consentono di staccarsi da quello tradizionale di tipo additivo.

La progettazione di tipo tradizionale, infatti, fa sì che il momento ideativo e quello della modellazione siano l'uno sottoposto all'altro, con il primo caratterizzato da una logica di tipo associativo, che stabilisce relazioni, mentre il secondo da una logica di tipo additivo, che non fa altro che sommare i risultati della prima. Inoltre una volta messa in atto la modellazione, del processo ideativo non rimane traccia. La progettazione parametrica, invece, pone ideazione e modellazione sullo stesso piano facendo prevalere la logica associativa grazie all'utilizzo di strumenti informatici ed in particolare con l'uso degli algoritmi.

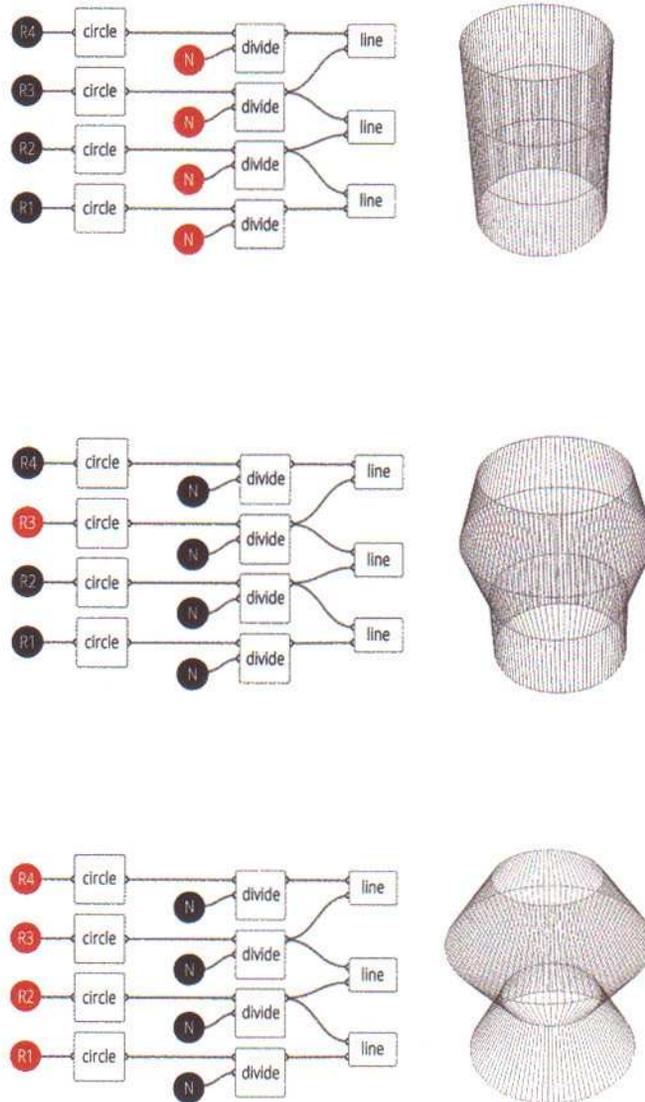


Fig. 4.14 | Modellazione algoritmica di una geometria. Il momento ideativo e quello della modellazione sono contemporanei

mi. Grazie a questi una serie di input, in qualsiasi momento editabili o trasformabili, vengono elaborati in output, nella geometria: questa risulta quindi editabile in maniera interattiva agendo sui parametri definitori. “L’output finale non è semplicemente un segno digitale ma può essere considerato come un modello digitale interattivo capace di rispondere alle variazioni degli input manipolando l’intero sistema. [...] La progettazione attraverso algoritmi permette a chi ne fa uso di progettare processi piuttosto che singoli oggetti” (Tedeschi, 2014). I parametri definitori possono essere legati alla definizione morfologica, alle caratteristiche del materiale usato e ai dati ambientali di contesto. Il risultato è un sistema complesso dove il particolare ed il generale sono in continua relazione: in ogni momento è possibile ottenere veloci riconfigurazioni dei modelli agendo sui parametri esplicitati nelle sequenze algoritmiche.

Proprio per queste proprietà la progettazione parametrica è imprescindibile nella progettazione di elementi adattivi. La loro modellazione deve partire con una esatta definizione dei gradi di libertà e dei movimenti ad essi connessi, in relazione alle geometrie ed alle soluzioni tecnologiche scelte, come base per la fase successiva, che è proprio la modellazione parametrica. Durante tale fase i parametri che governano il movimento (rotazioni, estensioni, ...) vengono simulati attraverso dei componenti con cursore (*slider*) che permettono di far variare in maniera continua il valore dei parametri e di conseguenza la geometria complessiva. Ciò consente di visualizzare e gestire in maniera estemporanea il cinematismo del componente. Per questo è importante individuare in maniera esatta quali sono i parametri che governano il movimento, specialmente in funzione di una eventuale fase di ottimizzazione, per la quale i parametri definiti attraverso un cursore (*slider*) rappresenteranno i Genomi (*Genomes*). Nel caso specifico della ricerca una maggiore difficoltà nella definizione degli input sarà ripagata da una notevole facilità di gestione della morfologia e del controllo del cinematismo.

Il ricorso alla progettazione parametrica, tramite questi software, ha permesso di controllare più agevolmente la complessità geometrica dei manufatti ideati. Una volta definito il pattern con il modello in carta, sono stati stabiliti i parametri definitori (input dell’algoritmo), individuando le configurazioni più adatte agli specifici casi.

In alcuni casi studio la sperimentazione virtuale è stata implementata anche con il motore fisico Kangaroo, un plug-in che consente di simulare la presenza di cerniere su una superficie e, imponendo punti fissi e forze agenti, simulare il movimento della superficie stessa.

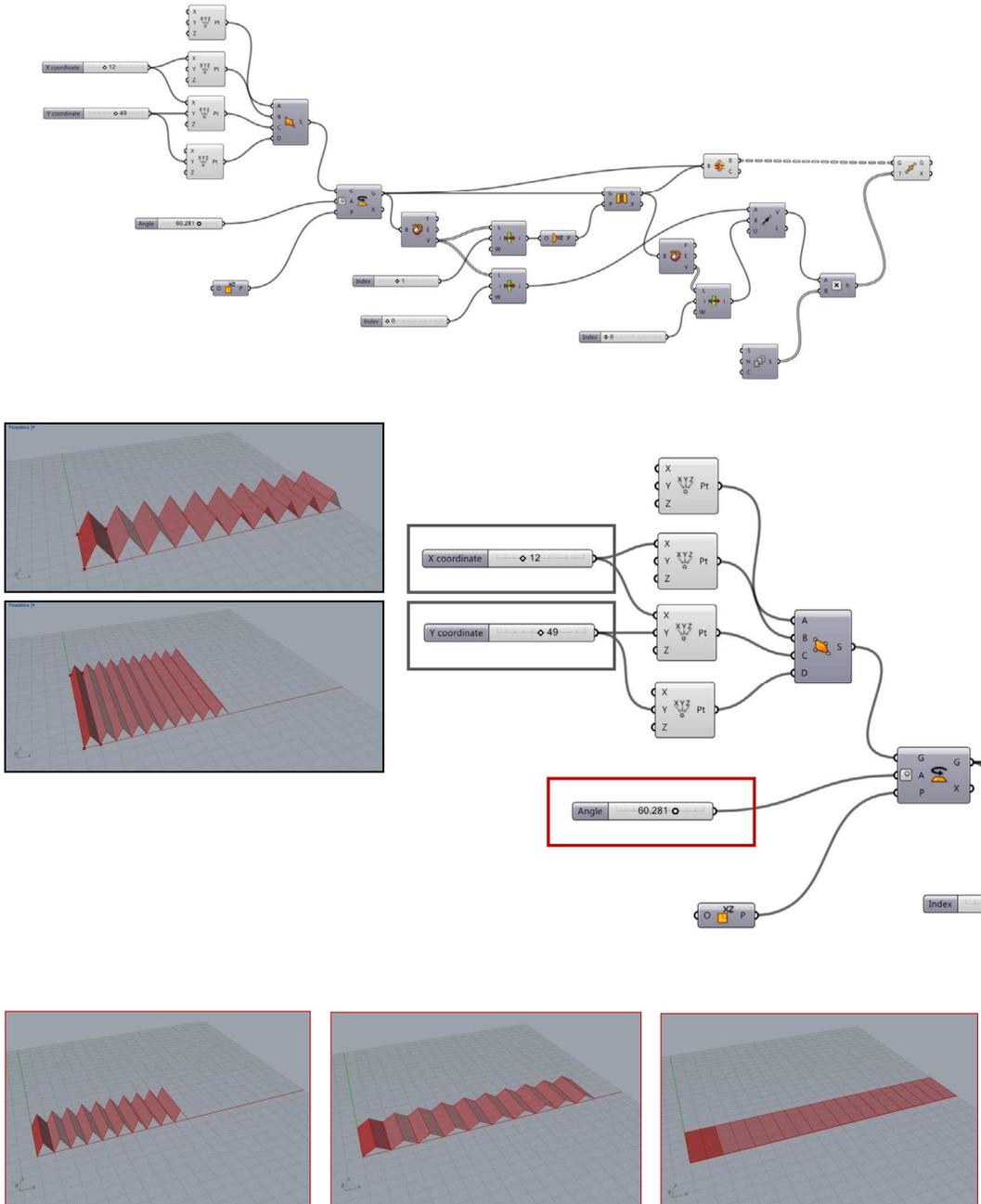


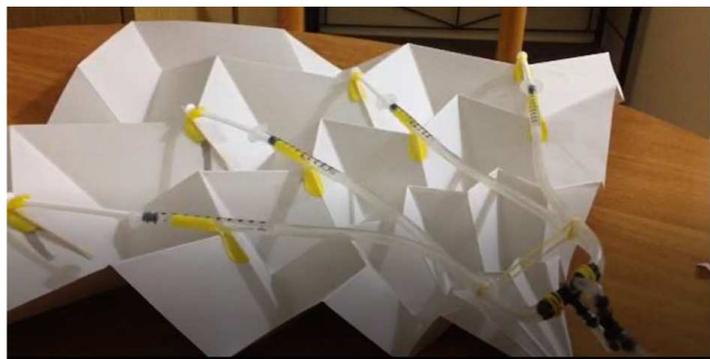
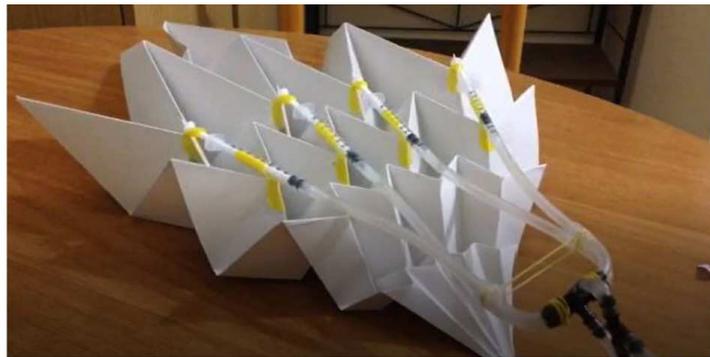
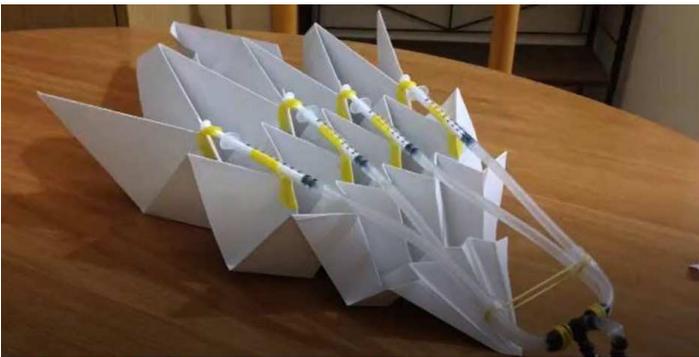
Fig. 4.15 | Progetto parametrico di una superficie piegata. La definizione di alcuni parametri attraverso slider permette di alterare agevolmente la geometria

### Modelli fisici in scala

Nei casi in cui è prevista una movimentazione automatizzata della superficie pieghevole di copertura, la realizzazione di un modello fisico in scala consente di individuare correttamente la posizione degli attuatori meccanici e la loro relazione con la superficie da movimentare, che peraltro è spesso impostata su un pattern tridimensionale. Il passaggio dal un modello virtuale a quello fisico consente inoltre una più agevole verificare delle ipotesi progettuali e della scelta dei parametri definitivi.

Fig. 4.17 | Modello fisico in scala con sistema di attuazione automatizzato

Fig. 4.16 | Modello fisico di studio per l'analisi dei punti di controllo



#### 4.2.2 I casi studio

L'individuazione di casi studio ha permesso di definire un quadro esigenziale concreto e quindi di calibrare le prestazioni del componente e verificare le caratteristiche dei materiali da impiegare.

Ne vengono presentati due. Il primo si focalizza su un sistema per la protezione, da utilizzare durante le fasi di scavo, per reperti, operatori ed eventuali visitatori, mentre il secondo sullo studio di una copertura per un sito archeologico già aperto alla fruizione turistica.



## Copertura degli scavi archeologici dell'Insula di Akrai a Palazzolo Acreide

Il primo caso studio è la copertura degli scavi archeologici di Akrai, una colonia greca fondata nella seconda metà del VII secolo A.C. L'antico abitato consiste nel sito originale dell'odierno paese di Palazzolo che, per questa ragione, conserva ancor oggi l'appellativo di Acreide. Gli scavi archeologici sono iniziati alla fine dell'ottocento, ma sono ancora in corso, soprattutto relativamente agli ampliamenti dell'abitato di epoca romana.

Per la protezione di queste attività è stata ideata una copertura temporanea che ha prestazioni adeguate alla protezione dei reperti, degli operatori ed alla fruizione contemporanea del sito, in accordo con i principi fissati in KREO. È stato progettato un modulo con pianta quadrata 5x5 m, la cui ripetizione nelle due dimensioni consente un buon livello di flessibilità, richiesta dal cantiere di scavo; infatti la progressione planimetrica non risulta definibile a priori, ma è determinata dai ritrovamenti stessi.

I requisiti richiesti alla struttura sono i seguenti: leggerezza, in modo da minimizzare le opere di fondazione; facilità di montaggio, in modo che questo possa essere realizzato dagli stessi archeologi; spostabilità dei punti di appoggio, per assecondare eventuali esigenze di scavo; rimovibilità della superficie di copertura, per minimizzare il disturbo visivo e consentire la ripresa dall'alto, per documentare gli scavi.

La rapidità e facilità di messa in opera sono assicurate dall'impiego di elementi leggeri in scatolari in alluminio e dall'impiego di connessioni a scatto. I piedi di appoggio sono regolabili in altezza e nella posizione in pianta. I montanti verticali sono zavorrati a terra con volumi cilindrici riempibili con acqua o sabbia.

Una particolare attenzione è stata riposta nel progetto della superficie di copertura. Questa è realizzata in materiale composito, definito nell'ambito di KREO, preformato secondo il pattern Yoshimura (Yoshimura, 1955), che garantisce la possibilità di movimentarla, da una configurazione completamente ripiegata ad una distesa. Anche in quest'ultima posizione essa mantiene una corrugazione che le conferisce un certo grado di resistenza per forma, in modo da ridurre la necessità di elementi di sostegno. Tale superficie ha sviluppo prevalentemente piano e risulta compresa tra due profili a C, uno fissato al corrente di monte, l'altro scorrevole sui traversi laterali. Per semplificarne il funzionamento si è scelto di affidare il controllo di tale copertura adattiva ad una azione manuale da parte degli operatori che intervengono nel sito. L'inclinazione della copertura è anche funzionale a creare un franco tra i vari moduli che incrementa la ventilazione



Fig. 4.18 | Localizzazione dell'intervento



Fig. 4.19 | Modulo di copertura per la protezione durante la fase di scavo



Fig. 4.20 | Fotoinserimento del sistema modulare di copertura sugli scavi archeologici dell'Insula di Akrai

naturale del volume sotteso. Le acque piovane vengono convogliate da una canaletta posta lungo la linea di gronda delle singole falde e raccolte in un contenitore posto a terra, in modo che possano essere riutilizzate per il lavaggio dei reperti.

### Copertura delle “terme sud” presso la Villa del Casale di Piazza Armerina

Il secondo caso studio è la copertura di nuovi ritrovamenti a sud della Villa del Casale di Piazza Armerina, una costruzione di età imperiale celebre per le decorazioni musive. L'area in studio è un complesso termale danneggiato da un'alluvione nel VI secolo ed in parte inglobato nella villa. È stata aperta al pubblico nel 2013, ma è ancora priva di un adeguato sistema di copertura.

Scopo del progetto è la protezione dei beni e l'ottimizzazione del comfort dei visitatori. Anche in questo caso è stato deciso l'impiego un modulo ripetibile piuttosto che una struttura unitaria, anche in funzione di un possibile ampliamento futuro, vista l'elevata presenza di resti nell'area. Il singolo modulo è basato sul principio geometrico-costruttivo del fungo, che consente di ridurre il numero degli elementi strutturali e di punti di appoggio. Il modulo, di tipo KREO, ha dimensioni 5x5m ed è piegato 11 volte per ricoprire l'intera area.

Il pilastro centrale è un tubolare circolare in alluminio ed è zavorrato al suolo con un gabbione metallico, interrato e riempito in pietrame, al fine di garantire la completa reversibilità dell'intervento. Alla testa del pilastro sono incernierate dodici aste telescopiche pneumatiche, utilizzate come attuatori lineari del movimento. Queste sono incernierate ad altre quattro ulteriori aste-attuatore, che contrastano con il pilastro centrale, per l'apertura ad ombrello. La superficie di copertura è realizzata con il materiale composito studiato in KREO ed è vincolata alle aste principali, che la dispiegano. Un sistema di sensori cattura i dati ambientali che vengono trasmessi all'unità di elaborazione che li traduce in input per gli attuatori, rendendo la copertura adattiva. Infatti essa viene attivata in presenza di eccessiva radiazione solare o precipitazioni, mentre viene ripiegata quando le condizioni ambientali lo consentono. Il deflusso delle acque meteoriche avviene attraverso le aste stesse, conformate con sezione ad U, che convogliano l'acqua in un pluviale interno al pilastro, fino alla base dove si trova un canale di raccolta, connesso a tutti i pilastri. Per questo caso studio il pattern adottato è il Miura Ori (Miura, 1989), con tasselli non costanti. Generalmente nelle applicazioni ingegneristiche la tassellazione del pattern è costante; l'adozione di maglie con dimensione crescente verso l'esterno si interfaccia meglio con il sistema di apertura ad ombrello.



Fig. 4.21 | Localizzazione dell'intervento

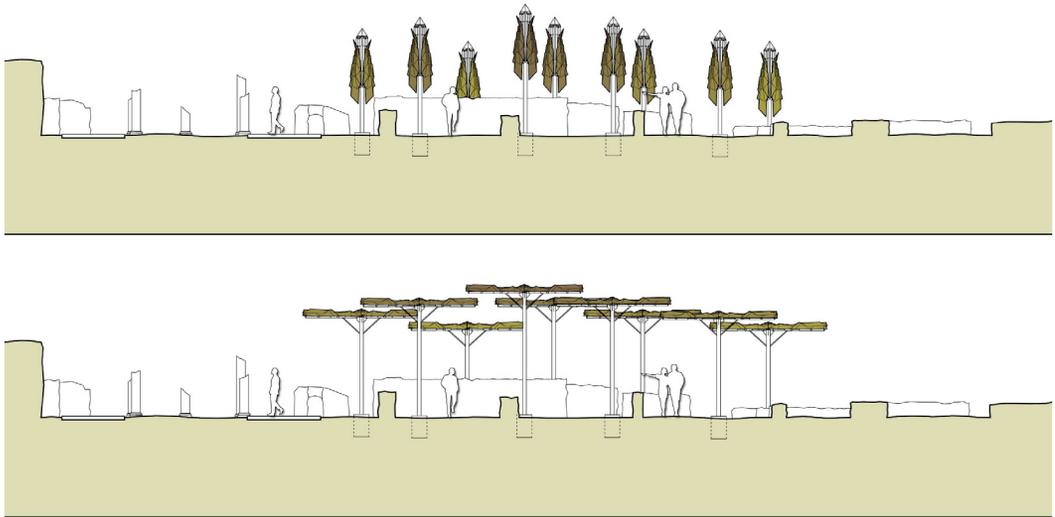


Fig. 4.22 | Moduli di copertura per la protezione del sito archeologico della Villa del Casale



Fig. 4.23 | Render del sistema modulare di copertura



### 4.2.3 Metodologia per il progetto del componente sul comfort termico

Il progetto di oggetti architettonici che ottimizzano il comfort termico degli ambienti, con particolare attenzione all'impatto energetico, viene declinato principalmente con due categorie di soluzioni. Da un lato vi è un approccio che sfrutta **tecnologie attive** per migliorare il livello di sostenibilità energetica del costruito, ad esempio attraverso il ricorso a fonti di energia rinnovabili per il condizionamento del comfort degli ambienti. Dall'altro vi sono le **strategie di progetto passive** che coinvolgono il progetto della forma dell'edificio e dei suoi componenti per sfruttare la radiazione solare, il vento, la temperatura del suolo ed altri aspetti legati a fenomeni naturali per raggiungere le condizioni di comfort termico senza impiego di fonti fossili.

Al contempo il tema energetico non può e non deve essere l'unico con cui la progettazione deve confrontarsi. Rimane centrale l'esigenza del progetto di sviluppare spazi salubri, produttivi e piacevoli con l'ottimizzazione dell'investimento economico. Va verificato quindi in ogni singolo progetto quale delle due strategie energetiche sia quella che integra i due obiettivi.

In tale azione di bilanciamento un ruolo centrale è svolto dall'involucro che, posto a filtro tra interno ed esterno, segna il limite tra lo spazio incontrollato e quello controllato, sia dal punto di vista morfologico che termico.

La scelta di progettare un involucro adattivo nasce dall'esigenza di rendere mutevole lo spazio-limite dell'involucro, di farlo diventare un vero e proprio filtro capace di reagire al cambiamento delle condizioni interne o del contesto.

Le applicazioni sugli involucri adattivi per il controllo energetico degli edifici rimangono ad oggi limitate prevalentemente a progetti sperimentali di piccola scala, come padiglioni temporanei o test-box, o a progetti di notevole importanza con un ampio budget di investimento (Loonen et al., 2013). Nonostante ciò i vantaggi energetici di soluzioni dotate di cinematiso sono stati verificati (Baldinelli, 2008) e la ricerca pertanto si spinge a cercare soluzioni che possano semplificare i movimenti e renderli sostenibili da un punto di vista energetico e manutentivo pensando nuovi sistemi di facciate (Hasselaar, 2006; Baldinelli, 2008) o l'impiego di materiali e componenti Smart per le schermature solari (Cimmino, 2017; Pesenti, 2015).

### Il comfort degli spazi aperti

Restringendo il campo di indagine al comfort termico degli spazi esterni, si è utilizzato come parametro di riferimento lo *Human Thermal Comfort* (HTC). Esso è un indice essenziale per quantificare la qualità della vivibilità degli spazi esterni. La percezione degli individui del comfort termico è influenzata in maniera determinante dal microclima locale e tale percezione a sua volta influenza drasticamente le decisioni sull'uso degli spazi aperti e la loro frequenza di utilizzo. Per queste ragioni il comfort termico degli spazi aperti ha recentemente acquisito notevole attenzione da parte della ricerca.

A causa della dinamicità delle condizioni a contorno, è ad oggi complesso quantificare e controllare le variabili fisiche che giocano un ruolo chiave nel microclima di questi spazi (Robinson, 2011). Le variabili fisiche sono relazionate a fattori come la temperatura dell'aria, la velocità del vento, l'umidità relativa, radiazione a onde lunghe e corte. Per tali ragioni il progetto di un dispositivo schermante per la copertura degli spazi aperti deve avere come fine l'ottimizzazione dell'HTC, indirizzando le scelte geometriche e di materiali sulle soluzioni più performanti per tale scopo.

### Le soluzioni statiche tradizionali

Tra le tante soluzioni che possono essere adottate, la più utilizzata al giorno d'oggi è la tradizionale pergola. È una soluzione che prevede generalmente una superficie piana realizzata in materiale tessile, supportato da una struttura sorretta da quattro pilastri, che scherma il terreno e le persone sottostanti dalla radiazione solare diretta. È una soluzione semplice dal punto di vista costruttivo ma non ottimizza il comfort termico dello spazio sottostante perché la sua conformazione non protegge ad esempio dalla radiazione solare radente le esposizioni est ed ovest, rispettivamente nelle prime e nelle ultime ore della giornata. Quella ovest è in particolar modo un'esposizione particolarmente sfavorevole per il comfort outdoor nel clima Mediterraneo con estati calde. Una soluzione statica non offre la possibilità di adattare il progetto alle condizioni meteorologiche in continuo mutamento.

### L'esigenza di una risposta dinamica

Una soluzione a tali esigenze è offerta dal progetto di componenti adattivi, che possono essere aperti quando necessario e chiusi quando non necessari e possono, meglio delle soluzioni statiche, ottimizzare il comfort grazie alla loro mutevolezza di configurazione in risposta al cambiamento delle condizioni a contorno. I componenti adattivi, come già visto, sono ampiamente impiegati per realizzare

parte dell'involucro edilizio al fine di migliorare il comfort degli ambienti interni come abitazioni ed uffici e, anche se ancora non è possibile considerarli pienamente maturi, essi hanno grandi e positive possibilità (Loonen, 2013). Il loro utilizzo per spazi aperti è diffuso da tempi antichi ed è stato principalmente indirizzato alle attrezzature sportive ma negli ultimi decenni il loro impiego per strutture schermanti sta conoscendo un nuovo fervore grazie soprattutto allo sviluppo ed all'impiego dei così detti *smart material* (Doris Sung, 2008; Reichert, Menges & Correa, 2015).

Concentrando l'attenzione sui componenti pieghevoli, non mancano le applicazioni di tali componenti adattivi per il controllo dell'indoor comfort (Al Bahr Towers, Kiefer Technic Showroom,...) mentre per il controllo dell' outdoor comfort vengono impiegate principalmente strutture ad ombrello (Al-Masjid al-Nabawi Mosque) per la mitigazione del microclima in zone climatiche calde. L'applicazione di strutture ad origami invece sta assumendo sempre più rilevanza per la realizzazione di padiglioni sperimentali e di ricerca e ciò suggerisce un prossimo sviluppo nella pratica realizzativa.

#### Mancanza di strumenti

Il progetto di un componente adattivo deve tener conto fin dalle prime fasi delle implicazioni che ha sul comfort termico ogni scelta geometrica e cinetica. Alcuni strumenti, come il plug-in Ladybug per Grasshopper, permettono di effettuare simulazioni termiche sui componenti cinetici, preservandone la parametrizzazione della geometria per consentire così di variare facilmente i parametri di input con un controllo interattivo del comportamento termico. Nonostante ciò non risulta chiaro quale sia il miglior *workflow* da seguire nel processo di progettazione di questi componenti.

#### Workflow per comfort esterno

Risulta quindi determinante individuare un *workflow* per ottimizzare i movimenti di un componente adattivo in un contesto termodinamico complesso come quello degli spazi aperti. Questo costituirà uno strumento adeguato per i progettisti, facile da utilizzare e che consente di evitare che le simulazioni energetiche vengano fatte a valle delle scelte geometriche, come spesso avviene oggi.

In particolare il parametro su cui avverrà l'ottimizzazione è l'Universal Thermal Comfort Index (UTCI)

L'intero *workflow* è pensato in ambiente parametrico per facilitare il controllo ed il progetto dei cinematismi. Il confronto con un progetto di riferimento secondo soluzioni tradizionali offre i benefici di tale tipo di applicazione.

La metodologia proposta lega la definizione geometrica di un componente adattivo allo studio del comfort termico dello spazio esterno protetto fin dalle prime fasi del processo di progettazione grazie ad una strategia di ottimizzazione del cinematismo.

Si tenta di risolvere il problema in ambiente parametrico proprio perché la modellazione parametrica offre la possibilità di un controllo interattivo della forma attraverso input, che non sono altro che le variabili processate attraverso un Algoritmo Genetico. L'obiettivo è minimizzare la somma del valore dell'indice UTCI su una mappa microclimatica, che diventa quindi la *Fitness function* (funzione obiettivo), variando alcuni parametri geometrici, variabili dell'algoritmo di definizione della forma, detti *Genome* (genoma).

La metodologia è stata sviluppata con plug-in gratuiti (Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Butterfly e Galapagos) del software Rhinoceros al fine di ottenere un processo di ottimizzazione circolare.

Il processo di ottimizzazione viene realizzato per alcune ore della giornata per le quali la geometria viene calibrata. Le geometrie così ottenute sono quelle tra le quali fare variare i movimenti della superficie adattiva.

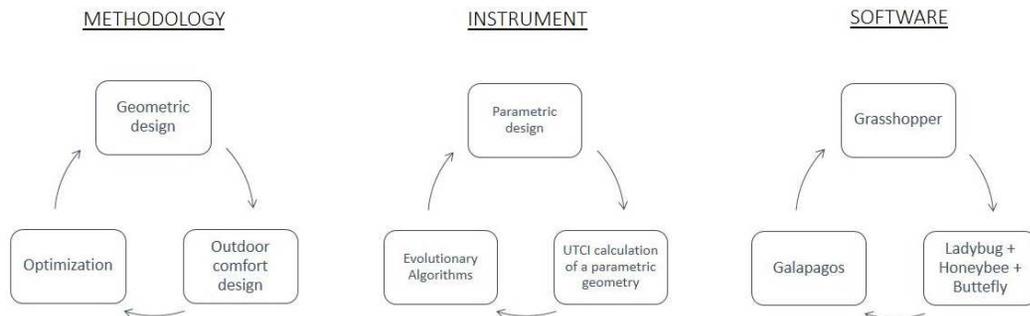


Fig. 4.25 | Metodologia, strumenti e software utilizzati per il workflow circolare.

#### 4.2.4 Metodologia per il calcolo dell'UTCI

L' *Universal Thermal Climate Index* UTCI fornisce una valutazione dell'ambiente termico esterno nelle applicazioni bio-meteorologiche basate sull'equivalenza della risposta fisiologica dinamica prevista da un modello di temoregolamentazione che è stato accoppiato con un modello di abbigliamento attuale (Bröde et al., 2010). Esso è stato progettato seguendo il concetto di una temperatura equivalente che ha implicato la definizione di un ambiente di riferimento con umidità relativa del 50% (ma pressione del vapore non supera a 2 kPa), con aria continua e temperatura radiante pari alla temperatura dell'aria. Con esso sono state comparate tutte le altre condizioni climatiche. Le stesse condizioni fisiologiche si basano sull'equivalenza della risposta fisiologica dinamica prevista dal modello per l'ambiente effettivo e di riferimento. Poiché questa risposta dinamica è multidimensionale (temperatura corporea, tasso di sudore, umidità della pelle ecc. a diversi tempi di esposizione), un indice di stress è stato calcolato mediante analisi dei componenti principali come rappresentazione monodimensionale della risposta del modello (Bröde et al., 2009). La temperatura equivalente UTCI per una data combinazione di vento, radiazione, umidità e temperatura dell'aria viene quindi definita come la temperatura dell'aria dell'ambiente di riferimento, che produce lo stesso valore di indice di stress.

Una scala di valutazione lega i range UTCI a diverse categorie di stress.

UTCI [°C] range	Stress category
Above 46°C	Extreme heat stress
38°C to 46°C	Very strong heat stress
32°C to 38°C	Strong heat stress
26°C to 32°C	Moderate heat stress
9°C to 26°C	No thermal stress
9°C to 0°C	Slight cold stress
0°C to -13°C	Moderate cold stress
-13°C to -27°C	Strong cold stress
-27°C to -40°C	Very strong cold stress
Below -40°C	Extreme cold stress

Tab. 4.2 | Scala di valutazione UTCI (IUPS 2003)

Per la ricerca è stato adottato questo indice poiché esso è appositamente sviluppato per l'analisi termica degli spazi urbani aperti in clima europeo e mostra limitazioni, se paragonato ad altri indici, come il Physiologically Equivalent Temperature (PET), solo nelle applicazioni in climi caldi (Frohlich & Matzarakis, 2015). La metodologia proposta prevede l'uso dei *tools* citati per il calcolo del valore di UTCI in una mappa microclimatica al di sotto della schermatura con il componente adattivo. Nello specifico la mappa microclimatica è individuata su un piano posto ad un'altezza di 1,10 m dal terreno, poiché questa è l'altezza media del centro di gravità del corpo umano.

Ladybug è un plug-in per analisi ambientali di Grasshopper/Rhinoceros e consente all'utilizzatore di lavorare con motori di calcolo energetico ed illuminotecnico validati come ad esempio EnergyPlus, che è quello selezionato per questa ricerca. Paragonato con altri software, il principale vantaggio che esso offre è la perfetta integrazione con l'ambiente parametrico di Grasshopper e quindi la possibilità di avere estemporanei feedback sulle modifiche geometriche, poiché il legame tra la definizione geometrica e l'analisi energetica è interattivo. Una modifica della geometria genera immediatamente una modifica nella valutazione energetica, visualizzata in maniera estemporanea (Roudsari, 2013). Inoltre l'utente può personalizzare il software in base alle proprie esigenze contribuendo al codice sorgente.

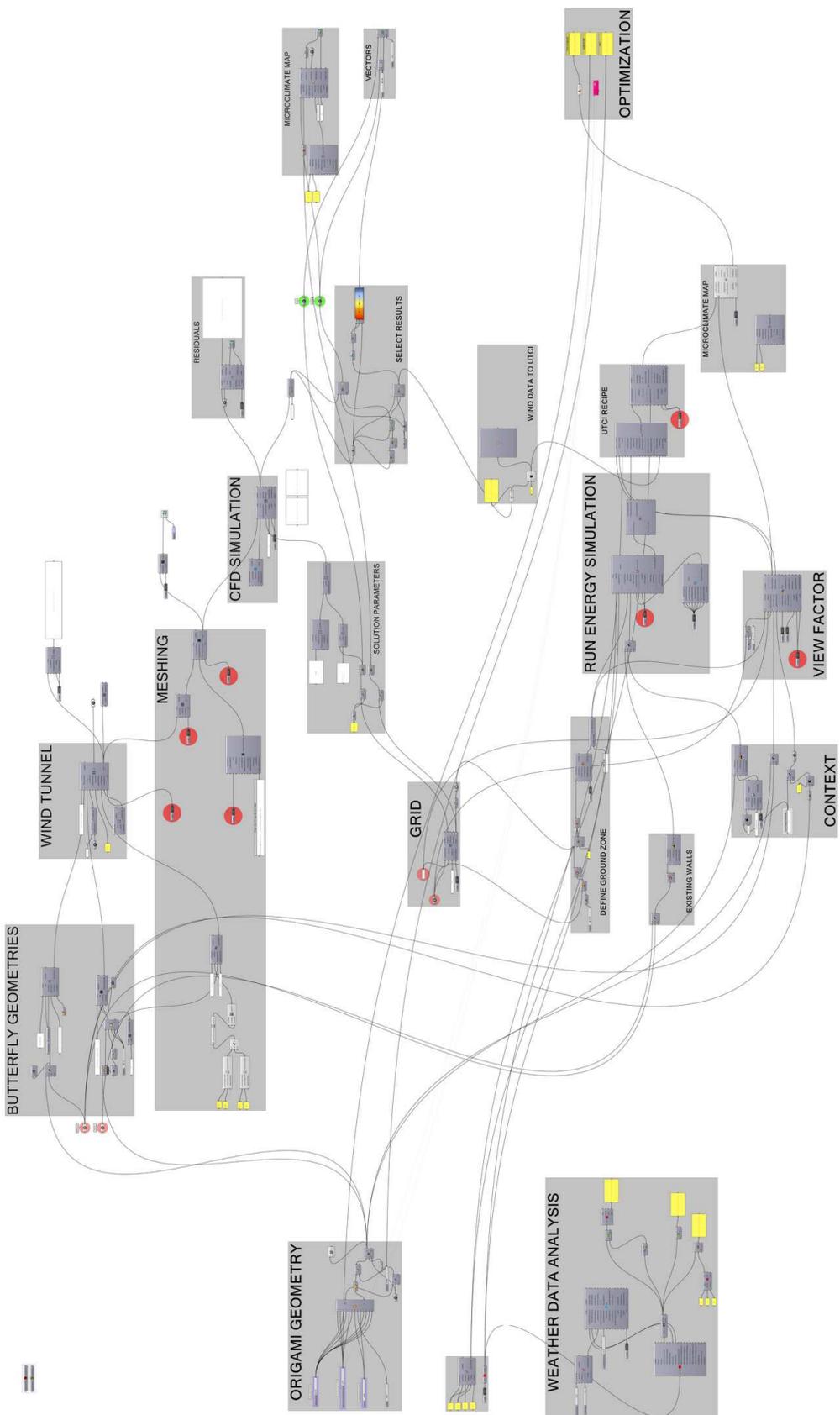
La metodologia adottata in questo studio è la stessa che viene in genere adottata per modellare il microclima attorno ad un albero e produrre una mappa del confort termico in spazi aperti da questi risultati (Mackey, 2015). In questa valutazione il componente adattivo viene simulato come un dispositivo schermante alla radiazione solare e la sua temperatura non viene calcolata, ma supposta uguale a quella dell'aria, trascurando gli effetti sulla mappa microclimatica degli scambi di calore legati alle onde lunghe.

Il terreno è simulato come una zona climatica (componente HBZones) e la sua temperatura è valutata utilizzando Energy Plus. Il componente adattivo schermante è modellato come un elemento di contesto (componente HBContext) con un valore scelto di trasmittanza e il suo effetto schermante influenza sia il componente del *tool* che definisce il fattore di vista sia il componente che genera la simulazione energetica. Gli output del componente di simulazione energetica e di calcolo del fattore di vista sono gli input per il componente che effettua il calcolo del valore dell'UTCI nella mappa microclimatica (Outdoor Comfort Analysis Recipe and Microclimate Map Analysis components).

Nel considerare il *workflow* da adottare si è tenuto conto che un complesso componente adattivo, con la sua forma mutevole, potes-

se influenzare in maniera considerevole l'azione del vento incidente sulla superficie. Per l'analisi energetica attraverso Ladybug vengono importati i dati metereologici in formato .epw (EnergyPlus Weather files) in Grasshopper. Essi contengono anche i dati relativi al vento. Per quanto detto però il vento viene influenzato in maniera considerevole dalla geometria del contesto e pertanto si è deciso di non usare i vettori contenuti nei file .epw ma di processare una simulazione di Computaional Fluid Dynamic (CFD). Il caso studio è stato simulato usando un motore validato, OpenFOAM (Robertson, 2015) collegato a Grasshopper attraverso il plugin Butterfly. Come suggerito dal workflow di Chris Mackey (Mackey, 2015) la simulazione è stata effettuata tenendo conto del profilo del vento verticale in entrata. In questa parte dell'algoritmo la geometria dello shelter e la geometria di contesto sono input (componente CreateBFGeometries). La definizione del tunnel del vento per effettuare la simuazione fluidodinamica è legata a queste geometrie (CreateCaseFromTunnel component). È stata utilizzata una maglia esadecimale con un infittimento nella zona di interesse. Tale rifinizione è stata introdotta a partire da 3 metri dal livello del terreno in maniera crescente verso terra.

La griglia di punti su cui è stata effettuata l'analisi fluidodinamica è la stessa generata per l'analisi energetica (componente Honeybee\_Generate Test Pionts). I vettori del vento così ottenuti ed i punti di applicazione confluiscono nel componente di definizione della mappa UTCI (Honeybee\_Outdoor Comfort Analysis Recipe and Microclimate Map Analysis).

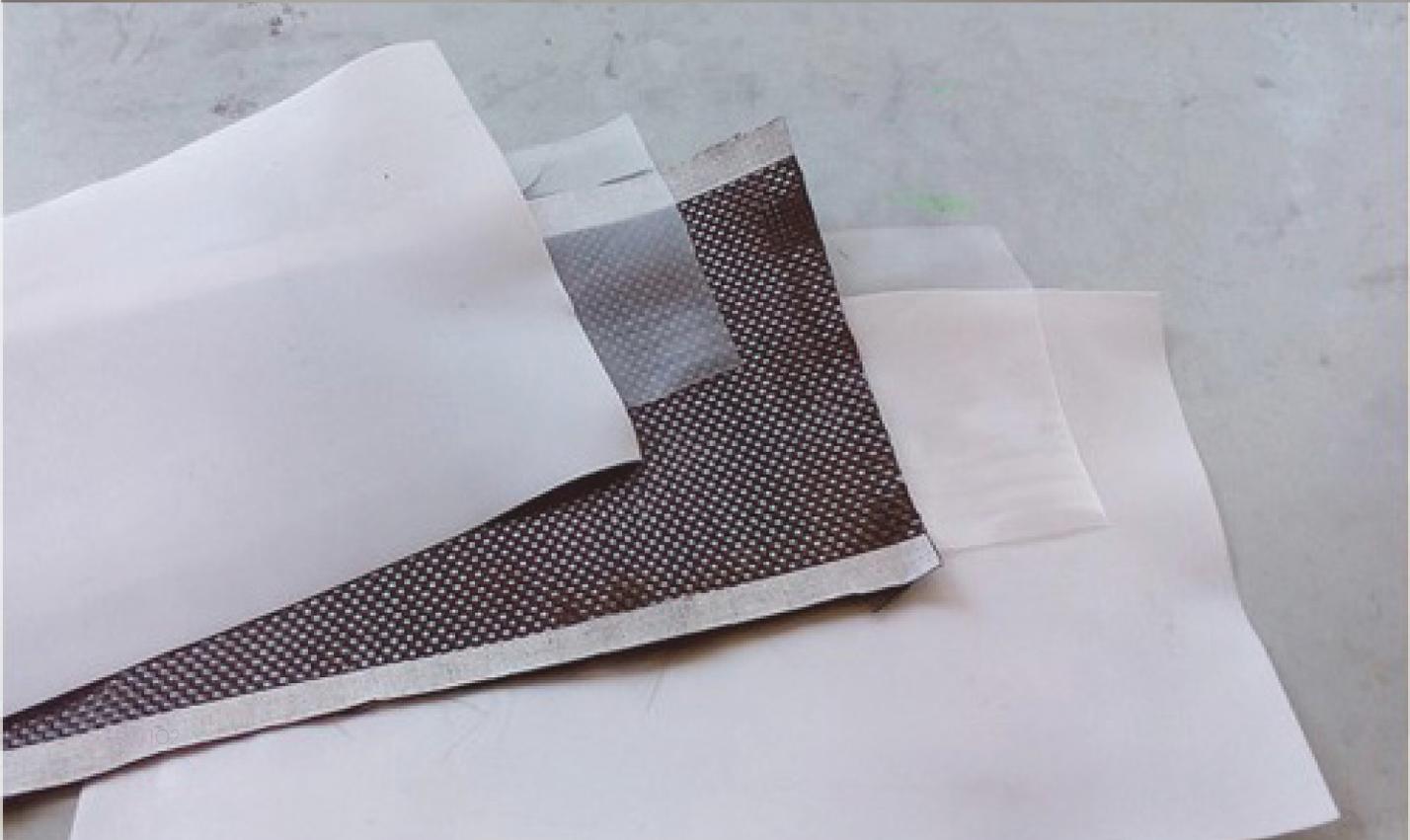
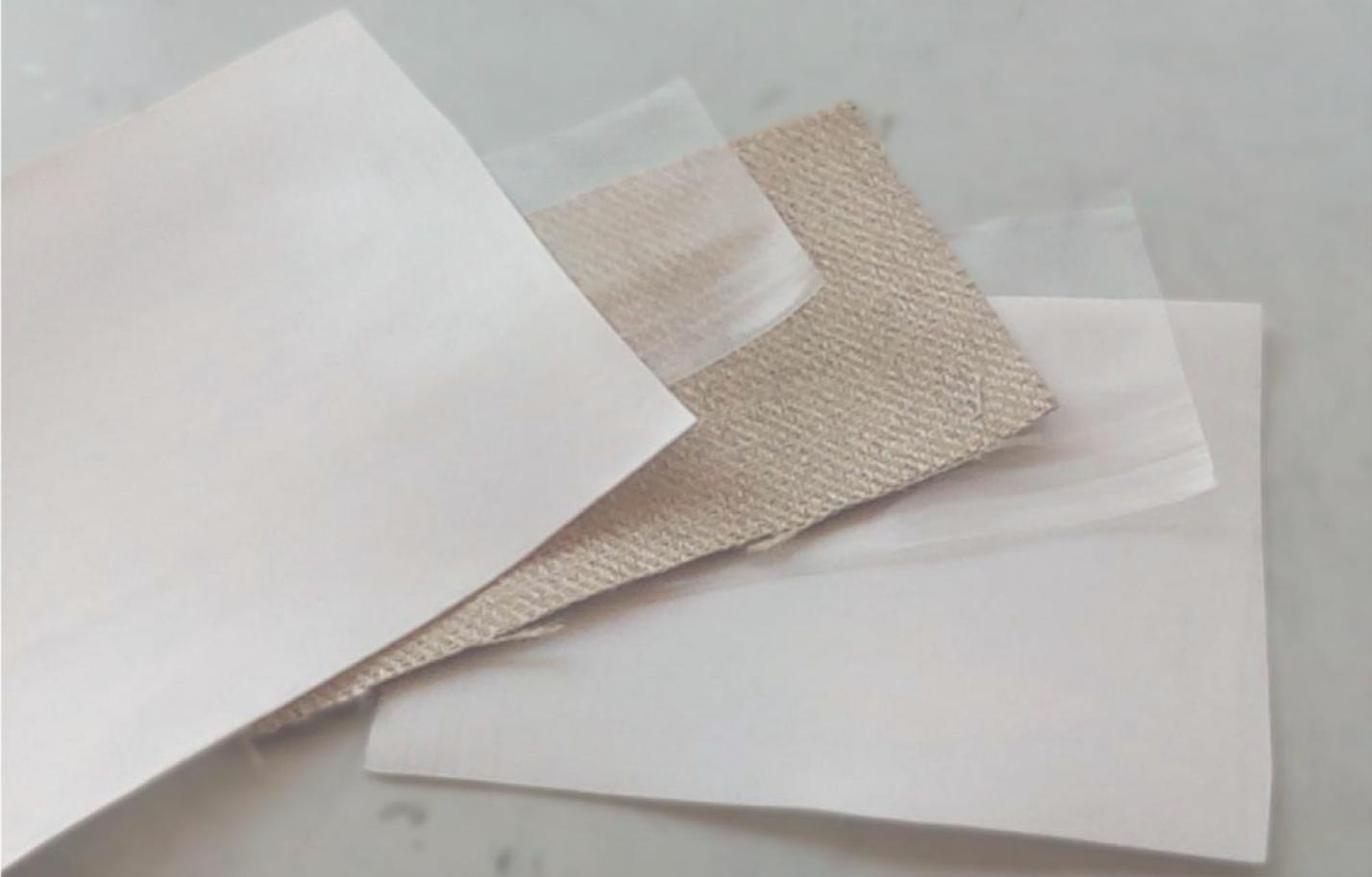


## 4.2.5 Metodologia per l'ottimizzazione della forma e del cinematismo

L'ottimizzazione è la procedura di trovare il minimo o il massimo valore di una funzione attraverso la scelta di un numero di variabili soggette ad una serie di vincoli (Machairas, Tsangrassoulis & Axarli 2014). In questo studio il processo di ottimizzazione ha lo scopo di trovare la migliore configurazione geometrica di un componente adattivo in termini di valore di UTCI che essa determina. Tale ricerca non è univoca, ma tarata su differenti orari del giorno su cui si decide di calibrare il movimento. Il problema di ottimizzazione coinvolge variabili discrete legate al cinematismo del componente e funzioni obiettivo non lineari. In alcuni casi sarebbe possibile ottenere una soluzione analitica della funzione obiettivo (es. Adamski, 2007) e trovare quindi la vera soluzione ottimale. Ma questo è possibile solo quando lo spazio delle soluzioni è relativamente piccolo ed il calcolo della funzione obiettivo veloce, allora in tali casi la ricerca può essere effettuata nell'intero spazio trovando la reale soluzione. Ma in questo caso lo spazio delle soluzioni è molto esteso e soprattutto il calcolo della funzione obiettivo è molto lento e pertanto si è deciso di implementare nel workflow un algoritmo di ottimizzazione.

L'algoritmo evolutivo è lo strumento più popolare per risolvere i problemi di ottimizzazione in ambito edilizio. Tra i vari tipi (*Particle Swarm Optimization* PSO, *Simulated Annealing* SA, *Ant Colony Optimization*, ...) l'algoritmo genetico (*Genetic Algorithm* GA) è quello più impiegato per le strategie di risparmio energetico nel settore edilizio (Machairas, Tsangrassoulis & Axarli, 2014) ed è inoltre direttamente implementabile in Grasshopper grazie al plug-in Galapagos. Le variabili del problema sono gli input dell'algoritmo e vengono detti Genome, mentre il valore da minimizzare o massimizzare, output dell'algoritmo o funzioni obiettivo sono dette Fitness. Nel caso di componenti adattivi per confort di spazi esterni si è deciso di utilizzare come Fitness la somma dei valori dell'indice UTCI di una griglia di punti in una mappa microclimatica e come Genome i movimenti che la struttura può compiere come meglio descritto più avanti.

Tale ottimizzazione deve essere ripetuta per diversi orari del giorno di riferimento trovando così una serie di configurazioni su cui tarare i movimenti del componente.



## 5 I RISULTATI DELLE INDAGINI SPERIMENTALI

### 5.1 La conformazione del materiale KREO ed il processo di produzione

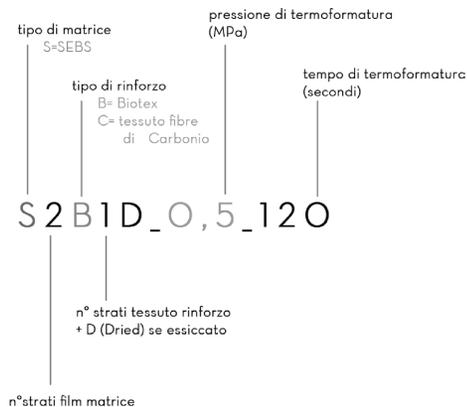
Il processo di produzione del materiale KREO prevede, come meglio esplicitato in metodologia, lo stampaggio in pressa a caldo di strati alternati dei materiali base costituenti, ossia film sottili di SEBS e tessuti di rinforzo.

Sono stati realizzati circa 25 campioni dei quali sono stati registrati i parametri definitivi e segnalate notazioni sul materiale ottenuto. La stessa definizione dei parametri utili da considerare per la produzione del materiale è stata individuata realizzando i primi campioni e valutando quali procedure fossero variabili da controllare per ottimizzare il prodotto del processo di produzione:

- rapporto matrice-rinforzo;
- pressione di termoformatura;
- tempi di termoformatura;
- agenti per il distacco dalla pressa;
- temperatura di termoformatura.

Il miglioramento del processo di produzione dei compositi, secondo i parametri citati, ha portato ad ottenere l'ottimizzazione del rapporto matrice-rinforzo utilizzando due strati di matrice con uno di rinforzo interposto. L'ottimizzazione del composito è stata effettuata riducendo al minimo la quantità di SEBS, ottenendo un composito più leggero e sottile possibile.

Ogni campione è stato nominato con un codice alfanumerico che indica in maniera univoca i principali parametri di produzione.



Specimen	Layer		Weight (g)		Pressure (MPa)	Time of pressure (seconds)	Thickness (mm)					Medium thickness (mm)
	Matrix	Reinforcement	Matrix	Reinforcement								
S4B1_1	4 sheet of SEBS 0,5 mm	1 sheet of Biotex	x	x	1	x	2,25	2,18	2,22	2,30	2,17	2,22
S4B1_2			x	x	2	x	2,05	2,12	1,74	1,89	1,92	1,94
S4B1_3			x	x	3	x	2,18	2,14	2,00	2,15	2,07	2,11
S4B1_4			x	x	4	x	1,73	1,89	1,87	2,18	2,24	1,98
note	_For a better control of the composite it is appropriate to record the weights of the materials before thermoforming them. _Minimize the thickness to optimize the performance of the material: more reinforcement and less matrix.											
S2B1_2_60	2 sheet of SEBS 0,17 mm	1 sheet of Biotex	4,54	5,4	2	60"	0,78	0,74	0,73	0,70	0,78	0,75
note	_A preliminary analysis to the touch showed surface roughness. To ensure a better separation from the press machine, we replace baking paper with Teflon sheets _Then visual analysis and analysis to the touch show more regular and uniform surfaces.											
S2B1_2_60	2 sheet of SEBS 0,17 mm	1 sheet of Biotex	4,62	5,8	2	60"	0,77	0,77	0,75	0,78	0,77	0,77
S2B1_1_90			4,69	5,3	1	90"	0,77	0,76	0,75	0,71	0,77	0,75
S2B1_0,5_120			4,71	5,58	0,5	120"	0,98	1,08	0,99			1,02
note	_The visual analysis shows a non-uniform distribution of the SEBS with many air bubbles that may be related to the presence of water in the fabric. _As a possible solution we have ironed the fabric in the press at 180° for 90" at 2 MPa, pressed slowly to not move the fibers.											
S2B1D_0,5_120	2 sheet of SEBS 0,17 mm	1 sheet of Biotex	5,54	6,25	0,5	120"	0,92	1,04	0,98			0,98
note	_The visual analysis of the sample shows the absence of air bubbles. _The sample exceeds the visual and tactile analysis and it is subjected to Cross section analysis: good matrix-reinforcement interface.											

Tab. 5.1 | Campioni SEBS-Biotex realizzati (in rosso il campione che ha superato le analisi ed i relativi parametri di produzione)



Fig. 5.2 | Il processo di produzione per stampaggio in pressa a caldo.

Specimen	Layer		Weight (g)		Pressure (MPa)	Time of pressure (seconds)	Thickness (mm)					Medium thickness (mm)	
Specimen	Layer		Weight (g)		Pressure (MPa)	Time of pressure (seconds)	Thickness (mm)					Medium thickness (mm)	
	Matrix	Reinforcement	Matrix	Reinforcement									
S4C1_1	4 sheet of SEBS 0,5 mm	1 sheet of carbon fiber fabric	x	x	1	x	2,15	2,18	1,95	2,20	2,02	2,10	
S4C1_2			x	x	2	x	1,95	1,83	2,07	2,10	1,93	1,98	
S4C1_3			x	x	3	x	1,92	1,80	1,84	1,89	1,75	1,84	
S4C1_4			x	x	4	x	1,82	1,72	1,70	1,72	1,60	1,71	
note	_For a better control of the composite it is appropriate to record the weights of the materials before thermoforming them. _Minimize the thickness to optimize the performance of the material: more reinforcement and less matrix.												
S4C2_4	4 sheet of SEBS 0,5 mm	2 sheet of carbon fiber fabric	23,22	7,95	4	x	1,13	1,12	1,13	1,20	1,15	1,15	
S4C2_6			22,82	7,22	6	x	0,94	0,97	1,03	1,08	1,00	1,00	
S4C2_18			23,46	7,68	18	x	0,66	0,65	0,70	0,76	0,71	0,70	
note	_The pressure time affects the result: it should be recorded.												
S4C2_20_90	4 sheet of SEBS 0,5 mm	2 sheet of carbon fiber fabric	23,36	6,95	20	90"	0,65	0,66	0,61	0,66	0,64	0,64	
S4C2_25_90			16,75	7,88	25	90"	0,63	0,56	0,50	0,63	0,60	0,58	
S3C2_5_60	3 sheet of SEBS 0,5 mm	2 sheet of carbon fiber fabric	16,54	5,78	5	60"	0,62	0,60	0,64	0,63	0,68	0,58	
S3C2_15_60					15	60"							
S3C2_5_150					16,35	6,24	5	150"					
S3C2_10_60							10	60"					
S3C2_1_180							1	180"					
S3C2_5_180					39,7	5,97	5	180"					
S3C2_10_60							10	60"					
note	_Testing with SEBS with lower surface development than fibers to try to reduce the amount of polymer. _SEBS "pulls the fibers" and dislocates it, does not reduce the thickness. Weak samples. _It is advisable to program other tests with SEBS and reinforcement of the same size.												
S3C2_2_90	3 sheet of SEBS	2 sheet of carbon fiber	5,8	4,74	2	90"							
note	_A preliminary analysis to the touch showed surface roughness. To ensure a better separation from the press machine, we replace baking paper with Teflon sheets. _Then visual analysis and analysis to the touch show more regular and uniform surfaces.												
S2C1_0,2_120	2 sheet of SEBS 0,17 mm	1 sheet of carbon fiber fabric	5,28	3,2	0,2	60"							
S2C1_0,5_120			5,25	3,44	0,5	120"							
S2C1_1_120			5,4	3,3	1	60"							
S2C1_1_120			5,2	3,45	1	120"							
S2C1_4_120			5,4	3,45	4	120"							
S2C1_5_120			5,6	3,38	5	120"	0,58	0,58	0,63	0,61	0,61	0,60	
note	_At a pressure of 5 mpa, a more uniform distribution of sebs is obtained.												

Tab. 5.2 | Campioni SEBS-Carbonio realizzati (in rosso il campione che ha superato le analisi ed i relativi parametri di produzione)

I materiali ottenuti, capaci di soddisfare le analisi indicate nei capitoli precedenti (visiva, al tatto, cross section) presentano i seguenti parametri:

Composito SEBS - Carbonio

Due strati di SEBS ( $s=0,170$  mm) con interposto uno strato tessuto in fibre di carbonio ( $s=0,290$  mm)

Termoformatura:

- Temperatura:  $180$  °C
- Pressione:  $5$  MPa
- Tempo:  $2' 00''$
- Materiale per garantire distacco dalla pressa: foglio di Teflon
- Spessore medio:  $0,600$  mm
- Peso medio:  $550$ g/m<sup>2</sup>

Composito SEBS - Biotex

Due strati di SEBS ( $s=0,170$  mm) con interposto uno strato di tessuto in fibre di canapa ( $s=0,600$  mm)

Termoformatura:

- Temperatura:  $180$  °C
- Pressione:  $0,5$  MPa
- Tempo:  $2' 00''$
- Materiale per garantire distacco dalla pressa: foglio di Teflon
- Spessore medio:  $0,980$  mm
- Peso medio:  $720$ g/m<sup>2</sup>



Fig. 5.3 | Campione finale SEBS-Carbonio

È stato necessario eliminare la presenza di acqua nel tessuto in fibra di canapa, poiché essa, evaporando durante la fase di termoformatura, causava la presenza di bolle nel composito finale. La canapa è stata perciò posta in pressa a 180° a 2 MPa per 1' 30", prima del processo di termoformatura con il SEBS.

L'ottimizzazione della finitura superficiale del composito è stata realizzata utilizzando come superficie per il distacco dalla pressa un foglio di teflon. Grazie a questo la superficie del SEBS rimane trasparente lasciando leggibile la trama del tessuto sottostante.



Fig. 5.4 | Campione finale SEBS-Biotex

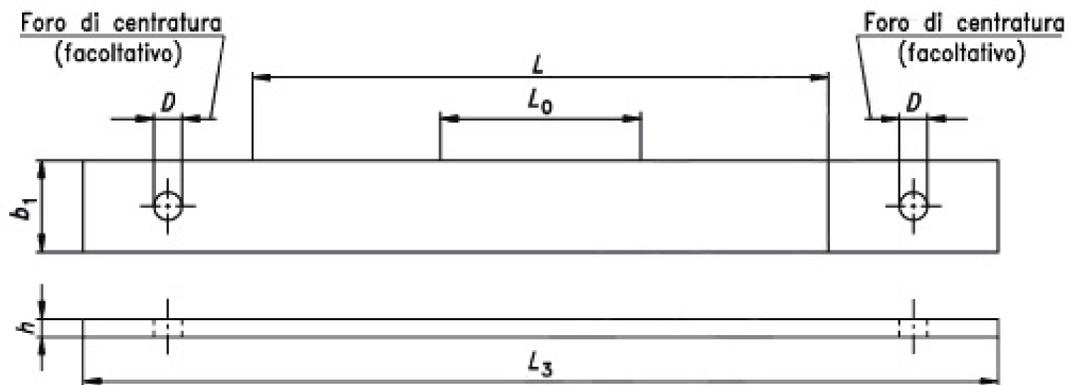


Fig. 5.5 | Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4-Provetta tipo 2

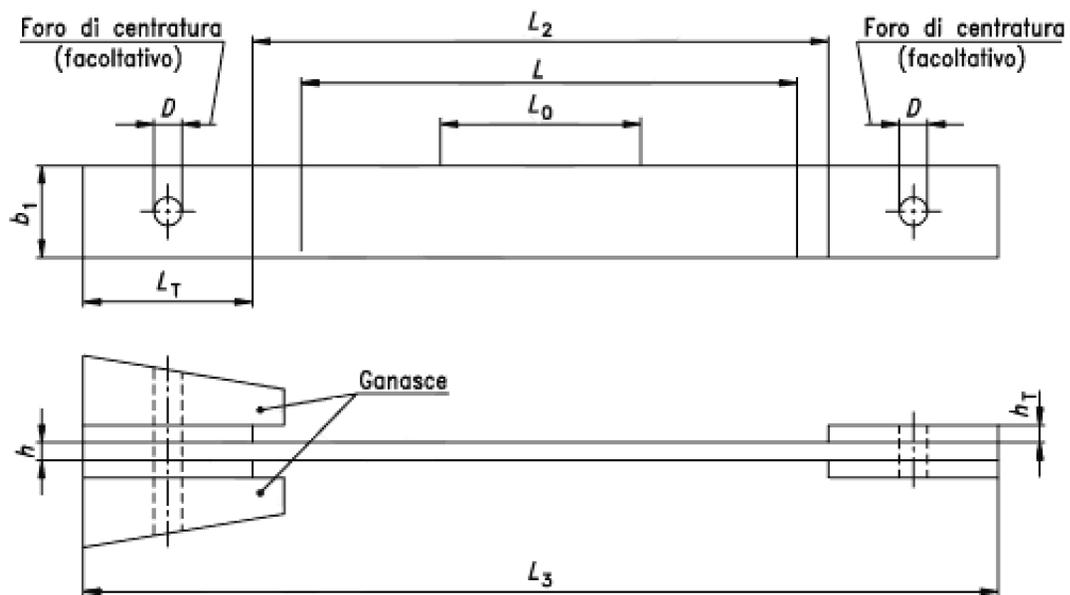


Fig. 5.6 | Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4-Provetta tipo 3

## 5.2 La caratterizzazione meccanica del materiale

### 5.2.1 Test di trazione monoassiale con fibre disposte parallelamente ed ortogonalmente all'asse di trazione

Il materiale ottenuto è stato caratterizzato determinando le principali caratteristiche meccaniche attraverso una campagna di test sperimentali.

Definito il materiale e il processo produttivo sono stati realizzati una serie di campioni successivamente divisi in provette da sottoporre a prova di trazione monoassiale per caratterizzare il materiale secondo questo tipo di sollecitazione. La normativa UNI EN ISO 527-4 prescrive l'utilizzo di provette rettangolari del tipo 2 o 3 (vedi figura pagina a fianco) per materiali rinforzati con fibre continue multidirezionali rimandando alle prescrizioni della UNI EN ISO 527-1 punto 5.1 per la scelta. Le provette in SEBS-Biotex sono state realizzate secondo le indicazioni della provetta tipo 2, con  $L_3=200$  mm,  $L=150$  mm e  $b_1=25$  mm. La provetta di tipo 2 è risultata soddisfacente per la riuscita della prova. Al contrario le provette in SEBS-Carbonio, realizzate con la stessa geometria hanno dato luogo a prove impossibili per scivolamento della provetta. In tali casi la UNI EN ISO 527-1 punto 5.1 prescrive l'utilizzo della provetta di tipo 3 cioè sempre rettangolare ma con talloni incollati alle estremità. Si è deciso di realizzare pertanto dei talloni in PMMA (polimetilmetacrilato) incollati al composito. Sono state testate differenti colle, arrivando a scegliere infine l'etile cianoacrilato, che ha garantito l'adesione del tallone dal composito durante le prove.

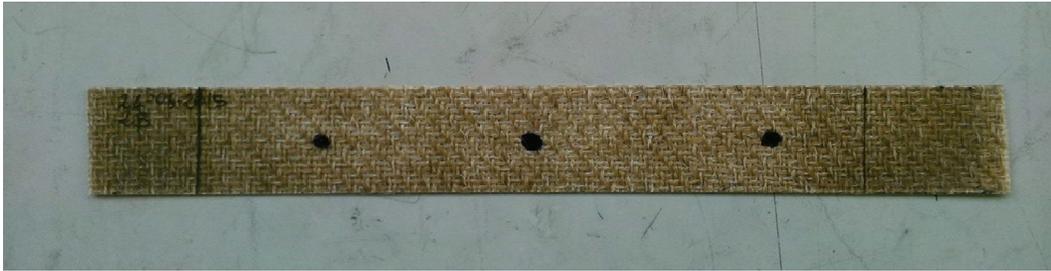
Le prove eseguite sui campioni SEBS-Biotex determinano diagrammi di sforzo-deformazione con valori medi di resistenza a trazione  $F_M=521$  N, di massimo sforzo  $\sigma_M=21,20$  N/mm<sup>2</sup> con deviazione standard  $s=0,63$  N/mm<sup>2</sup> e coefficiente di variazione  $\nu=2,96$  N/mm<sup>2</sup>. La deformazione  $\varepsilon_M$  ha, in percentuale, valore medio pari a 7,5 con deviazione standard  $s=0,5$  e coefficiente di variazione  $\nu=6,71$ .

Le prove eseguite sui campioni in SEBS-Carbonio mostrano valori medi  $\sigma_M=104,73$  N/mm<sup>2</sup> con deviazione standard  $s=9,81$  N/mm<sup>2</sup> e coefficiente di variazione  $\nu=9,36$  N/mm<sup>2</sup>. La deformazione media  $\varepsilon_M=2,9$  con deviazione standard  $s=0,2$  e coefficiente di variazione  $\nu=7,27$ .

RISULTATI PROVE DI TRAZIONE			
Composito	$\sigma_M$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_M$ [%]	$F_M$ [N]
SEBS-Biotex	21,20	7,5	521
SEBS-Carbonio	104,73	2,9	1720

Tab. 5.31 | Quadro riepilogativo dei risultati delle prove di trazione monoassiale

# SEBS-Biotex



Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm
	1	BIOTEX SEBS	0.95	25	23.75	526	526	22,13	7.6	8.0	2964.66
	2	BIOTEX SEBS	0.97	25	24.25	522	522	21,53	7.8	8.4	3211.85
	3	BIOTEX SEBS	1.02	25	25.50	535	535	20,97	7.4	8.1	2963.97
	4	BIOTEX SEBS	1	25	25.00	514	514	20,54	8.0	9.0	3178.65
	5	BIOTEX SEBS	0.98	25	24.50	511	511	20,86	6.7	8.2	2857.29

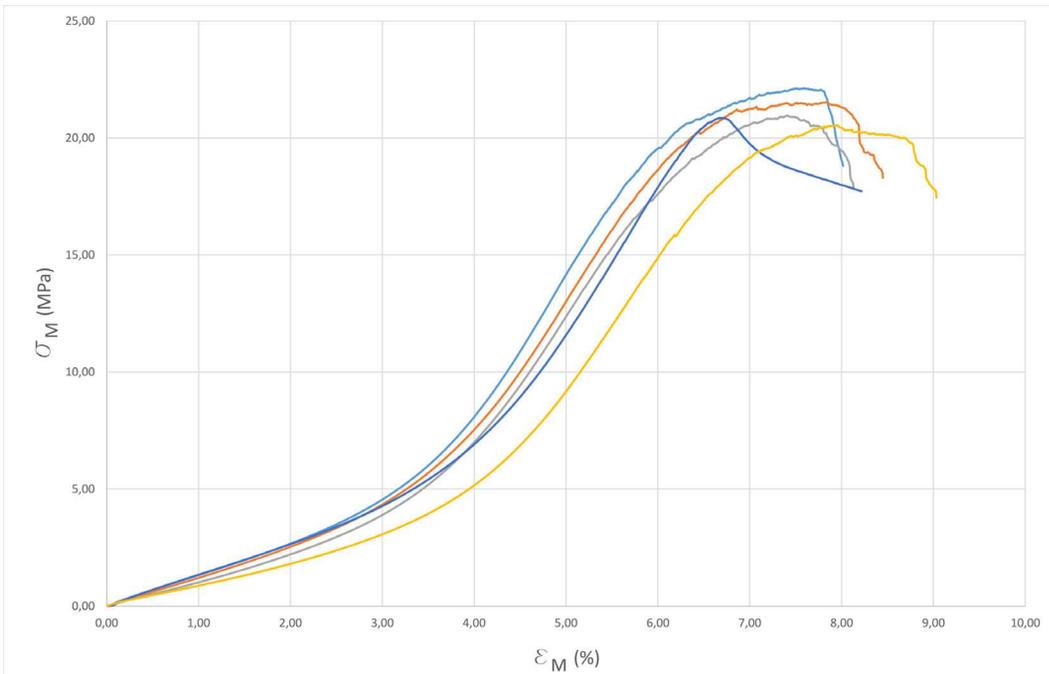


Fig. 5.7 | Diagramma sforzo-deformazione, test di trazione monoassiale fibre parallele SEBS-Biotex

Series	a	b	A <sub>0</sub>	σ <sub>Y</sub>	F <sub>M</sub>	σ <sub>M</sub>	ε <sub>M</sub>	ε <sub>B</sub>	W <sub>B</sub>
n = 5	mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	N	N/mm <sup>2</sup>	%	%	Nmm
$\bar{x}$	0.984	25	24.60	521	521	21,20	7,5	8,4	3035,28
s	0.02702	0,000	0.68	9,57	9,57	0,63	0,5	0,4	152,88
v	2.75	0,00	2.75	1,83	1,83	2,96	6,71	4,82	5,04
Min.	0.95	25	23.75	511	511	20.54	6.7	8.0	2857.29
Max.	1.02	25	25.50	535	535	22,13	8.0	9.0	3211,85

# SEBS-Carbonio



Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm
	1	Carbonio SEBS cianoacrilato	0,65	25	17,50	1800	1800	<b>102,90</b>	3,0	9,0	9366,47
	2	Carbonio SEBS cianoacrilato	0,55	25	13,75	1580	1580	<b>115,04</b>	3,0	6,8	6672,40
	3	Carbonio SEBS cianoacrilato	0,66	25	16,50	1810	1810	<b>109,68</b>	3,0	6,5	6616,03
	4	Carbonio SEBS cianoacrilato	0,7	25	17,50	1560	1560	<b>89,06</b>	3,0	9,6	9811,18
	5	Carbonio SEBS cianoacrilato	0,69	25	17,25	1850	1850	<b>106,96</b>	2,5	6,6	7023,26

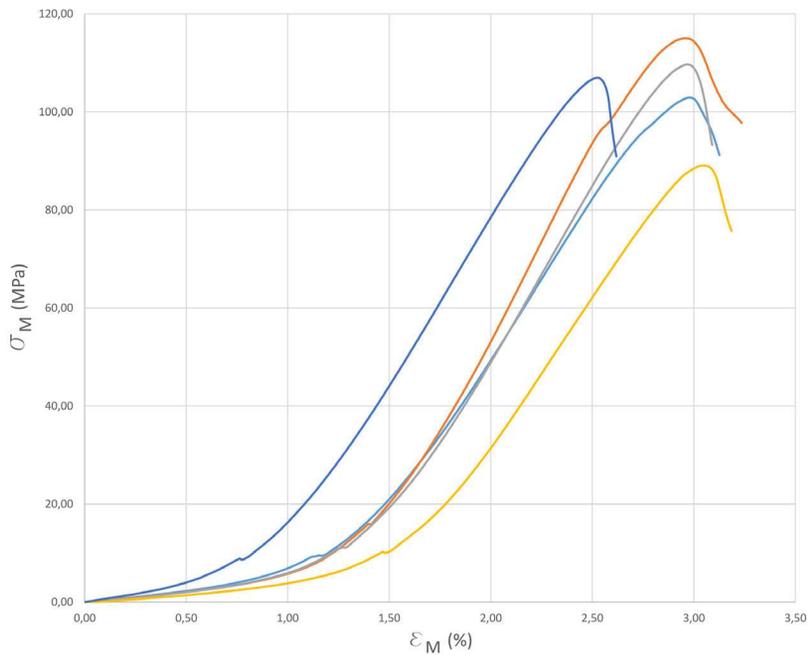


Fig. 5.8 | Diagramma sforzo-deformazione, test di trazione monoassiale fibre parallele SEBS-Biotex

Series	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm
n = 5									
x	0,65	25	16,50	1720	1720	104,73	2,9	7,7	7897,87
s	0,05958	0,000	1,59	137	137	9,81	0,2	1,5	1559,44
v	9,17	0,00	9,64	7,98	7,98	9,36	7,27	19,40	19,75
Min.	0,55	25	13,75	1560	1560	89,06	2,5	6,5	6616,03
Max.	0,7	25	17,50	1850	1850	115,04	3,0	9,6	9811,18

## 5.2.2 Determinazione del modulo di Young E

Il calcolo del modulo di Young E è stato effettuato partendo dai risultati del test di trazione monoassiale con fibre disposte parallelamente ed ortogonalmente all'asse di trazione. Graficamente è stato individuato il tratto lineare dei diagrammi di ogni provino da cui determinare tale parametro. In regime elastico lineare vale la legge di Hook per la quale

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Per i provini SEBS-Biotex testati vale

Provino	E [MPa]
1	134,3
2	132,3
3	119,5
4	93,08
5	130,32
$E_M$	<b>129,1</b>

Scartato il valore associato al provino n°4 per eccessivo scarto rispetto alla media, si è ottenuto il valore medio tra i provini 1-2-3 e 5 di  $E_M = 129,1$  MPa.

Stesso procedimento è stato seguito per i provini in SEBS-Carbonio, senza scarto di valori.

Provino	E [MPa]
1	6988,6
2	7908,3
3	7010,8
4	6187,18
5	6843,07
$E_M$	<b>6987,6</b>

In questo caso il modulo di Young medio vale  $E_M = 6987,6$  MPa.

### 5.2.3 Test di trazione monoassiale con fibre disposte a 45° rispetto all'asse di trazione

Come mostrato dalle immagini, la deformazione subita dai campioni, la cui geometria è descritta al paragrafo 4.1.2, sottoposti a trazione monoassiale con fibre disposte a 45° è risultata paragonabile con quella descritta in letteratura per i tessuti sottoposti ad analoghi test (Cuomo, Dell'Isola & Greco, 2016). È stato pertanto possibile utilizzare i risultati ottenuti dalle prove a per il calcolo del modulo di taglio  $G$ .

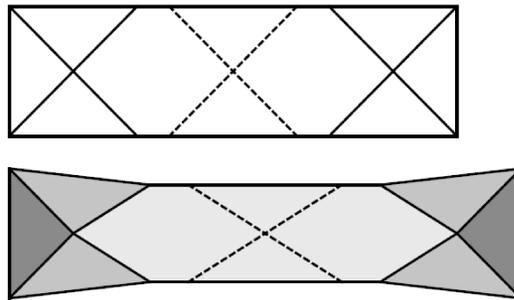


Fig. 5.9 | Deformazione geometrica di un campione di tessuto con fibre orientate a 45° sottoposto a prova di trazione

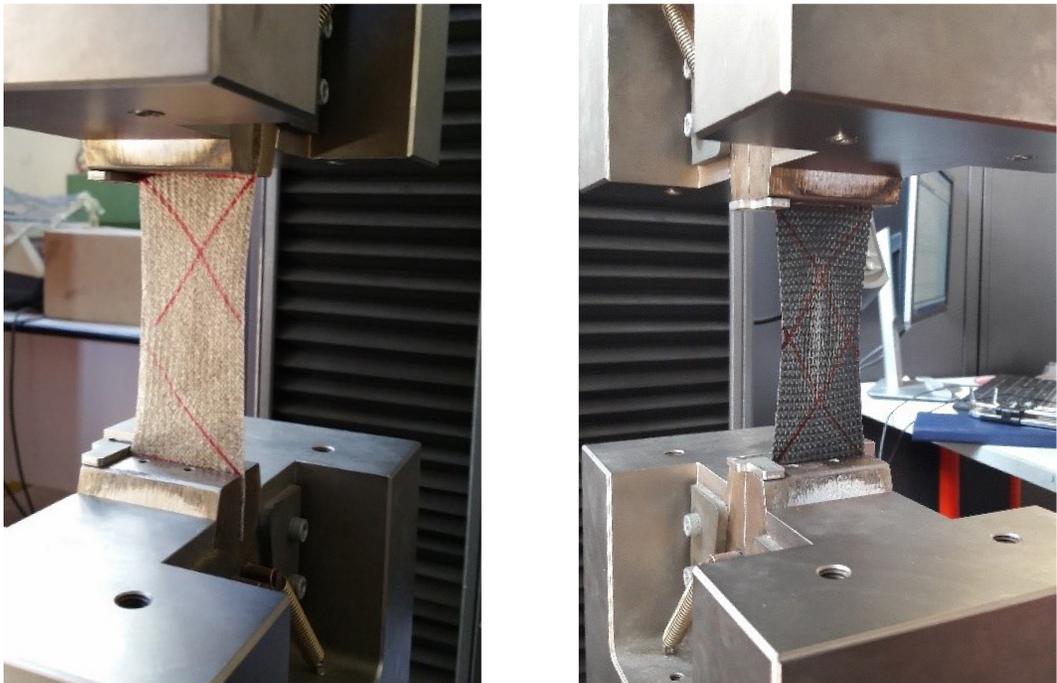


Fig. 5.10 | Provini SEBS-Biotex e SEBS-Carbonio sottoposti a prova di trazione monoassiale con fibre disposte a 45° rispetto all'asse di trazione

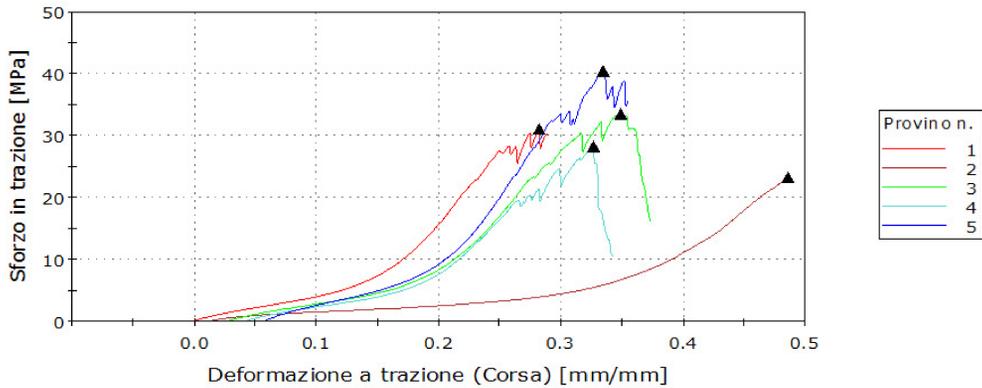


Fig. 5.11 | Diagramma sforzo-deformazione, test di trazione monoassiale fibre 45° SEBS-Biotex

	Modulo di Young [GPa]	Sforzo allo Snervamento [MPa]	Deformazione allo Snervamento [%]
1	0,257	28,409	25,675
2	0,168	-----	-----
3	0,247	33,586	31,939
4	0,213	28,399	28,260
5	0,287	40,560	27,605
Media	0,234	32,739	28,370
Deviazione standard	0,04552	5,75819	2,62015

	Sforzo a Rottura [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Energia a Rottura [J]
1	29,936	29,024	10,488
2	23,400	47,061	8,744
3	16,263	34,350	13,661
4	10,665	29,854	9,343
5	35,671	29,620	14,001
Media	23,187	33,982	11,248
Deviazione standard	10,07698	7,61336	2,443

	Modulo (Corda 0,05 mm - 0,25 mm) [GPa]
1	-----
2	-----
3	-----
4	-----
5	-----
Media	-----
Deviazione standard	-----

# SEBS-Carbonio

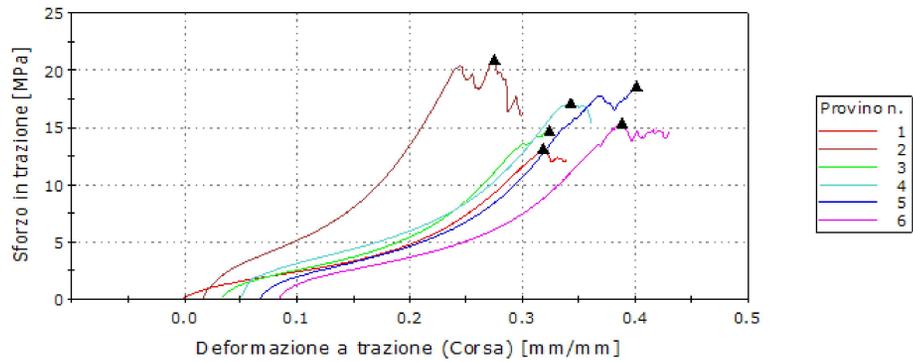


Fig. 5.12 | Diagramma sforzo-deformazione, test di trazione monoassiale fibre 45° SEBS-Carbonio

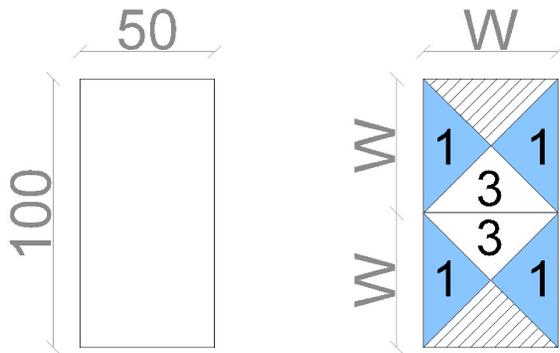
	Modulo di Young [GPa]	Sforzo allo Snervamento [MPa]	Deformazione allo Snervamento [%]
1	0,090	13,277	31,772
2	0,165	20,407	22,704
3	0,109	-----	-----
4	0,114	17,254	29,145
5	0,125	17,849	30,088
6	0,102	15,473	30,317
Media	0,117	16,852	28,805
Deviazione standard	0,02616	2,66790	3,53799

	Sforzo a Rottura [MPa]	Deformazione a Rottura [%]	Energia a Rottura [J]
1	12,016	33,842	8,884
2	16,452	28,349	13,252
3	14,813	29,112	7,939
4	15,436	30,997	10,840
5	18,568	33,339	11,976
6	14,635	34,592	10,935
Media	15,320	31,705	10,638
Deviazione standard	2,16712	2,61007	1,955

	Modulo (Corda 0,05 mm - 0,25 mm) [GPa]
1	-----
2	-----
3	-----
4	-----
5	-----
6	-----
Media	-----
Deviazione standard	-----

## 5.2.4 Determinazione del modulo di scorrimento a taglio G

La geometria del provino è definita come segue:



- W, larghezza;
- H=2W, lunghezza;
- h, spessore;
- A<sub>1</sub>, area della regione 1;
- A<sub>3</sub>, area della regione 3.

Dalla figura si ricava che:

$$A_1 = w^2$$

$$A_3 = (w/\sqrt{2})^2 = (w^2/2)$$

Lo scorrimento  $\gamma_1 = \gamma_3/2$

Dalla letteratura vale:

$$T\gamma_3 = G \gamma_3 h$$

$$T\gamma_1 = G \gamma_1 h = G (\gamma_3/2) h$$

Sotto ipotesi di fibre del materiale composito inestensibili e di loro rotazioni uniformi si può applicare la seguente formula, considerando  $d=0$

$$\begin{aligned}
& G \gamma_3 h 2 \frac{H-W}{(H-W)^2} A_3 \pm G \frac{\gamma_3}{2} h \frac{(H-W)+(H-W)}{2(H-W)^2} A_1 = \\
& = h G \left[ 2 \gamma_3 \frac{W^2/2}{H-W} + \frac{\gamma_3}{2} \frac{W^2}{H-W} \right] = \\
& = h G W^2 \gamma_3 \left[ \frac{2/2}{H-W} + \frac{1}{2} \frac{1}{H-W} \right] = \\
& = h G W^2 \gamma_3 \left[ \frac{1}{H-W} + \frac{1}{2} \frac{1}{H-W} \right] = \\
& = h G W^2 \gamma_3 \left[ \frac{3}{2} \frac{1}{H-W} \right] =
\end{aligned}$$

Sapendo che la lunghezza H del provino è pari a due volte la larghezza W, possiamo sostituire H=2W ottenendo:

$$\begin{aligned}
& = h G W^2 \gamma_3 \left[ \frac{3}{2} \frac{1}{2W-W} \right] = \\
& = h G W^2 \gamma_3 \left[ \frac{3}{2} \frac{1}{W} \right] =
\end{aligned}$$

Dato in letteratura  $\gamma_3$ :

$$\gamma_3 = \frac{2 \Delta d}{H-W} = \frac{2 \Delta d}{W}$$

Sostituendo si ha:

$$\Delta F = h G W^2 \frac{2 \Delta d}{W} \left[ \frac{3}{2} \frac{1}{W} \right] = h G \frac{6 \Delta d}{2} = 3 h G \Delta d$$

Da cui:

$$G = \frac{\Delta F}{3 h \Delta d}$$

Applicando tale relazione al tratto lineare dei diagrammi trovati è stato possibile calcolare il valore di G per ogni provino e da questi calcolare il valore medio.

## SEBS Biotex

Provino	G [MPa]
1	3,2
2	7,0
3	3,8
4	4,33
5	4,22
6	3,49
$G_M$	<b>3,8</b>

Il valore medio vale  $G_M = 4.34$  e la deviazione standard  $s=1.25$   
 Il valore associato al provino n° 2 è stato scartato, pertanto si ottiene che il valore medio tra i provini 1-3-4-5 e 6 vale  $G_M=3,8$  MPa.

## SEBS-Carbonio

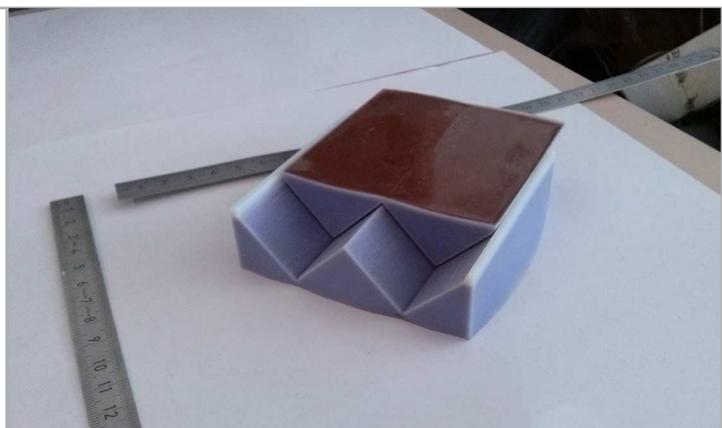
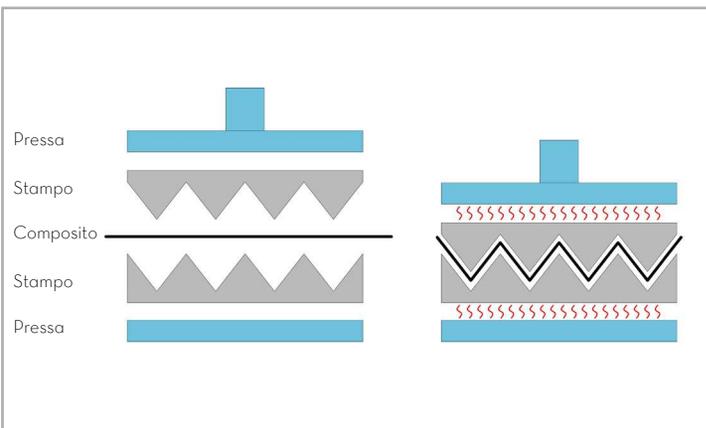
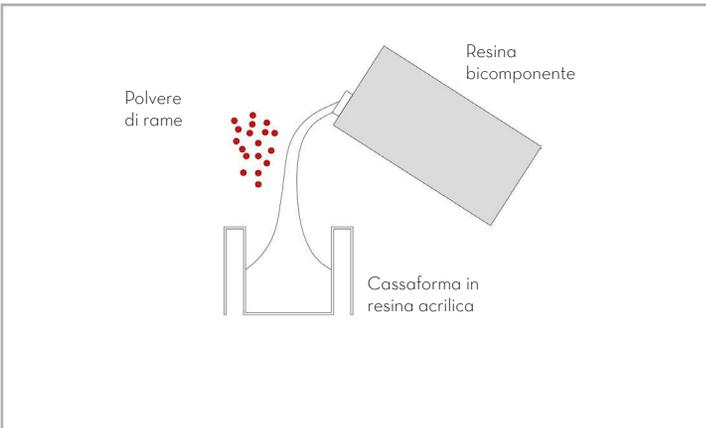
Provino	G [MPa]
1	5.61
2	---
3	4.78
4	4.66
5	7.37
$G_M$	<b>5,6</b>

Scartato il valore associato al provino n° 2, si è ottenuto il valore medio tra i provini 1-3-4-5 di  $G_M=5,6$  MPa.



### 5.3 Il processo di post-produzione per la realizzazione del pattern di piegatura

La realizzazione del pattern di piegatura è stata portata a compimento tramite un processo di termoformatura. Per la realizzazione dello stampo con il quale conferire il pattern di piegatura al composito si è deciso di non realizzare uno stampo in metallo professionale in modo da ridurre i tempi e i costi del test. È stata quindi creata una “cassaforma a perdere” in resina acrilica tramite prototipazione rapida con stampante 3D e successivamente riempita con resina bicomponente caricata con polvere di rame al fine di incrementare le capacità di conduzione termica dello stampo. Il processo di realizzazione, non standard, dello stampo ha presupposto la verifica della fattibilità con alcuni campioni utilizzati come tester. Sono stati pertanto realizzati 3 campioni cubici, di dimensione 2x2x2 cm con differenti spessori delle pareti (300, 600, 900  $\mu\text{m}$ ).



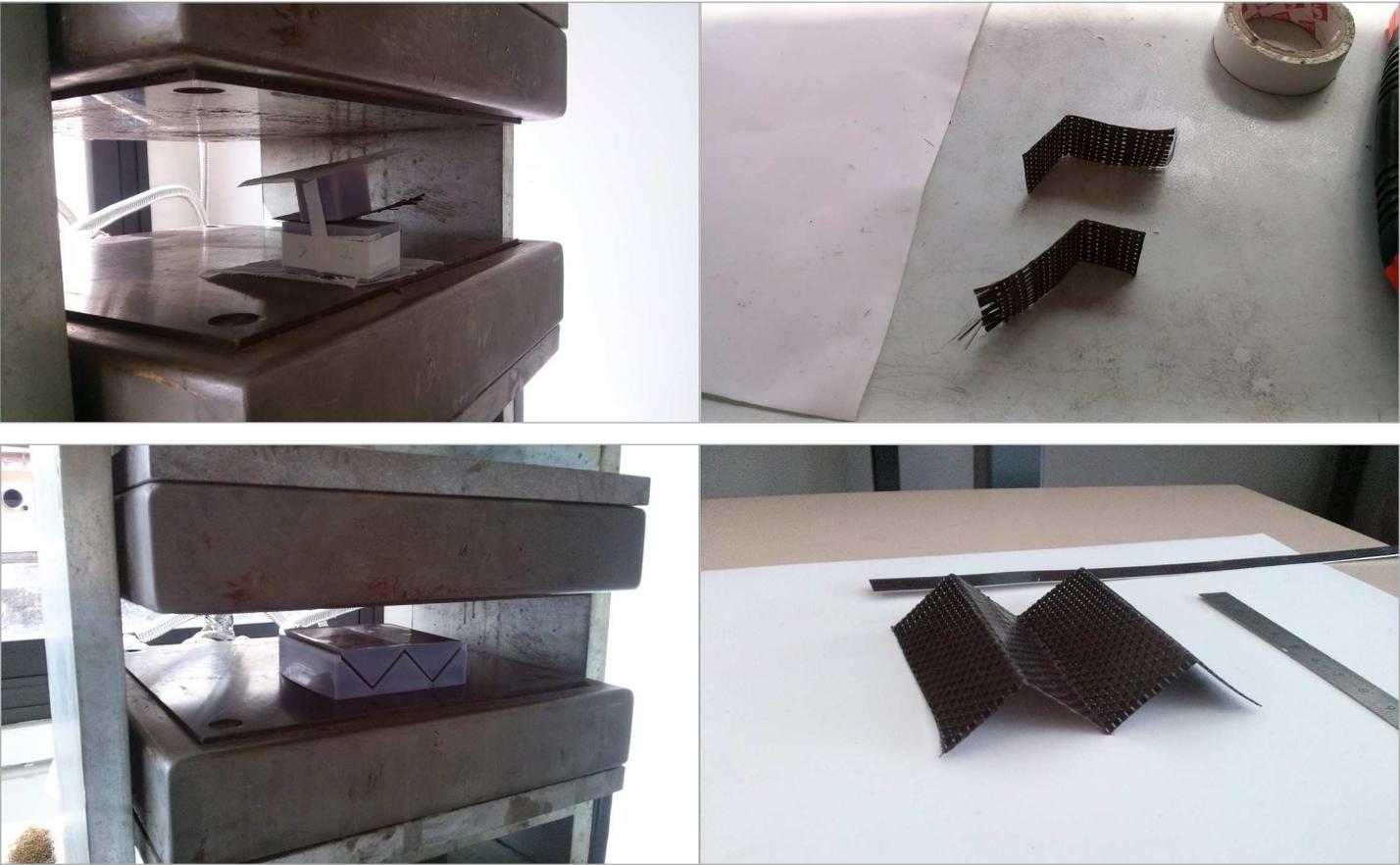
I provini sono poi stati utilizzati in pressa per verificarne il comportamento alla temperatura di  $140^{\circ}\text{C}$  e messi in contatto tra loro per conferire la piega ad un campione di materiale.

Il campione con spessore di  $300\mu\text{m}$  ha subito la rottura degli spigoli mentre quelli di  $600\mu\text{m}$  e  $900\mu\text{m}$  hanno superato positivamente il test. Si è scelto pertanto di utilizzare per le prove successive uno spessore di  $600\mu\text{m}$  per ottimizzare l'impiego di materiale.

Per una prima verifica della possibilità di realizzare una tassellazione di piegatura del materiale attraverso il sistema proposto, esso è stato applicato ad un sistema semplice, ossia un soffiutto.

Le due parti dello stampo sono state poste in pressa con interposto il composito. La temperatura impostata è di  $140^{\circ}\text{C}$  ed il sistema non è stato posto in pressione ma solo in semplice contatto per un tempo di 10'. Il composito ha raggiunto la configurazione desiderata assumendo una possibilità di cinematismo e al contempo una proprietà di resistenza per forma. L'angolo tra le facce dello stampo utilizzato per questo test è di  $90^{\circ}$ .

Fig. 5.14 | Stampi per conferire la piega a KREO ottenuti attraverso processi di prototipazione rapida riempiti con resina bicomponente e polvere di rame



## 5.4 Caratterizzazione della piega

La prova di piegatura è stata eseguita esclusivamente sul composito SEBS-Biotex poiché è risultato quello con migliori prestazioni in relazione alle prove sulle giunzioni (cfr par. 5.5) ed è quindi stato considerato il composito più adatto ad essere impiegato per le superfici pieghevoli. Le prove eseguite, secondo quanto indicato nel paragrafo 4.1.4, sono di due tipi: la prova di apertura e quella di chiusura i cui risultati sono mostrati nella pagina seguente.

Le due prove mostrano una pendenza del diagramma differente, come rimarcato anche dalla sovrapposizione dei diagrammi di due provini, uno sottoposto ad apertura ed uno a chiusura.

Ad un tratto iniziale, in cui la pendenza del diagramma è pressoché sovrapponibile, fino ad uno spostamento di 10 mm, segue una deciso diversificazione della pendenza. Si evince come in apertura il materiale si comporti in maniera più rigida che in chiusura.

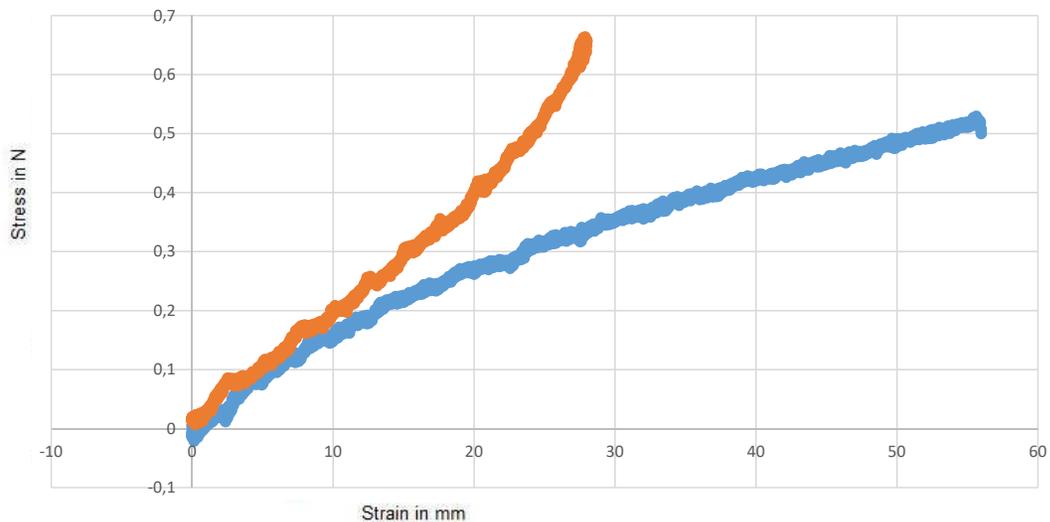


Fig. 5.15 | Sovrapposizione dei diagrammi di due provini, uno sottoposto ad apertura ed uno a chiusura

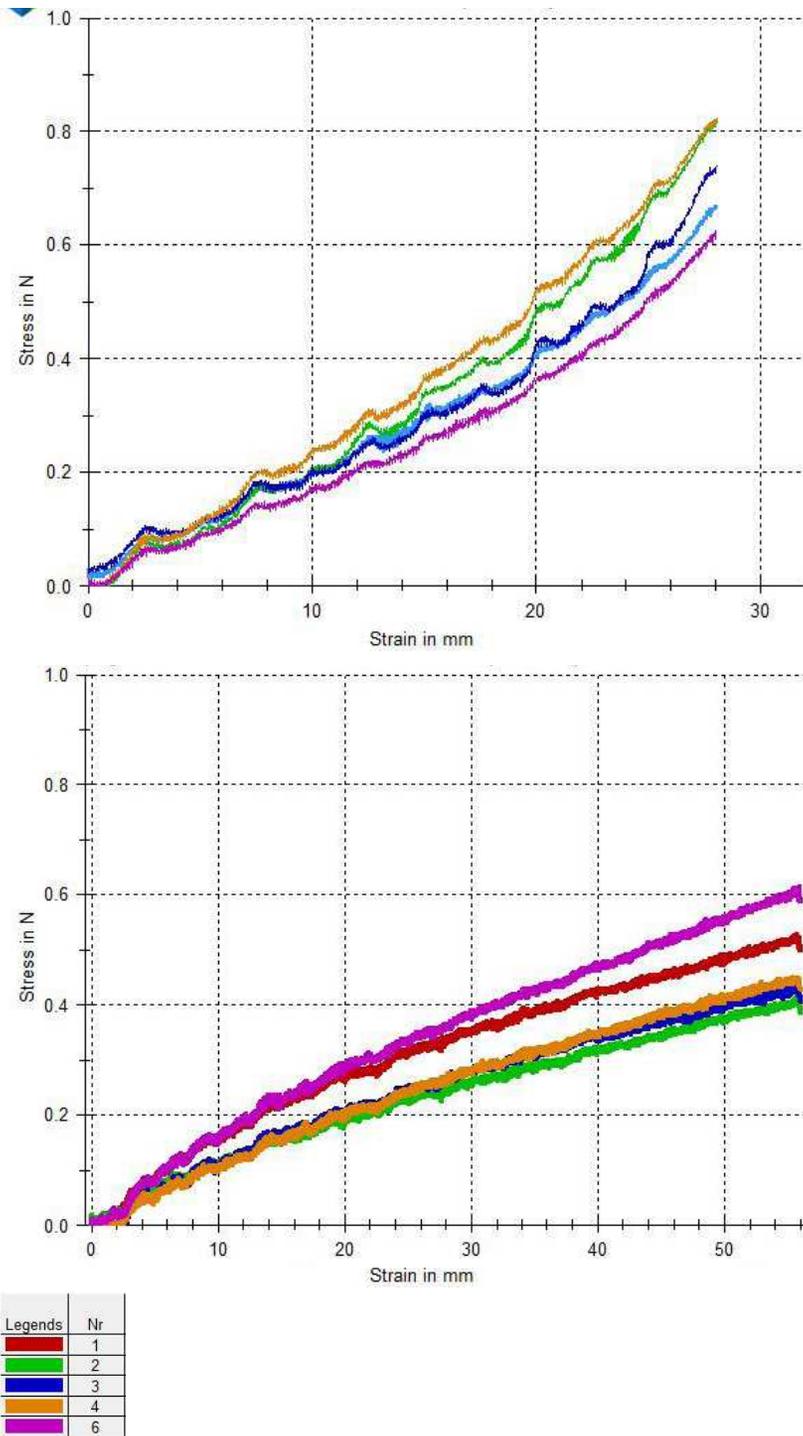


Fig. 5.16 | Risultati della prova di piegatura: in alto il test di apertura, in basso il test di chiusura

## 5.5 La realizzazione dei sistemi di giunzione

Una delle lavorazioni principali nel processo di impiego del materiale KREO per la formazione di un componente architettonico è la giunzione di più parti, per realizzare elementi di grandi dimensioni o per ottenere tasche per l'inserimento di altri materiali. Pertanto sono state messe a punto e testate due tecnologie differenti.

### Giunzione saldata

Le saldature sui campioni sono state eseguite seguendo la metodologia descritta nel paragrafo 4.1.5. La caratterizzazione è stata eseguita eseguendo due tipi di test (Single-lap joint shear test e T-peel test) che hanno presupposto due modalità differenti di preparazione delle provette.

La saldatura per il Single-lap joint shear test è stata eseguita ponendo entrambi i lembi da saldare sotto la pressa, ma isolando con carta le parti esterne alla saldatura, per non causarne la fusione.

La saldatura per il T-peel test, invece, è stata eseguita inserendo sotto la pressa solo la porzione di provini da saldare.

### Giunzione cucita

Nel caso specifico sono stati realizzati alcuni prototipi di giunzioni cucite con filo in poliestere dell' American&Efid (SunStop T-135 bonded) con una doppia cucitura a macchina semplice. Tali cuciture sono state realizzate presso lo stabilimento Stiltenda di Giarre (CT), azienda operante nel settore della realizzazione di sistemi d'ombreggiamento per edifici e per spazi aperti, e sono quelle utilizzate per la giunzione delle tende da sole.

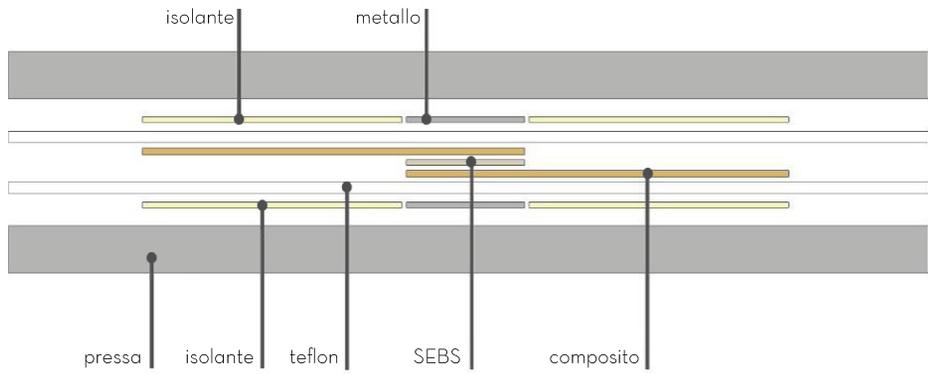


Fig. 5.17 | Schema di realizzazione della giunzione per il Single-lap joint shear test

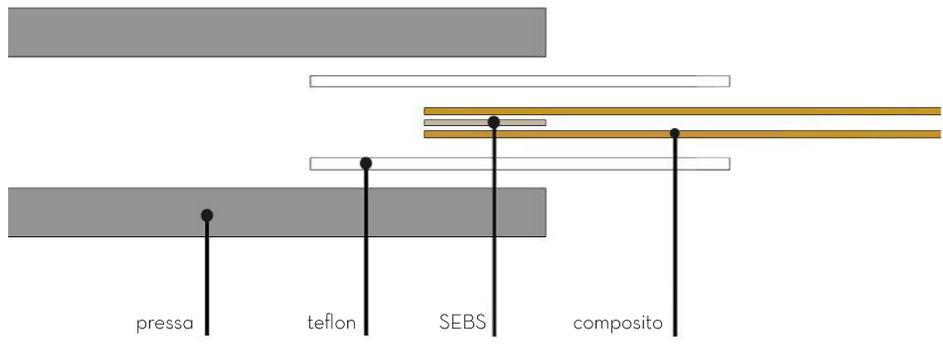


Fig. 5.18 | Schema di realizzazione della giunzione per il T-peel test

## 5.6 Caratterizzazione meccanica dei sistemi di giunzione

Un test preliminare è stato condotto sulla giunzione saldata, sottoponendo due provini al Single-lap joint shear test ed al T-peel test, che rappresentano, come detto, le due condizioni estreme cui può essere sottoposta una saldatura.

Questo test preliminare ha mostrato che nel T-peel test (grafico verde) il diagramma ha un punto di massimo (tra 100 e 150 N) dopo il quale il provino inizia a “pelarsi”, sopportando valori pressoché costante di sforzo con deformazioni legate alla dimensione della saldatura stessa. Più sarà lunga la saldatura, tanto più estesa sarà l'area sottesa al diagramma.

Il Single-lap joint shear test mostra un totale ripristino di resistenza della saldatura, con la rottura al di fuori della saldatura stessa. In questo caso è quindi il materiale stesso a rompersi prima della saldatura.

Questi test preliminari hanno mostrato come il T-peel test sia molto più severo rispetto al Single-lap joint shear test che, di contro, darebbe come risultati la già testata resistenza a trazione del materiale. Si è deciso pertanto di sottoporre al T-peel test entrambi i materiali e entrambe le modalità di giunzione seguendo le modalità già descritte della normativa UNI EN 12814-4 del 2003: “Prove di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico: Prova di pelatura”.

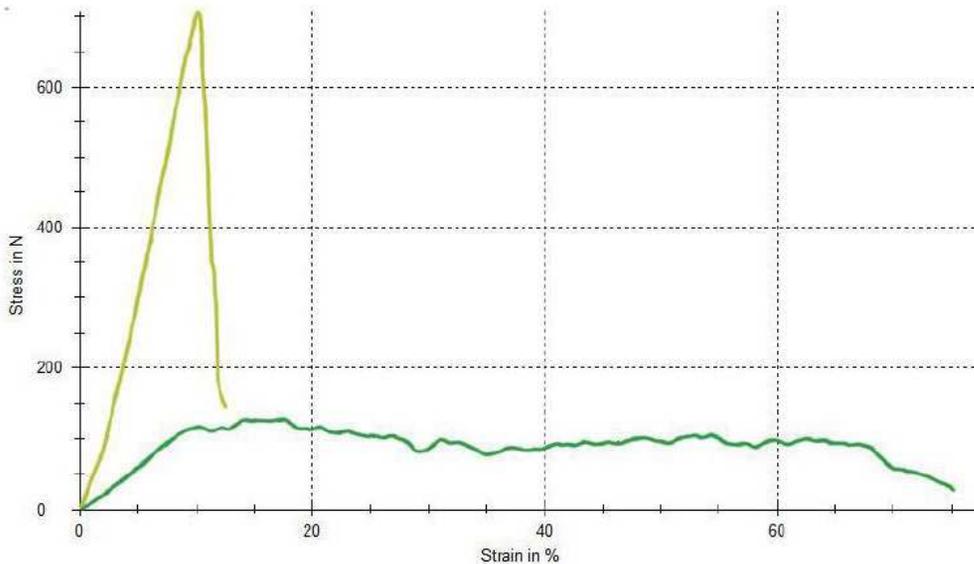


Fig. 5.19 | Diagramma sforzo-deformazione di una provetta sottoposta al Single-lap joint shear test (in giallo) ed al T-peel test (in verde)



Fig. 5.20 | Provetta di SEBS-Biotex sottoposta a Single-lap joint shear test



Fig. 5.21 | Provetta di SEBS-Biotex sottoposta a T-peel test

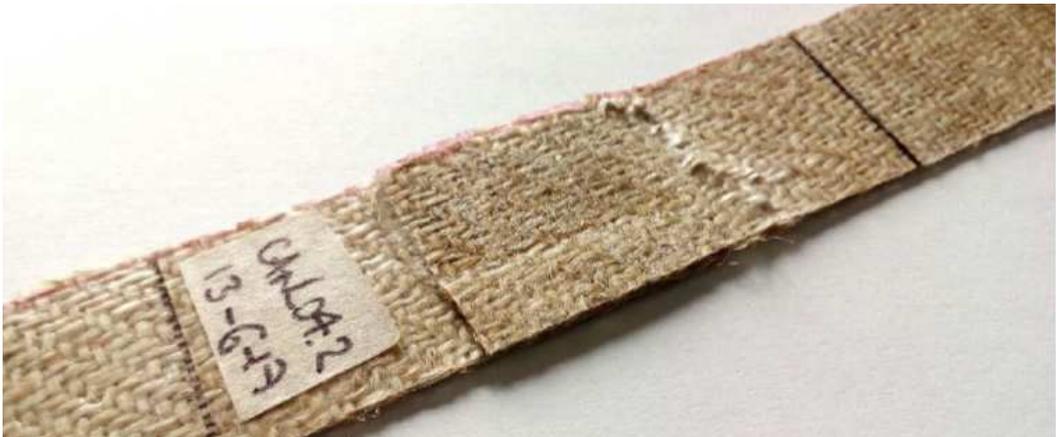


Fig. 5.22 | Rottura di una provetta di SEBS-Biotex sottoposta a Single-lap joint shear test

## Test saldatura SEBS-Biotex

### Test results:

Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm	Mod E MPa
	1	can sal 01	0.9	50	13.75	113	241	<b>17.55</b>	43.4	85.6	21794.51	140
	17	can sal 03	1	50	50.00	204	245	<b>4.89</b>	22.4	77.0	20277.25	48.4
	20	can sal 04	1	50	50.00	170	170	<b>3.40</b>	11.4	-	-	54.5
	19	can sal 05	1	50	50.00	156	156	<b>3.12</b>	6.0	-	-	47.2
	21	can sal 06	1	50	50.00	204	204	<b>4.08</b>	11.1	-	-	28.1
	18	can sal 07	1	50	50.00	247	272	<b>5.45</b>	25.6	-	-	36.8

### Series graph:

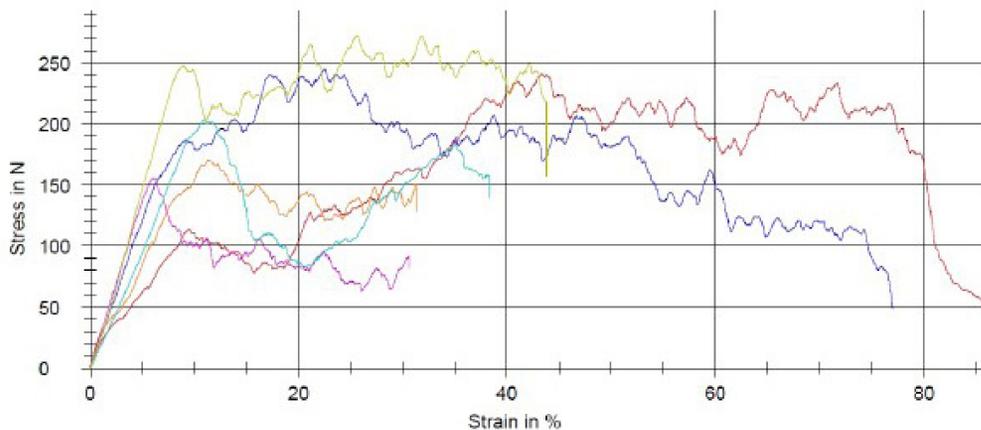


Fig. 5.23 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione saldata SEBS-Biotex

La resistenza alla pelatura da normativa è la media aritmetica dei valori della forza  $F_w$  divisa per la larghezza del provino  $b$  ed in questo caso vale:

$$R_l = \frac{(113 + 204 + 170 + 156 + 204 + 247)/6}{50} = \frac{182.3}{50} = 3.65 \text{ [N/mm]}$$

Sono stati considerati come valori della forza quelli che hanno innescato la rottura della giunzione e non quelli massimi supportati, che mostrano forte variabilità e dipendenza dalla lunghezza della saldatura stessa. I risultati ottenuti mostrano una scarsa uniformità. Ciò è legato probabilmente alla metodologia scelta per la realizzazione della saldatura. Infatti, come mostrato negli schemi di realizzazione delle giunzioni, le porzioni di campione ed il SEBS aggiuntivo sono stati inseriti nel bordo della pressa per non causare l'intera fusione del campione. Ciò ha probabilmente comportato una fusione non costante, generando saldature differenti nei vari campioni realizzati.

## Test saldatura SEBS-Carbonio

### Test results:

Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm	Mod E MPa
	2	car sal 01	0.6	50	13.75	134	134	9.76	6.6	32.2	2903.73	56.0
	22	car sal 03	0.8	50	40.00	65.0	98.2	2.45	5.8	-	-	57.9
	26	car sal 04	0.6	50	30.00	56.5	56.5	1.88	2.2	-	-	137
	25	car sal 05	0.6	50	30.00	78.2	78.2	2.61	4.5	-	-	52.6
	24	car sal 06	0.7	50	35.00	101	105	3.00	8.1	-	-	40.9

### Series graph:

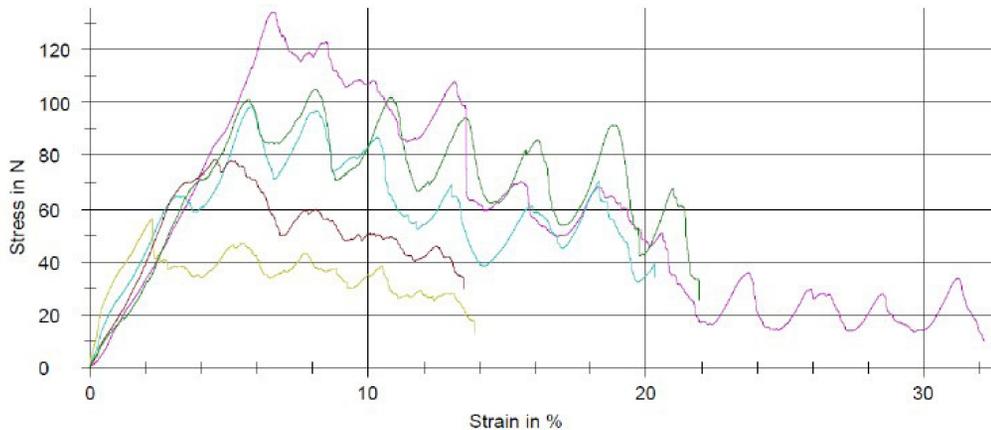


Fig. 5.24 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione saldata SEBS-Carbonio

In questo caso la resistenza alla pelatura vale:

$$R_1 = \frac{(134 + 65 + 56.5 + 78.2 + 101)/5}{50} = \frac{86.9}{50} = 1.74 \text{ [N/mm]}$$

Anche in questo caso c'è una variabilità consistente di risultati legati alla metodologia di saldatura. Una differenza importante rispetto al caso precedente è rappresentato dalla sollecitazione massima raggiunta, che coincide sostanzialmente con quella alla rottura. Ciò dopo la rottura la saldatura ha una resistenza, seppur fluttuante, sostanzialmente decrescente.

La saldatura dei provini SEBS-Carbonio non ha la tenacità di quella dei provini SEBS-Biotex come evidenziato dal diagramma seguente che mostra la sovrapposizione dei risultati fin qui ottenuti.

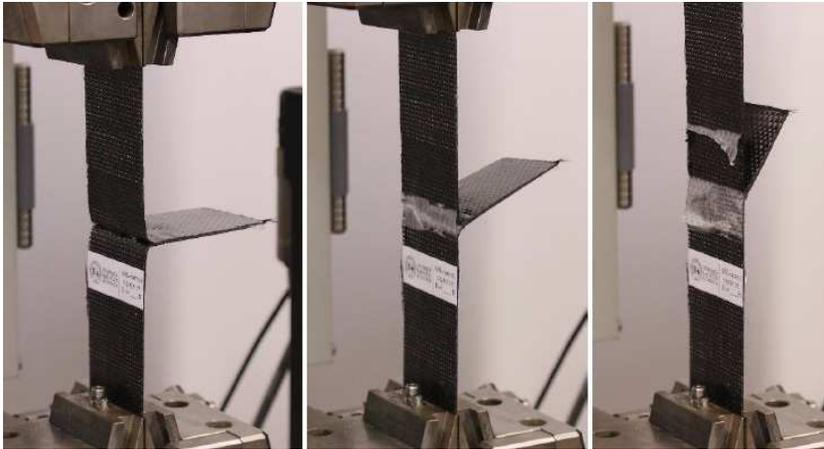


Fig. 5.25 | T-peel test sulla giunzione saldata SEBS-Carbonio

### Series graph:

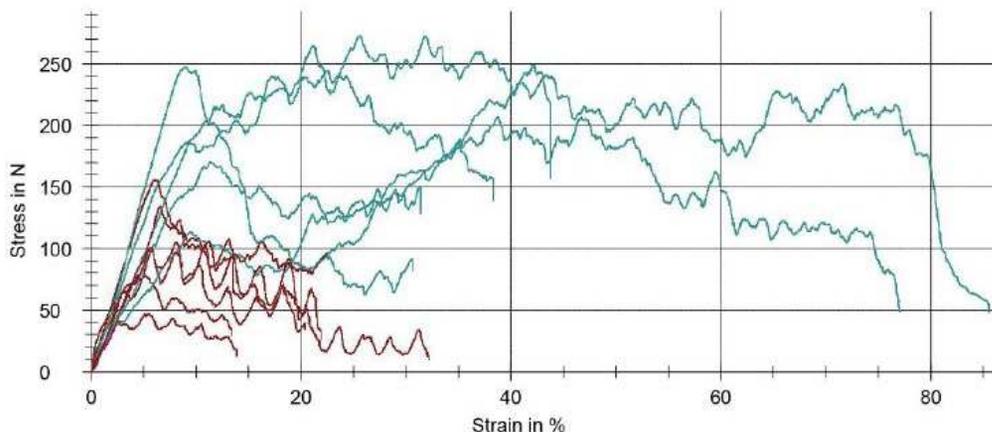


Fig. 5.26 | Sovrapposizione diagrammi sforzo-deformazione, T-peel test giunzioni saldate SEBS-Biotex (verde) e SEBS-Carbonio (rosso)

Questo è il risultato di quanto viene evidenziato anche dalle immagini della prova. Nel materiale composito SEBS-Carbonio si crea una scadente interfaccia tra la matrice ed il rinforzo e pertanto, quando sottoposti a T-peel test, si “scollano” senza riuscire a lavorare come un unico materiale. Ciò evidenzia come sarebbe assolutamente necessario un pretrattamento del tessuto in fibre di carbonio per poter creare una migliore interfaccia con il materiale termoplastico.

Sui campioni cuciti è stata applicata la normativa UNI EN 12814-4 del 2003. Essa, anche se non valida per giunzioni saldate, ha però rappresentato un valido strumento per sottoporre i due tipi di giunzione ad una sessa prova e confrontarne i risultati.

**Test results:**

Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm	Mod E MPa
	5	C-can-01	1	50	50.00	1010	1010	<b>20.28</b>	13.1	20.2	13205.02	32.1
	6	C-can-02	0.9	50	45.00	985	985	<b>21.88</b>	11.6	14.4	10446.52	85.3
	7	C-can-03	0.9	50	45.00	857	857	<b>19.03</b>	9.7	11.3	6755.06	72.5
	8	C-can-04	0.9	50	45.00	659	659	<b>14.64</b>	8.5	10.4	5181.62	108
	9	C-can-05	0.9	50	45.00	959	959	<b>21.32</b>	13.8	17.0	11487.84	31.7
	10	C-can-06	0.9	50	45.00	752	752	<b>16.70</b>	10.8	12.9	6649.12	30.7

**Series graph:**

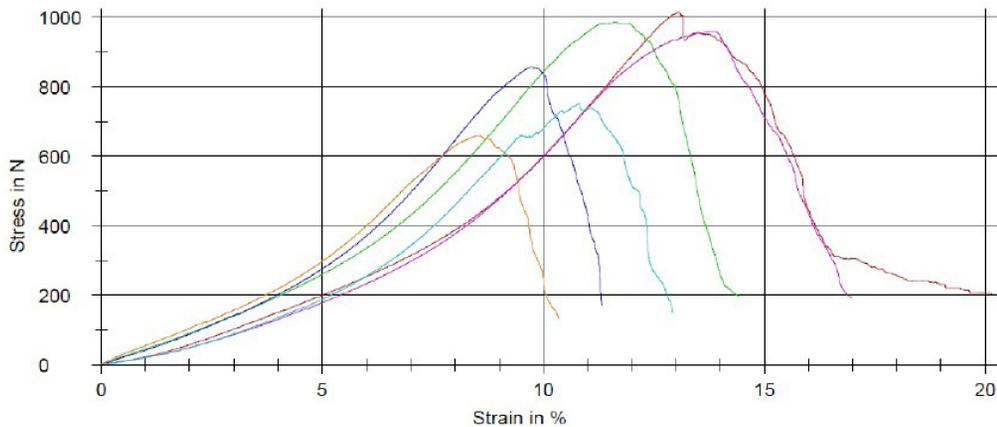


Fig. 5.27 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione cucita SEBS-Biotex

La resistenza alla pelatura vale:

$$R_1 = \frac{(1010 + 985 + 857 + 659 + 959 + 752)/6}{50} = \frac{870.3}{50} = 17.41 [N/mm]$$

In questi test, come evidenziato dalle foto, la rottura avviene non per cedimento del sistema di giunzione (la cucitura non si altera) ma per rottura delle fibre di canapa in prossimità della cucitura. Questo è sintomo anche di una maggiore resistenza della giunzione cucita rispetto a quella saldata, come avvalorato anche dai diagrammi in cui lo sforzo massimo supportato è 5-6 volte maggiore rispetto alla saldatura. Anche il tipo di rottura è molto differente: si raggiunge un picco di sforzo e poi si ha una drastica riduzione. Rimane una certa variabilità dei dati che va forse imputata alla artigianalità della cucitura, sebbene realizzata da un tecnico del settore, o alla variabilità dell'interfaccia che può venirsi a creare tra tessuto e cucitura (rottura di fibre o integrazione nella trama).

## Test cucitura SEBS-Carbonio

### Test results:

Legends	Nr	Type	a mm	b mm	A <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	σ <sub>Y</sub> N	F <sub>M</sub> N	σ <sub>M</sub> N/mm <sup>2</sup>	ε <sub>M</sub> %	ε <sub>B</sub> %	W <sub>B</sub> Nmm	Mod E MPa
	11	C-car-01	0.6	50	30.00	363	363	<b>12.10</b>	8.7	13.1	4880.01	114
	12	C-car-02	0.5	50	25.00	351	351	<b>14.03</b>	5.7	11.1	3812.86	140
	13	C-car-03	0.6	50	30.00	317	317	<b>10.56</b>	5.2	9.2	2958.75	154
	14	C-car-04	0.7	50	35.00	329	329	<b>9.40</b>	6.7	14.1	4770.53	87.1
	15	C-car-05	0.7	50	35.00	415	415	<b>11.84</b>	8.5	12.7	5123.43	63.7
	16	C-car-06	0.7	50	35.00	272	280	<b>8.00</b>	6.8	11.7	3243.00	93.8

### Series graph:

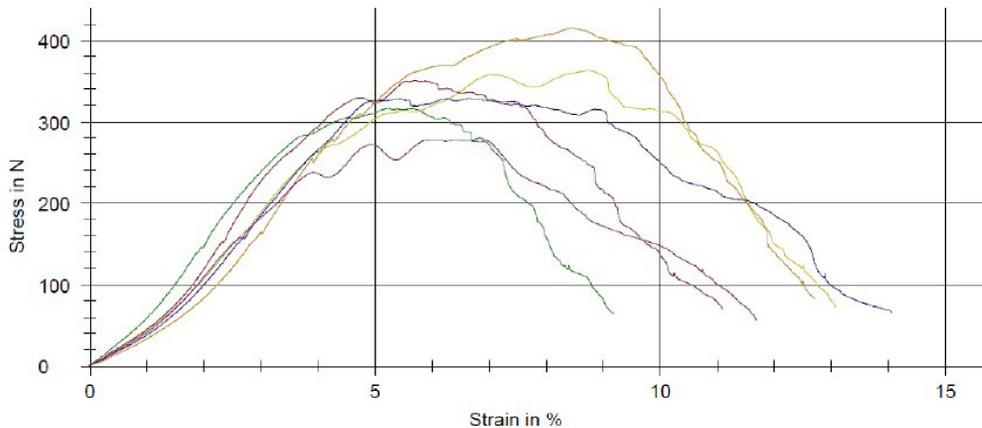


Fig. 5.28 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione cucitura SEBS-Carbonio

La resistenza alla pelatura vale:

$$R_1 = \frac{(363 + 351 + 317 + 329 + 415 + 272)/6}{50} = \frac{341.2}{50} = 6.82 \text{ [N/mm]}$$

Nel caso del composito SEBS-Carbonio-gli effetti della cucitura sono sicuramente migliori della saldatura, ma non si riesce comunque ad arrivare ai valori del composito SEBS-Biotex. La foto nella pagina precedente avvalorava quanto già evidenziato con la prova sulla saldatura sull'interfaccia tra i due materiali: le fibre di carbonio scivolano via dalla matrice in SEBS mostrando una scarsa compenetrazione. Anche le cuciture non riescono a bloccare in maniera significativa il carbonio, tanto che il valore massimo del diagramma è associato non a rottura delle fibre, ma a scivolamento della cucitura. Anche questo test mostra come un pre-trattamento delle fibre di carbonio sia necessario e, nello stesso tempo, potrebbe migliorare il sistema di giunzione un differente sistema di cucitura, più fitto, che imbrigli meglio le fibre di Carbonio.



Fig. 5.29 | T-peel test sulla giunzione cucita SEBS-Biotex

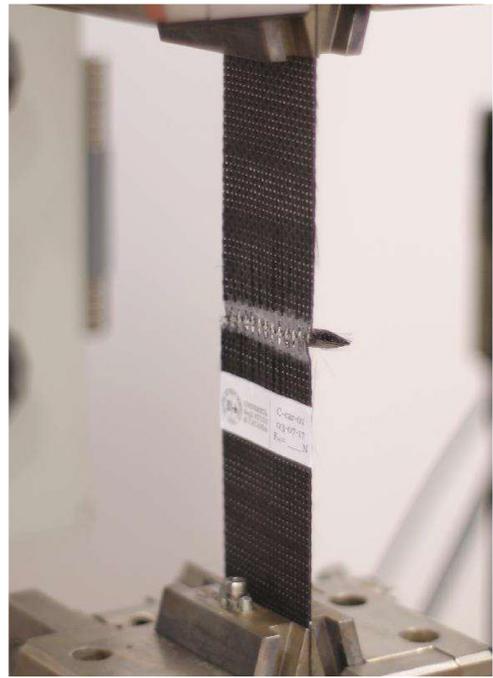
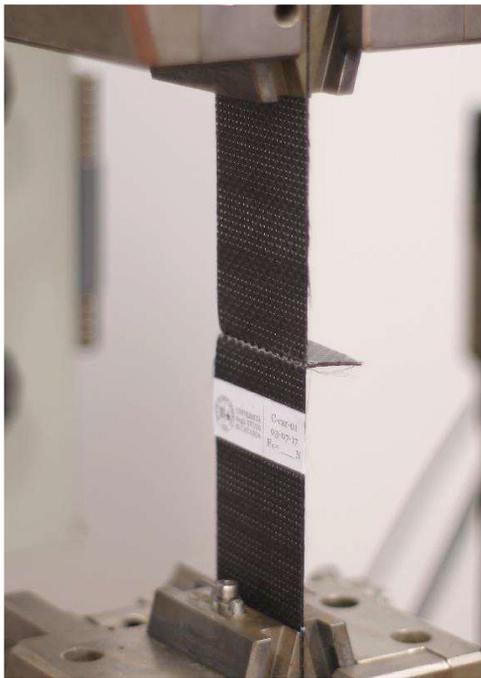


Fig. 5.30 | T-peel test sulla giunzione cucita SEBS-Carbonio

### Series graph:

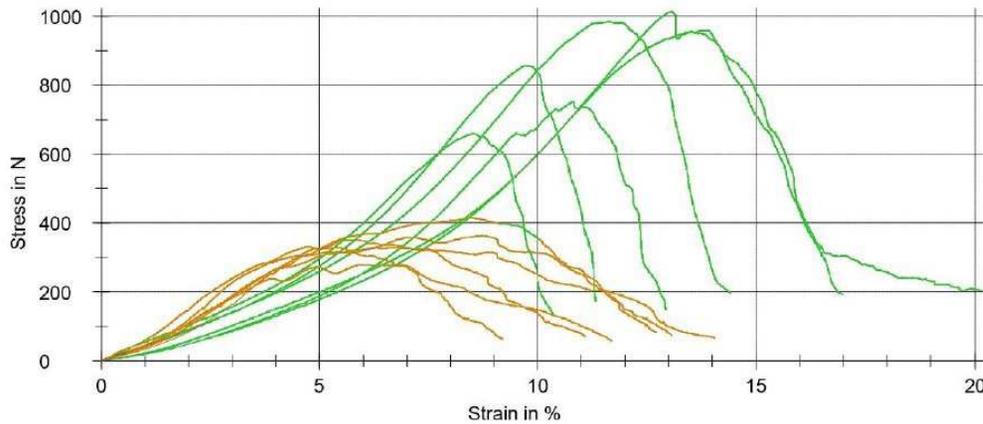


Fig. 5.31 | Sovrapposizione diagrammi sforzo-deformazione, T-peel test giunzioni cucite SEBS-Biotex (verde) e SEBS-Carbonio (arancione)

La sovrapposizione dei diagrammi dei test sulle giunzioni cucite dei due materiali mostra chiaramente come il-SEBS-Biotex (verde) abbia una rottura netta, mentre nel SEBS\_Carbonio-(arancione) si evidenzia uno scivolamento delle fibre, senza una rottura netta.

Riassumendo i valori ottenuti dai test sulle giunzioni si ha:

RISULTATI TEST SULLE GIUNZIONI		
Compositi	Saldatura [N/mm]	Cucitura [N/mm]
Biotex-SEBS	3.65	17.41
Carbonio-SEBS	1.74	6.82

Tab. 5.4| Quadro riepilogativo dei risultati dei T-peel test eseguiti sulle giunzioni

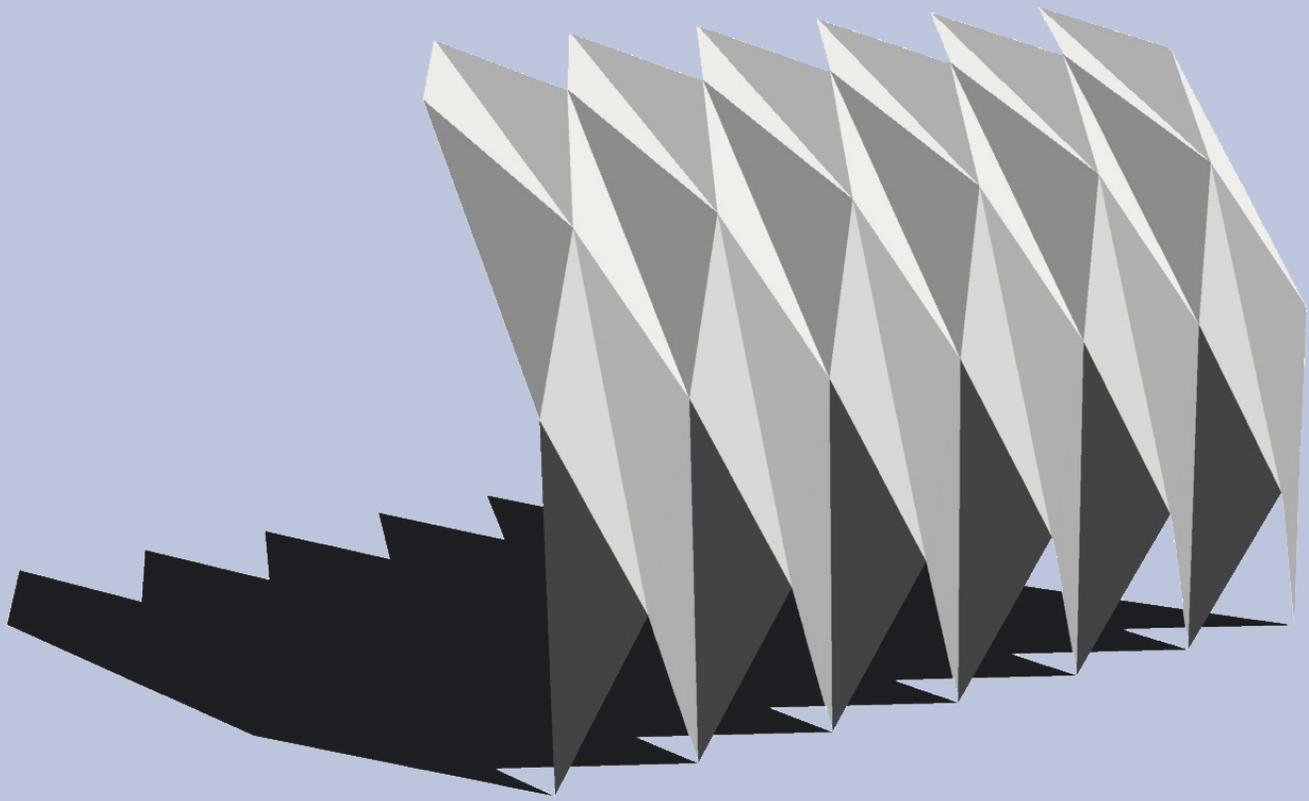
## 5.7 Gli errori di misura

Nei test di caratterizzazione dei materiali eseguiti nella presente ricerca deve essere tenuto in considerazione l'errore di misura commesso durante le prove. Tralasciando gli errori sistematici derivanti ad esempio dalla calibrazione o dalla precisione dello strumento utilizzato, possiamo valutare la possibile presenza di errori casuali.

Per le prove di trazione monoassiale l'errore casuale più rilevante può risultare il non perfetto posizionamento della provetta. La mancata verticalità di questa genererebbe dei valori alterati di resistenza a trazione dovuti alla presenza di un angolo differente rispetto a quello previsto tra la direzione della sollecitazione e la direzione delle fibre del composito.

La sostanziale convergenza dei risultati mostra come la posa attenta della provetta nel macchinario di prova sia stata sufficiente ad evitare tali errori.

Gli errori casuali svolgono invece un ruolo determinante soprattutto nel caso delle prove meccaniche sui sistemi di giunzione. In tali prove non costituisce errore solo un possibile disallineamento del provino che, come visto, può essere controllato, ma risulta determinante la giacitura della giunzione stessa. In condizioni ideali, per il tipo di prova previsto, la linea di giunzione deve essere ortogonale all'azione di trazione. Nelle realizzazioni dei sistemi di giunzione ciò risulta plausibile per le giunzioni cucite, ma molto difficile da assicurare nelle giunzioni saldate. Realizzando infatti la saldatura in maniera artigianale come descritto nel paragrafo 5.5 risulta molto complicato assicurare l'ortogonalità della linea di giunzione. Ciò è facilmente evidenziabile nei risultati visti, dove la variabilità dei dati estrapolati dalle prove meccaniche sulle giunzioni saldate testimonia una percentuale consistente di errori casuali ascrivibile a quanto detto.



## 6 VALIDAZIONE DELLA METODOLOGIA

### 6.1 Caso studio

La ricerca prevede il caso studio come strumento per validare il *workflow* progettato. Tale caso studio si articola nel progetto di una superficie adattiva ad origami per il miglioramento del comfort termico di un'area aperta antistante un sito archeologico.

Il patrimonio culturale europeo costituisce un bacino di ricchezza determinante non solo per sedimentare il carattere identitario delle comunità, ma anche per il ruolo di forza trainante del settore culturale, ricreativo e turistico. L'importanza della doppia valenza, sociale ed economica, della salvaguardia e della valorizzazione di tali beni è testimoniata dalla mole di finanziamenti che i programmi per la ricerca e l'innovazione Horizon 2020 e Interreg hanno indirizzato ad interventi che riguardano questo tema. In particolare la relazione tra salvaguardia del patrimonio esistente e sviluppo economico risulta effettiva quando, oltre alla protezione del bene, se ne assicurano la fruizione, la comunicazione e la promozione attraverso una efficiente attività di management.

Nel caso specifico dei beni archeologici l'intervento può innescare il rilancio culturale e turistico dell'intera area soprattutto se essi sono situati in prossimità di centri urbani minori. La riqualificazione di un sito archeologico risponde a tre esigenze principali (Militello, 2010):

- la protezione dei resti materiali;
- la sistemazione del sito per i potenziali operatori e visitatori;
- la comunicazione per incentivare la fruizione dei luoghi.

Un fattore rilevante per il conseguimento del risultato è la copertura del sito, che spesso risulta indispensabile per la salvaguardia materiale dei reperti dall'azione degli agenti atmosferici. Infatti il loro apporto migliora il comfort dei luoghi ai fini turistici ed ha la capacità di agevolare l'interpretazione dei resti da parte dei fruitori (attraverso la creazione di nuove spazialità, percorsi ed illuminazione).

Per quanto detto, l'importanza del progetto di copertura di un sito travalica la mera salvaguardia, motivo per cui su questo tema, nel corso degli ultimi anni, si è ampiamente dibattuto.

L'analisi del caso studio mira a ottimizzare KREO proprio per la copertura di aree archeologiche sia per la fruizione che per la protezione durante le fasi di scavo.

Le realizzazioni attuali mostrano spesso caratteri eccessivamente invasivi, quando non addirittura nocivi, alterando profondamente la

percezione spaziale del bene.

La copertura delle aree archeologiche ha il fine di innalzare il livello di salvaguardia del patrimonio e di incrementare la fruizione turistica, garantendo migliori condizioni di comfort (a tal proposito si vedano le Carte del Rischio dell'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro).



Figura 6.1 | Case terrazzate, Efeso, Turchia.

## 6.2 Stato dell'arte: le coperture dei siti archeologici

### 6.2.1 Analisi tipologica

L'analisi tipologica dei dispositivi di copertura è stata più volte impostata dai diversi studiosi che sono intervenuti sul tema, da Franco Minissi a Giorgio Gullini. Di particolare interesse risultano quelle che analizzano la configurazione del sistema di copertura (Ruggieri Tricoli, 2007).

In esse vengono distinte:

- tettoie semplici;
- strutture parzialmente chiuse;
- edifici interamente chiusi.

La configurazione della copertura entra però in stretto dialogo con il contesto. Secondo quest'ottica possono distinguersi coperture che hanno (Militello, 2010):

- nessuna relazione con le rovine;
- una relazione simbolica con i monumenti o con il contesto;
- l'aspirazione di ricreare i volumi originari del monumento.

### 6.2.2 Requisiti prestazionali

Il progetto di una copertura mira a conciliare esigenze legate sia alla conservazione che alla fruizione, anche se il soddisfacimento di entrambe le categorie sembra utopico (Santoro e Santopuoli, 2000); il tipo di utenti peraltro risulta molto differenziato (turisti, archeologi, restauratori, ...). Tradizionalmente si distinguono le strutture temporanee, pensate per la protezione dei reperti ed il miglioramento del confort degli archeologi, e quelle permanenti, nelle quali oltre la salvaguardia del monumento si pone l'attenzione su fruizione e comunicazione per i visitatori.

Il campo dei requisiti per soddisfare tali esigenze risulta quindi piuttosto variegato. Quello principale è sicuramente la protezione dei reperti dai rischi naturali ed antropici: in particolare la protezione dalla pioggia, dal vento, dalla radiazione solare diretta, la stabilizzazione del microclima interno, nonché la protezione da atti vandalici. Le coperture temporanee per le fasi di scavo devono presentare inoltre: facilità di montaggio, anche da parte di manodopera non qualificata; adattabilità all'evolversi dell'area di scavo; flessibilità, soprattutto nel posizionamento dei punti di appoggio; economicità, grazie alla possibilità di reimpiego. Le strutture permanenti devono garantire: ridot-

ta invasività; completa reversibilità; possibilità di adattamento ad un eventuale progresso della campagna di scavo; ottimizzazione dell'illuminazione naturale; facilitazione della fruizione e comprensione del sito per il visitatore.

Il requisito più importante rimane però la protezione dal degrado del sito e dei reperti in esso presenti in quanto gli oggetti che per secoli o millenni sono stati sotto lo strato protettivo del terreno si ritrovano improvvisamente esposti alle intemperie.

Il progetto delle coperture è quindi specifico per ogni sito, in relazione al tipo ed alla consistenza materica dei reperti, del tipo di clima, dell'esposizione, del carico turistico, ... Ad oggi risultano inoltre imprescindibili, per garantire il risultato del progetto, sistemi di monitoraggio costanti della temperatura e dell'umidità dell'aria, dei livelli di inquinamento, della temperatura superficiale di pitture, mosaici o affreschi. Risultano particolarmente efficienti anche sistemi di controllo attivi delle condizioni termo-igrometriche, capaci di incentivare la ventilazione o calibrare la radiazione solare in maniera automatizzata, agendo sulla configurazione della copertura, in risposta agli input provenienti dai sistemi di monitoraggio.

Per quanto detto, per preservare lo stato di conservazione dei beni si è resa necessaria una valutazione sistematica sull'effettiva efficacia delle coperture esistenti in Italia da parte dell'Istituto Centrale del Restauro (ICR) e dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), implementando il progetto "Carta del Rischio" (Ferroni & Cacace, 2010). In esso viene valutato il livello di rischio a cui sono sottoposti i beni, attraverso una scheda in cui sono valutati i singoli elementi del manufatto (piano di tenuta all'acqua, strato portante, sistema di supporto, fondazione) secondo due indicatori: efficienza tecnico-costruttiva (indipendentemente dal rapporto con il contesto) e funzionalità e adeguatezza (in relazione al bene archeologico). A ciascuno dei due indicatori viene associato un terzo indicatore di attendibilità, legato all'effettiva conoscenza delle informazioni. L'output è sintetizzato in un unico indicatore di valutazione complessiva della copertura.

### 6.2.3 Analisi tecnologica e materiali impiegati

Dall'analisi delle schede emerge che un ruolo primario è svolto dai materiali e dalle tecnologie impiegate. Questi in genere sono scelti in funzione delle prestazioni richieste, pur rimanendo costanti i requisiti di salvaguardia dei beni, in termini di protezione dagli agenti atmosferici, e di ridotta invasività; quest'ultima è tradotta in un attento controllo dei punti di appoggio e di completa reversibilità dell'intervento realizzato. D'altro canto va rilevato che le coperture temporanee, malgrado frutto di una progettazione con scarsa attenzione morfologica, finiscono spesso per rimanere in sito diversi anni, a causa delle difficoltà di reperire fondi per interventi successivi, mentre, dall'altro lato, si intensifica la richiesta di rendere fruibili i siti anche durante le campagne di scavo per l'appeal turistico e culturale che possono avere, oltre alla possibilità di funzione didattica.

Le recenti esperienze sull'uso di materiali trasparenti per l'involucro, hanno una influenza rilevante sulla produzione contemporanea di componenti edilizi leggeri. Infatti i pannelli trasparenti in polimetilmetacrilato (Plexiglass, Perspex, ...) o policarbonato largamente impiegati nel passato portano alla formazione di effetto serra con conseguente aumento delle temperature interne, dell'umidità relativa e della condensa. In alcuni casi la variazione del microclima, favorendo il proliferare di organismi infestanti, ha condotto a danni considerevoli sui reperti archeologici da proteggere. I rischi legati all'uso di materiali trasparenti possono verificarsi anche nei climi freddi, in cui in condizioni invernali la temperatura interna della superficie dell'involucro protettivo scende al di sotto del punto di rugiada, causando formazione di condensa (Cetin & Ipekoglu, 2012). Altre problematiche legate alla trasparenza riguardano la percezione visiva. Infatti l'eccesso di illuminazione può aumentare il riverbero, mentre la proiezione dell'ombra degli elementi portanti si sovrappone alle superfici da osservare. Ad oggi risultano preferibili soluzioni multistrato (Zanelli, 2015) come i tessuti tecnici, adottati ad esempio nelle Terrace Houses a Efeso in Turchia con una copertura a membrana in fibra di vetro rivestita da politetrafluoroetilene (PTFE) o la copertura del sito archeologico di Bibracte in Francia realizzata con un telo in fibre di polietilene rivestite in PVC.

La metodologia descritta nei paragrafi 4.2.4 e 4.2.5 è applicata ad uno specifico caso studio che serve per validare le ipotesi fatte. In ogni caso esso può essere applicato al caso generico senza modifiche sostanziali.

L'area mediterranea è una delle regioni più ricche di beni archeologici

al mondo e, con il passare del tempo, questi tendono a diventare una delle principali risorse economiche della regione, grazie allo sviluppo dell'economia turistica ad essi legato. Spesso però la fruizione di tali beni risulta difficoltosa nel periodo estivo e viene evitata dai turisti per le condizioni di forte stress termico. Il progetto di un dispositivo di schermatura per migliorare il comfort outdoor può aiutare ad allungare i periodi favorevoli per la visita dei siti estendendoli anche alle giornate più calde. Di contro però una struttura, per quanto leggera, a contatto con un bene culturale deve essere progettata con particolare attenzione alla relazione formale col bene ed al suo inserimento paesaggistico.

La grande versatilità dei componenti adattivi li rende applicabili per il progetto di strutture a contatto con beni archeologici o culturali in generale. Come mostra la dichiarazione ICOMOS 2014 questi ultimi hanno un ruolo primario per lo sviluppo delle comunità locali, poiché incoraggiano fortemente il turismo. Pensare solo alla salvaguardia dei beni, senza dare un impulso alla possibilità di migliorarne la fruizione, rischia di generare una perdita di attenzione della comunità verso il bene stesso. Per tale motivo l'esigenza di migliorare il comfort e la fruibilità dei beni risulta assai impellente.



Figura 6.2 | Sito archeologico di Bibracte, Saint-Léger-sous-Beuvray, Francia.

### 6.3 Il sito di progetto: localizzazione, clima e tempo metereologico

Il sito di progetto è un complesso archeologico portato alla luce nel 2008 nella zona a sud della Villa Romana del Casale. La Villa è, dal 1997, uno dei 49 siti UNESCO in Italia. È localizzato vicino Piazza Armerina una città nella Sicilia centrale (37° 23', 14° 22'), sui monti Erei a 697 m s.l.m. il sito archeologico si trova a circa 3 chilometri dai limiti del centro abitato in un'area agricola in lieve pendenza con rari edifici sparsi sul territorio. La costruzione principale è una *Villa* di epoca romana, probabilmente posseduta da un membro della classe senatoriale, costruita nel quarto secolo d.C. sia per scopo residenziale che produttivo. Si trovava infatti al centro di un ampio latifondo attraversato da un affluente del fiume Gela ed era composta da una serie di edifici (residenziali, amministrativi, terme, magazzini...). L'area di progetto si trova nella parte sud del complesso e comprende una fornace del XI-XII secolo e le seconde terme della *Villa*, dette "Terme sud", all'interno delle quali la stessa fornace fu inserita. L'edificio è composto da sette ambienti. Uno di essi era il *frigidarium*, pavimentato a mosaico con piccole tessere quadrate. Questa stanza era connessa ad ovest con una ampia vasca rettangolare ricoperta di *crustae* marmoree a nord con tre piccoli ambienti costituiti da una vasca centrale absidata, con rivestimento parietale musivo ad onde, e altri due ambienti rettangolari, uno dei quali possiede un pavimento a mosaico geometrico policromo con motivo centrale a due quadrati intrecciati. Gli altri ambienti sono da identificare con l'area riscaldata costituita da una piccola sala a sud absidata ugualmente con mosaico pavimentale, da un secondo ambiente a sudovest con anticamera, dotato di *tubuli* lungo le pareti e di *suspensurae* sotto il pavimento e di un altro ambiente absidato con vasca.



Fig. 6.3 | La città di Piazza Armerina è localizzata nel centro della Sicilia



Fig. 6.4 | Il sito archeologico inserito fra i siti patrimonio mondiale UNESCO

L'area scelta per posizionare il dispositivo di ombreggiamento è a sud-ovest dell'area scavata, in uno spazio libero da reperti, dal quale, guardando verso nord-est, è possibile osservare tutta l'area con i recenti scavi delle "Terme sud".

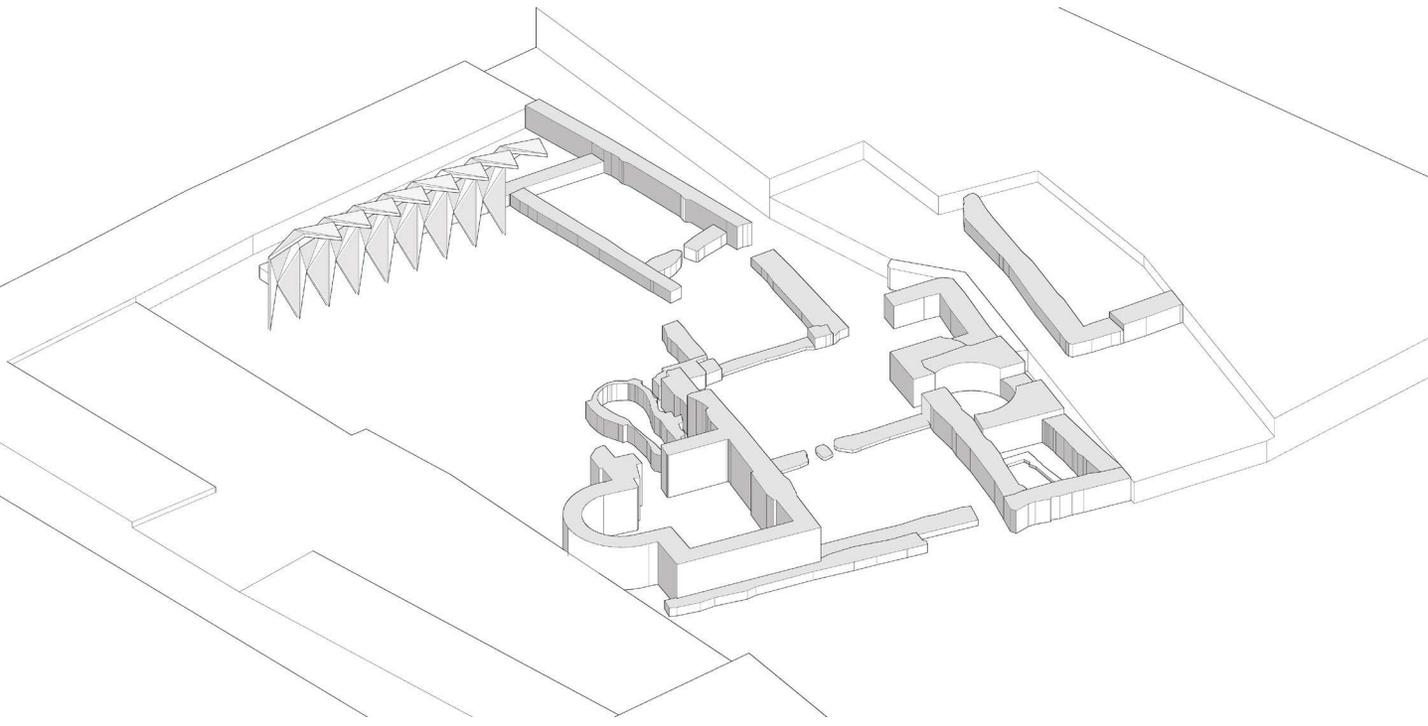
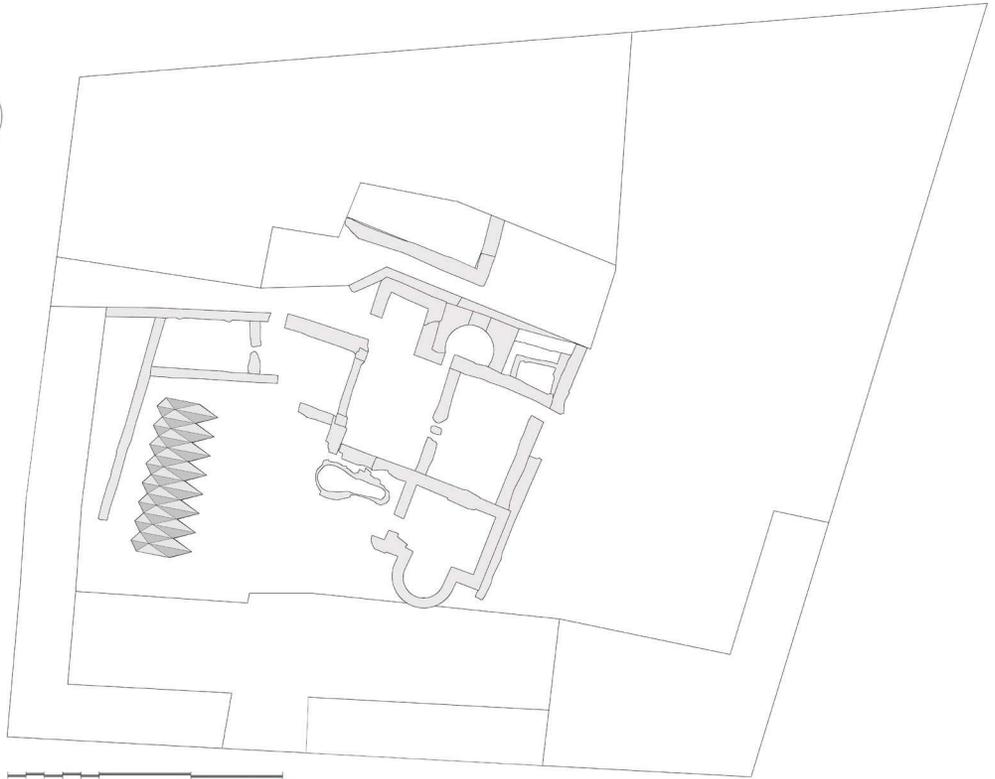
Piazza Armerina (37°23'N 14°22'E) ha un *Csa climate* (clima caldo temperato, con estati secche e calde e inverni miti e umidi) secondo la classificazione del clima Koppen-Geiger (Kottek et al, 2006). La temperatura media dell'aria è 15° C, con una variabilità annuale di 17.9° C dal mese più freddo (Gennaio, 6.8° C) al più caldo (Agosto, 24.7° C) secondo i dati raccolti dall' ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile). Le precipitazioni medie annuali sono di 453 mm, con un valore minimo a Luglio (7 mm) e valore massimo a Dicembre (70 mm). La rosa dei venti, tratta dal database del clima globale Meteonorm, mostra una prevalenza annuale del vettore Nord-Nordest ed una velocità media annuale di 3.77 m/s.

Per questa ricerca per valutare le condizioni termiche outdoor è stato calcolato il parametro UTCI. Esso è una quantità monodimensionale che sintetizza l'interazione con la temperatura ambientale (T), la velocità del vento (v), l'umidità relativa (RH) e il flusso di energia radiante attraverso onde lunghe e corte (g) (Bröde et al. 2010). I dati orari di g, T e RH per le analisi effettuate sono stati importati dal set di dati contenuto in Meteonorm per la città di Piazza Armerina ed essi sono stati realizzati con una interpolazione di tre stazioni meteorologiche (Catania, Gela ed Enna). Vista la piccola distanza da Piazza Armerina si è deciso di utilizzarli per le analisi del sito di progetto per giornate prive di nuvole. Inoltre la geometria del contesto, essendo costituito da un terreno agricolo in lieve pendenza con edifici sparsi, genera una ridotta influenza sui valori di g, T e RH. I dati relativi alla velocità del vento V non sono stati presi dal set di dati citato, perché la complessità della geometria ad origami e la notevole altezza a cui i dati relativi al vento sono registrati (10 m dal terreno) hanno indotto a scegliere di realizzare una simulazione CFD per calibrare il valore della velocità del vento allo specifico progetto.

Per le analisi è stato scelto il giorno più caldo dell'anno (21 Luglio) e le valutazioni della variazione dell'indice UTCI sono state realizzate su tre differenti orari (10, 14 e 18).



Fig. 6.5 | L'area archeologica delle "Terme Sud" si trova alla destra del visitatore che percorre la strada di accesso alla Villa del Casale



## 6.4 Il progetto architettonico e costruttivo del componente adattivo KREO

Le geometrie che maggiormente si adattano ai climi mediterranei con estati calde sono quelli che schermano dalla radiazione solare nelle ore pomeridiane. Per tale ragione lo *shelter* è stato progettato come una porzione di cilindro che protegge dalla radiazione solare proveniente da sud e da ovest, lasciando la vista aperta verso il sito archeologico ad est. Il pattern Yoshimura (Yoshimura, 1955), anche detto Diamond pattern, è uno dei più studiati ed utilizzati tipi di tassellazione di origami per geometrie cilindriche pieghevoli (Stavric & Wiltsche, 2013) ed è costituito da una ripetizione di elementi a forma di rombo piegati lungo una delle diagonali. La ripetizione di tali elementi, con le diagonali con pieghe di valle e i bordi dei rombi a costituire pieghe di monte, fornisce ad una superficie piana una configurazione cilindrica (Buri & Weinand, 2008). Seguendo il *workflow* stabilito, la geometria dello *shelter* è stata modellata con metodo parametrico permettendo di controllare e modificare in maniera interattiva non solo la geometria ma anche il movimento che esso è capace di esplicare grazie alla presenza delle pieghe sulla sua superficie.

Come detto, il modulo dello Yoshimura è un rombo piegato lungo la diagonale che in questo caso è posta ortogonalmente alla generatrice del cilindro, pertanto il modulo base considerato è il triangolo in cui il rombo viene diviso dalla diagonale-piega. La piega costituisce quindi uno dei lati del triangolo-modulo base e la distanza tra due diagonali-pieghe consecutive definisce il cinematismo complessivo del sistema. L'intera geometria può essere letta come ripetizione del modulo base e della sua geometria riflessa (altro triangolo in cui il rombo viene diviso dalla piega).

Per questa ricerca è stato considerato solo l'involucro del sistema di schermatura, che si è ipotizzato di realizzare con tecnologia KREO, lasciando a successivi studi l'approfondimento sullo scheletro portante, che dovrebbe essere composto da elementi leggeri posizionati lungo i bordi della tassellazione e che, proprio perché costituito da elementi leggeri e sottili, può essere trascurato per le analisi energetiche. Il modulo base triangolare ha lato maggiore (ossia la diagonale del rombo) di 250 cm, una altezza di 60 cm e viene ripetuto 16 volte lungo la generatrice del cilindro. Il progetto di questa superficie prevede solo due grandezze variabili legate al cinematismo perché i singoli tasselli sono considerati indeformabili e pertanto sono ammessi solo i loro movimenti rigidi. Le variabili sono la distanza tra le diagonali di due rombi successivi e l'angolo di rotazione dell'intera superficie sul piano

su cui essa giace. L'intervallo della distanza  $L$  tra due diagonali va da 70 cm a 120 cm, con incrementi successivi di 1 cm, con una lunghezza complessiva variabile da 560 cm a 960 cm. L'intervallo di rotazione  $\omega$  va da  $160^\circ$  a  $210^\circ$ , con incrementi successivi di  $1^\circ$ , avendo indicato con  $180^\circ$  l'origami dispiegato nella direzione nord-sud.

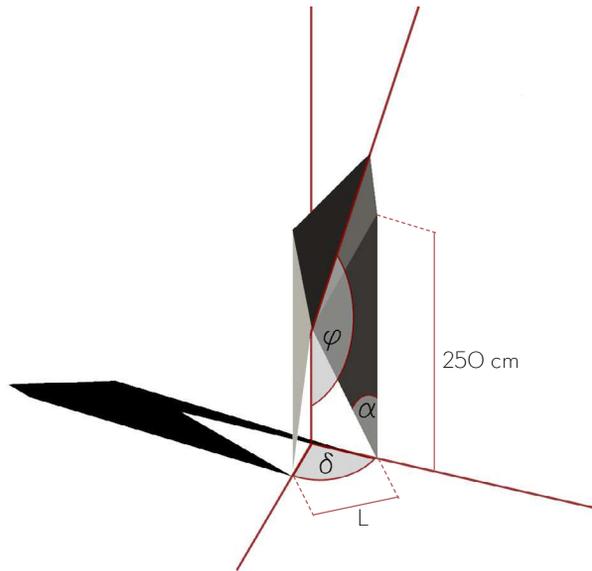


Fig. 6.7 | La distanza  $L$  è la variabile che determina l'apertura complessiva dell'origami;  $\alpha$  è l'angolo fisso legato alla geometria scelta;  $\delta$ , angolo di apertura, e  $\varphi$ , angolo di inflessione, sono univocamente determinati da  $\alpha$  e  $L$  (cfr algoritmo a pag 150)

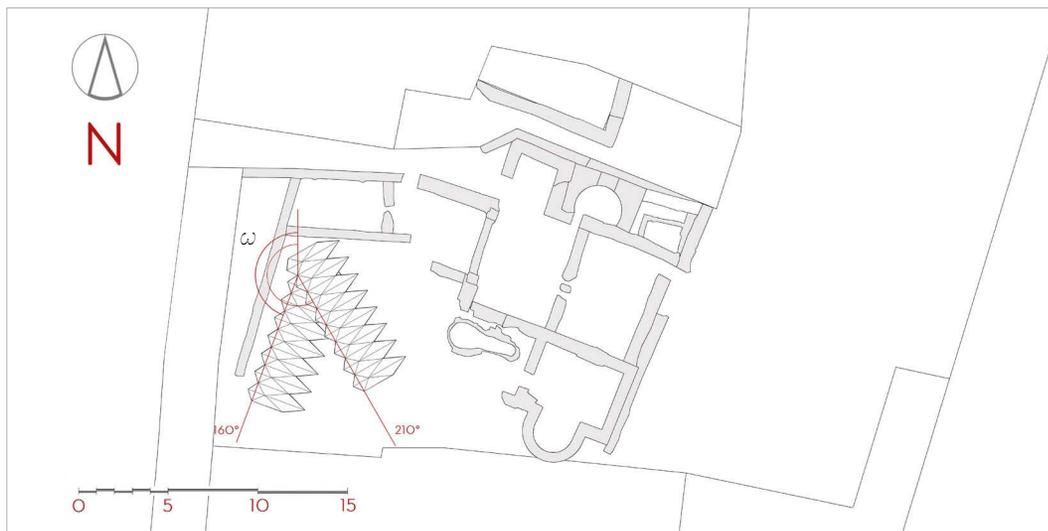


Fig. 6.8 | L'angolo di rotazione  $\omega$  ha intervallo compreso tra  $160^\circ$  e  $210^\circ$  avendo indicato con  $180^\circ$  l'origami dispiegato nella direzione nord-sud

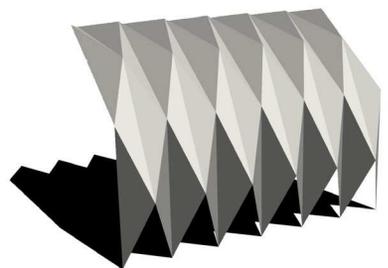
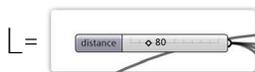
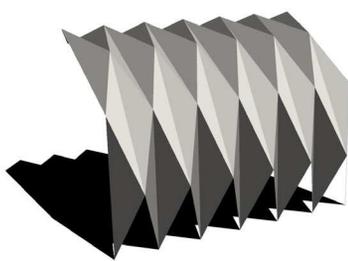
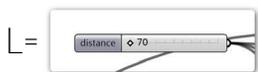
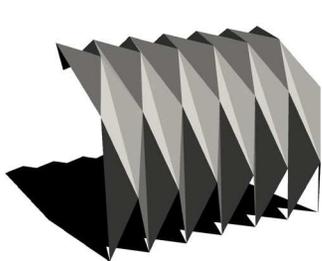
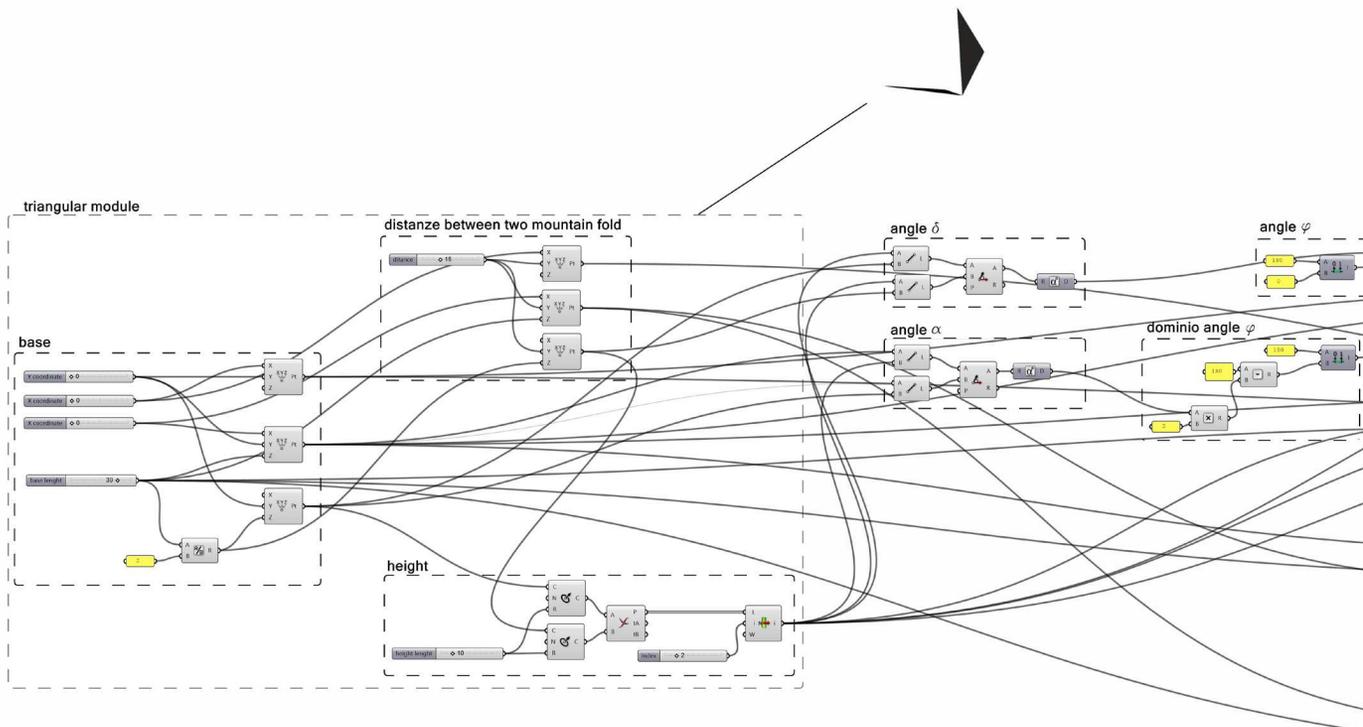
## 6.5 Il progetto della configurazione e del movimento per il comfort ambientale degli spazi aperti

### 6.5.1 Descrizione dell'obiettivo dell'ottimizzazione

L'obiettivo di questo studio è l'ottimizzazione della geometria sul comfort termico outdoor per il corpo umano. Per far ciò è stata simulata una mappa microclimatica rettangolare di 15x15 m (225 m<sup>2</sup>) posta ad una altezza di 1,1 m e sono stati calcolati i valori dell'indice UTCI per una serie di punti, individuati dalla griglia della mappa microclimatica. L'algoritmo di ottimizzazione impostato mira a minimizzare il valore della somma degli indici UTCI trovati per la mappa. Le possibili combinazioni dei due parametri variabili (51 opzioni di distanza tra diagonali e 51 opzioni di rotazione) sarebbero 2601. Inoltre ogni singola simulazione energetica impiega in media 5 minuti. Ciò significa che per valutare in maniera analitica ogni possibile configurazione che la superficie ad origami può assumere sarebbero state necessarie circa 215 ore. Per tale ragione si è ritenuto imprescindibile l'impiego di un algoritmo generativo nel *workflow* proposto. Sono stati impostati 3 diversi processi di ottimizzazione per tre differenti orari (10, 14, 18) del giorno più caldo dell'anno (21 Luglio), per poter calibrare i movimenti dell'origami sulle tre configurazioni così ottenute. I tre orari corrispondono alle ore in cui il sole ha la posizione descritta in tabella 6.1 e permettono di calibrare la geometria sulla radiazione solare incidente rispettivamente da est, sud ed ovest. Il movimento dell'origami, seguendo le tre configurazioni, garantisce di ottenere le migliori condizioni di comfort, per la data geometria di progetto. Il processo di ottimizzazione ha impiegato circa 50 ore, mostrando un chiaro risparmio di tempo rispetto alla valutazione delle singole combinazioni.

	Hours		
	10	14	18
SUN			
Azimuth	99.06°	216.53°	276.79°
Zenith	45.79°	69.66°	25.57°

Tab. 6.1 | Posizione del sole nelle ore selezionate per il processo di ottimizzazione





## 6.5.2 Benchmark

Come già anticipato, una soluzione statica di tipo tradizionale per un sistema di protezione dalla radiazione solare per il miglioramento del comfort esterno è una superficie piana orizzontale retta da quattro pilastri: il tradizionale gazebo ombreggiante. Per il progetto presentato esso rappresenta sicuramente un *benchmark* con cui confrontarsi per individuare i vantaggi che la tecnologia proposta può comportare.

È stata implementata la simulazione energetica di una superficie quadrata posta ad una altezza di tre metri con lato di 460 cm. La dimensione della superficie è stata scelta pari alla proiezione orizzontale dell'origami progettato, nella sua configurazione intermedia (distanza tra due basi successive di 95 cm).

La metodologia seguita per la simulazione energetica e le condizioni a contorno sono le stesse utilizzate per il componente cinetico, ovviamente a meno del processo di ottimizzazione, così da poter confrontare al meglio i risultati del valore UTCI.

Varia però la dimensione del tunnel del vento, strettamente legata alla geometria, che in questo caso ha larghezza di 3775 cm e lunghezza di 7305 cm.

### 6.5.3 Risultati

I dati ottenuti durante i tre processi di ottimizzazione, alle 10, alle 14 e alle 18 del 21 di Luglio, giorno più caldo dell'anno, sono visualizzati nella pagina seguente, che mostra i grafici di dispersione della somma dei valori di UTCI della mappa microclimatica trovata con ogni singola simulazione energetica e la convergenza verso i risultati che minimizzano tale valore.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nella tabella 6.2 . Essa mostra i valori dei parametri geometrici che, ai differenti orari, determinano un minimo nel valore della somma degli indici UTCI nella griglia individuata. La tabella mostra inoltre il valore della somma degli indici UTCI determinati sulla micromappa climatica dal benchmark.

	Hours		
	10	14	18
<b>ORIGAMI</b>			
L	72	112	105
$\omega$	161	195	169
UTCI sum value	7341.75	9126.00	7989.75
UTCI average value [°C]	32.63	40.56	35.51
<b>BENCHMARK</b>			
UTCI sum value	7945.00	9832.50	8842.50
UTCI average value [°C]	35.31	43.70	39.30
UTCI Difference [°C]	2.68	3.14	3.79

Tab. 6.2 | Valori di UTCI su un piano di riferimento al di sotto dell'Origami ed al di sotto del Benchmark

Ognuno dei tre processi di ottimizzazione è giunto a convergenza alla quarantesima generazione dopo circa 50 ore di simulazione.

Alle 10 l'ottimizzazione sul comfort termico è condotta ad una configurazione semichiusa dell'origami, che riesce a proteggere parzialmente dalla radiazione solare proveniente da est. Alle 14 l'origami è quasi completamente aperto e schermato in maniera massima dalla radiazione proveniente da sud. Alle 18 l'origami è sempre aperto, ma ruotato per proteggere dalla radiazione proveniente da ovest.

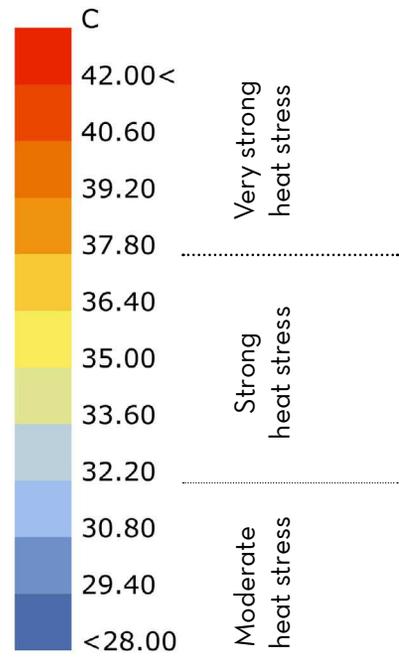
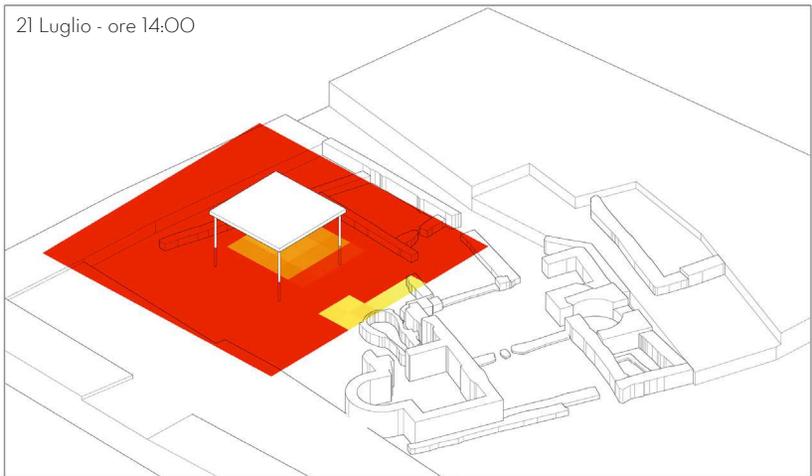
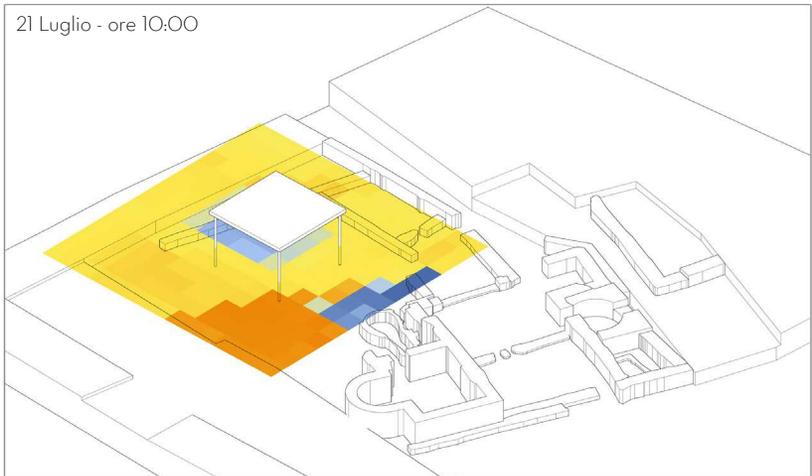


Fig. 6.10 | Mappe microclimatiche dei valori di UTI sul piano al di sotto del Benchmark

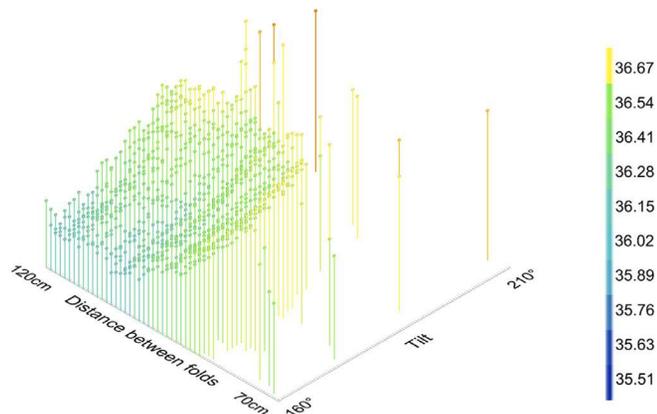
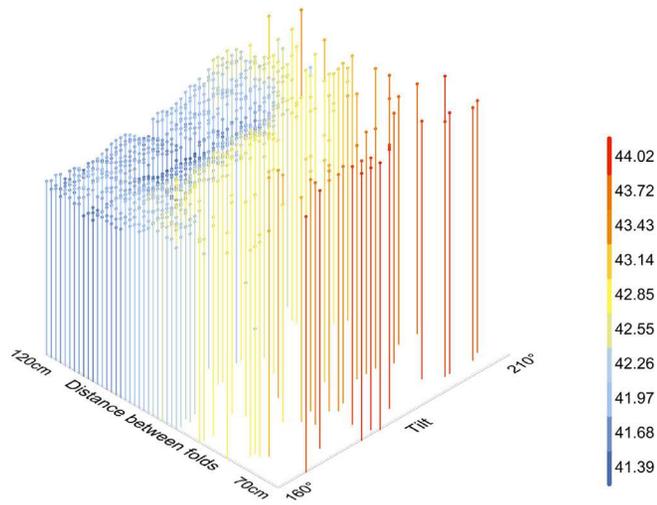
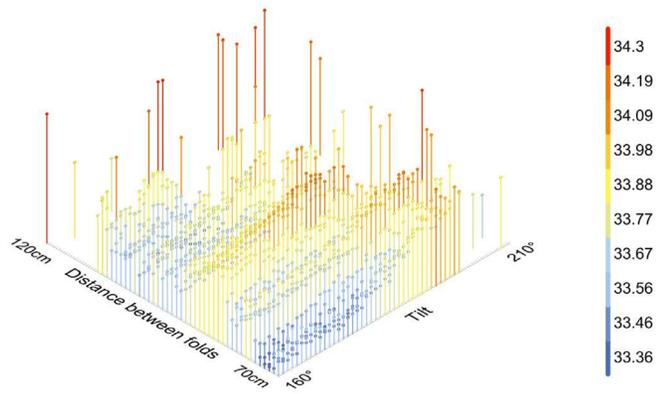
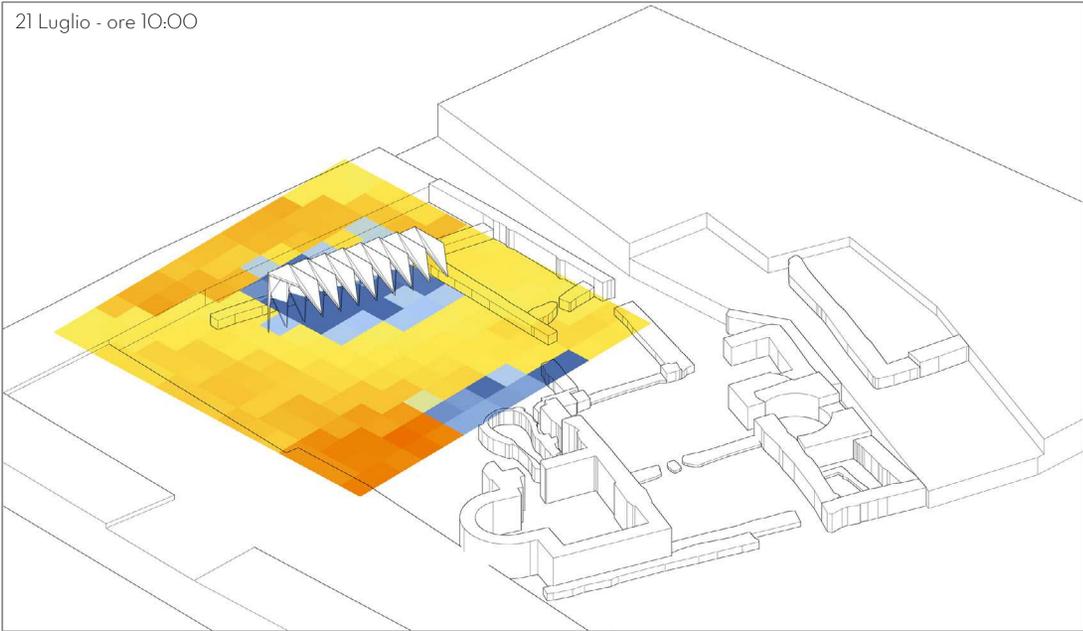
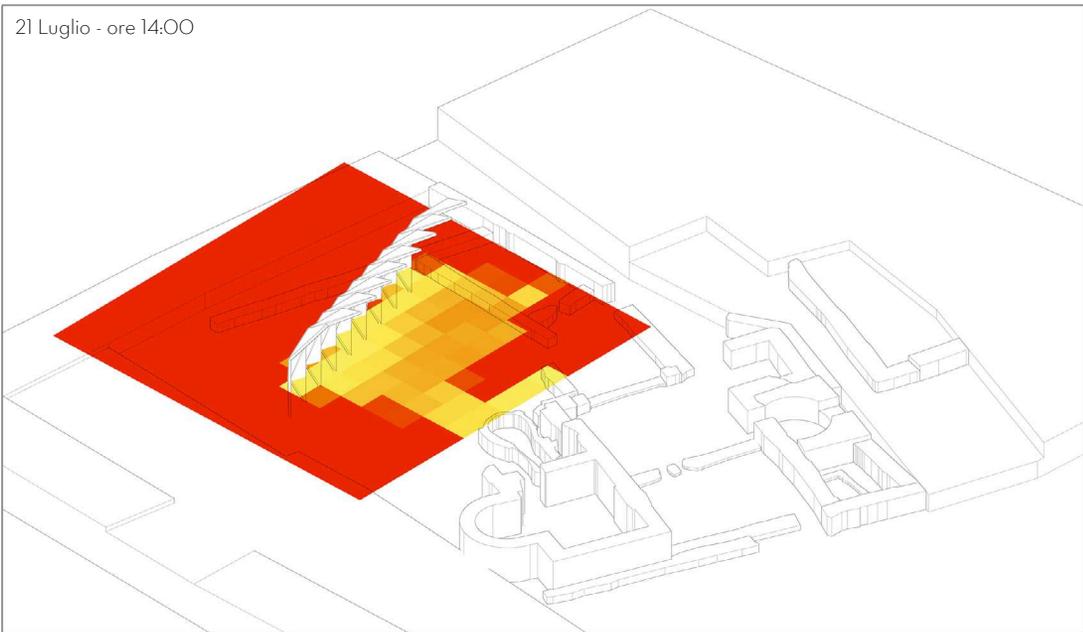


Fig. 6.11 | Grafici di dispersione dei processi di ottimizzazione alle 10, 14 e 18

21 Luglio - ore 10:00



21 Luglio - ore 14:00



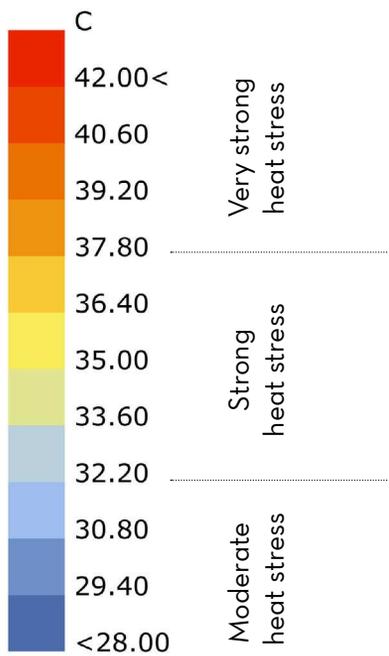
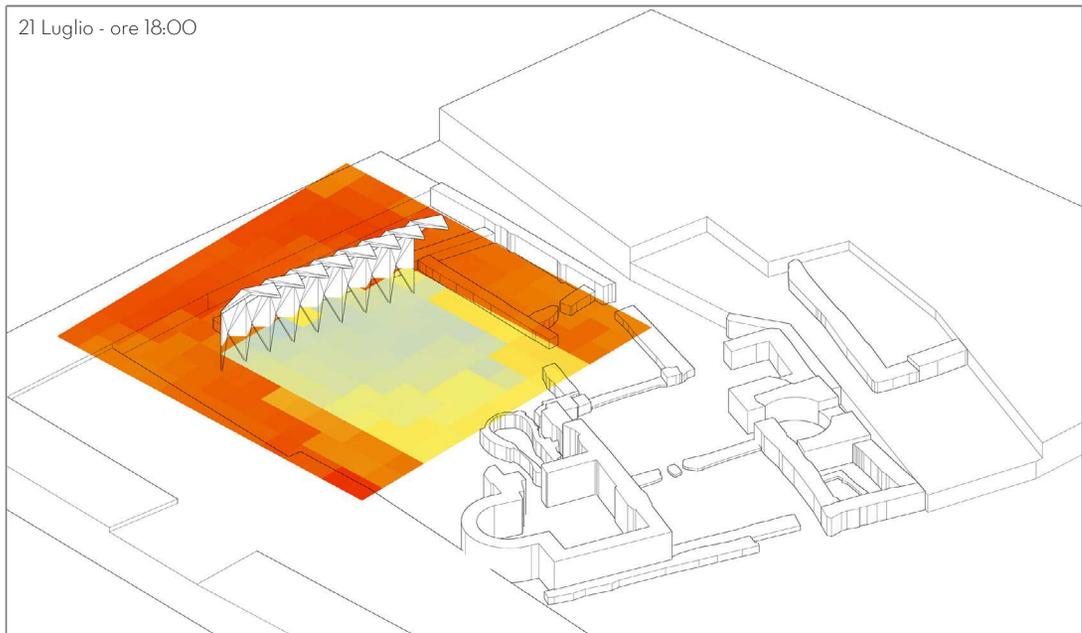


Fig. 6.12 | Mappe microclimatiche dei valori di UTCI sul piano al di sotto della copertura adattiva ad Origami

#### 6.5.4 Discussione: capacità del workflow di simulazione di programmare i movimenti sul comfort outdoor

L'ottimizzazione dei movimenti della superficie origami su tre specifici orari permette di minimizzare l'impatto visivo della struttura, che si trova in configurazione dispiegata solo quando effettivamente necessaria. La possibilità di richiuderla offre dei vantaggi sull'impatto visuale rispetto ad una soluzione statica sempre presente.

La comparazione con il *benchmark* ha permesso di verificare che la mappa microclimatica nei due casi presenta una differenza nel valore medio di UTCI da un minimo di 2.68°C ad un massimo di 3.79°C. Ciò indica un significativo incremento del comfort outdoor quando si utilizzano componenti adattivi capaci di plasmarsi sulla mutevolezza delle condizioni climatiche a contorno.

L'ottimizzazione è stata arbitrariamente calibrata solamente su tre orari, che sono stati individuati come rappresentativi, per evitare di ottenere troppe configurazioni e quindi continui movimenti del componente nell'arco della giornata.

Anche se il *workflow* di simulazione presentato è una grossa semplificazione, che risolve un problema dinamico continuo con un'analisi statica discreta, esso rappresenta uno strumento molto agevole e immediato, che consente ai progettisti di calibrare nelle fasi preliminari del progetto i complessi movimenti di un sistema adattivo, controllando simultaneamente gli aspetti estetico-morfologici ed i risvolti sul comfort ambientale del progetto.

Il *workflow* è applicabile ad un qualsiasi componente adattivo che possa essere definito in ambiente parametrico ed il cui cinematismo sia descritto dal variare di parametri geometrici (distanze fra punti, misure di angoli, ...).



## 7. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto si inserisce in un ambito di ricerca, quello dell'impiego del cinematismo nei componenti architettonici, che nel corso del secolo scorso ha ricevuto un'attenzione altalenante. Le innovazioni degli ultimi dieci anni nel campo dei materiali e delle tecnologie impiegabili conferiscono un nuovo slancio al tema, che permette di liberarlo dal fardello della complessità del funzionamento e dell'esosità della gestione.

Su queste basi si è cercato di impostare una ricerca che individuasse la migliore soluzione per gestire il cinematismo dei componenti, scegliendo le superfici ad origami per il connubio tra possibilità espressive, gestione del cinematismo e resistenza per forma. Nel novero dei materiali impiegabili si è scelto di orientare l'attenzione sui compositi cercando di declinarne le infinite possibilità costitutive per realizzare una superficie piegabile.

Un primo risultato ottenuto è la realizzazione di un composito con matrice in elastomero termoplastico e rinforzo in tessuto e la definizione di un processo di produzione che permetta di pre-piegare il composito stesso.

I test di caratterizzazione meccanica hanno permesso di verificare che i materiali testati presentano resistenza a trazione paragonabile con i materiali comunemente usati per le *textile architecture* (Phol, 2010). In particolare il composito SEBS-Carbonio è paragonabile a membrane costituite con tessuti in fibre di vetro e rivestimento in PTFE, mentre il composito SEBS-Biotex è paragonabile ai tessuti in cotone impregnati in poliestere comunemente usati per le tende da sole (tabella 6.3).

Il sistema di giunzione più performante è risultato la cucitura, ed in particolare essa risulta interfacciarsi bene con il composito SEBS-Biotex, mentre determina problemi di scorrimento tra matrice e rinforzo nel composito SEBS-Carbonio.

Da queste ultime considerazioni si evince come il composito SEBS-Biotex si presenti allo stato attuale come un composito con una buona interfaccia ed adatto ad applicazioni pratiche mentre il composito SEBS-Carbonio necessita di uno studio più approfondito per il miglioramento dell'interfaccia, probabilmente agendo con un trattamento superficiale sul tessuto in fibra di carbonio prima della formazione del composito stesso.

Si è cercato al contempo di non perdere di mira lo scopo della ricerca di una innovazione nel campo del progetto tecnologico e pertanto l'attenzione è stata concentrata tanto sull'aspetto della configurazio-

ne del materiale quanto su quello della conformazione geometrica del componente.

L'individuazione e l'applicazione di un processo di ottimizzazione per la gestione delle differenti configurazioni dell'elemento pieghevole ha permesso di ottenere, nonostante le semplificazioni descritte, uno strumento utile per coniugare, fin dalle prime fasi della progettazione gli aspetti estetico-morfologici con le prestazioni energetiche del componente. Le analisi effettuate mostrano il miglioramento del comfort ambientale che un componente cinetico offre rispetto ad un benchmark, con riduzione di UTCI medio di 2-3 °C.

In considerazione di queste prime promettenti valutazioni sarebbe probabilmente necessario approfondire le analisi energetiche effettuate attraverso una personalizzazione dello script del tool Ladybug introducendo un nuovo componente che permetta di calcolare l'effettiva temperatura della superficie dell'origami, fin qui supposta pari a quella dell'aria, per valutare possibili influenze sul comfort dei visitatori sottostanti. Unito a ciò, una simulazione di tipo dinamico anziché statico potrebbe fornire risultati ancora più accurati.

MATERIALE	RESISTENZA A TRAZIONE	PESO
Cotone-poliestere	1000-2500 N/50mm	350-520 g/m <sup>2</sup>
Fibra di vetro- PTFE	3500-8000 N/50mm	800-1500 g/m <sup>2</sup>
SEBS-Biotex	21.20N/mm <sup>2</sup> (≈1000 N/50mm)	720 g/m <sup>2</sup>
SEBS-Carbonio	104.73N/mm <sup>2</sup> (≈3100 N/50mm)	550 g/m <sup>2</sup>

Tab. 6.3 | Confronto tra le proprietà meccaniche dei compositi analizzati e di quelli comunemente utilizzati

## BIBLIOGRAFIA

### Città sensibili

- RATTI C, CLAUDEL M, Le smart cities di domani, Aspenia, 63, pp. 189-192, 2014.
- RATTI C et al, SENSEable CITY GUIDE, Cambridge Massachusetts, SA+P, 2011.

### Architettura e cinematismo

- ASEFI M, Transformable and Kinetic Architectural Structures, Saarbrücken, VDM Verlag Publisher, 2010.
- ASEFI M, The Creation of Sustainable Architecture by use of Transformable Intelligent Building Skins, World Academy of Science, Engineering and Technology 6: 756-759, 2012.
- ASEFI M, AHANGAR SIRUS, F., Transformable Shelter: Evaluation and New Architectural Design Proposals, Social and Behavioral Sciences 51: 961-966, 2012.
- BALDINELLI G, "Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system." Building and Environment 44 (6): 1107-18, 2009. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.08.005.
- BAROZZI M et al, The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture, Procedia Engineering 155: 275-284, 2016.
- BEATINI V, Cinemorfismi. Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico, Tesi di dottorato XXIII ciclo discussa al Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Univesità degli studi di Parma, 2011.
- BEESLEY P et al, Responsive architectures, subtle technologies, Toronto, Riverside Architectural Press, 2006.
- BUCKMINSTER FULLER R, Tensile-integrity structures, U.S. Patent n° 3.063.521, 1962.
- CIMMINO MC et al., "Composite solar façades and wind generators with tensegrity architecture." Composites Part B 115: 275-81, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.077>
- D'ESTRÉE STERK T, "Using Actuated Tensegrity Structures to Produce a Responsive Architecture." in Connecting >> Crossroads of Digital Discourse, Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture, Indianapolis (Indiana) 24-27 October, pp. 85-93, 2003.
- FORTMEYER R D, LINN C, Kinetic Architecture: Designs for Active Envelopes, Mulgrave, Images Publishing, 2014.
- FOX M A, YE H B P, Intelligent kinetic systems in architecture, Managing interactions in smart environments, ed. P. Nixon, S. Dobson, and G. Lacey, 91-103. Berlin, Springer-Verlag, 1999.

- FOX M, *Beyond Kinetic*, London, Spon Press, 2002.
- FOX M, KEMP M, *Interactive Architecture*, New York, Princeton Architectural Press, 2009.
- GANTES C J, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, WIT Press, 2001.
- KRONENBURG R, *Portable architecture. Design and technology*, Berlin, Birkhauser, 2008.
- LELIEVELD CMJL, VOORBIJ AIM, POELMAN WA, "Adaptable Architecture." In *Proceedings of Building stock activation*, Tokyo, TAIHEI Printing Co., 2007, p. 245-252.
- LOONEN R.C.G.M. et al, *Climate adaptive building shells. State-of-the-art and future challenges*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 483-493, 2013.
- MUSACCHIO A, *Architetture cinetiche. Apparatı meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*, Rimini, Maggioli Editore, 2009.
- NEGROPONTE N, *Soft Architecture Machines*, Cambridge, The MIT Press, 1975.
- OTTO F, et al., *Convertible roofs (IL 5)*, Information of the Istitute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart, ILEK press, 1972.
- OTTO F, RASCH B, *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, München, Axel Menges, 1995.
- PELLEGRINO S, YOU Z, "Foldable bar structures." *International Journal of Solids and Structures* 34: 1825-1847, 1997.
- PELLEGRINO S, *Deployable Structures*, New York, Spring Wien, 2001.
- PIZZI E, IANNACCONE G, RUTTICO P, "Innovative strategies for adaptive buildings in large cities." *Int. Journal for Housing Science* 36 (2): 99-107, 2012.
- RAMZY N, FAYED H, *Kinetic systems in architecture. New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings*, *Sustainable Cities and Society* 1: 170-177, 2011.
- REICHERT S, et al, *Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness*, *Computer-Aided Design* 60: 50-69, 2015.
- RUSCICA G, *Sistemi tensegrali estensibili. Forme per architetture adattive*, Tesi di dottorato XXI ciclo discussa al Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Univesità degli Studi di Catania, 2008.
- SAIDANI M, BAVEREL O, "Retractable multi-reciprocal grid structure." *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 39 (2): 141-146, 1998.
- SAPIENZA V, VERSACI M, *SELF-ERECTING TEMPORARY SHELTER: cinematisimo e sottovuoto*. *TECHNE* 07: 225-31, 2014.
- SCHUMACHER M, SCHAEFFER O, VOGT M M, *Move: architecture in motion - dynamic components and elements*, Basel, Birkhauser, 2010.
- SORU M, *A spatial kinetic structure applied to an active acoustic cei-*

ling for a multipurpose theatre, MSc thesis report Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2014.

-YOU Z, CHEN Y, Motion Structures: Deployable Structural Assemblies of Mechanisms, Basel, Spon Press, 2011.

-ZANELLI A, Trasportabile / trasformabile, idee e tecniche per architettura in movimento, Rimini, Maggioli, 2003.

### Superfici corrugate

-SALVADORI M, HELLER A R, Structure in Architecture. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 1963.

-ŠEKULARAC N et al., Folded Structures In Modern Architecture, Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering 10: 1-16, 2012.

### Applicazioni dei principi degli origami

-BURI H, WEINAND Y, "ORIGAMI-Folded Plate Structures, Architecture." 10th World Conference on Timber Engineering, 2008. [http://www.academia.edu/download/30357534/OOc08a04\\_origami\\_arch\\_f.pdf](http://www.academia.edu/download/30357534/OOc08a04_origami_arch_f.pdf).

-BURI H, WEINAND Y, Origami with Laminated Cross-Boarded Wood Sheeting, Detail 10, pp. 1066-1068, 2010.

-CASALE A, CALVANO M, Castelli di carta. La piega per la costruzione di superfici articolate, Disegnare con 9: 289-300, 2012.

-CASALE A, VALENTI GM, Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami, Roma, Ed. Kappa, 2012.

-CURLETTO G, GAMBAROTTA L, "Design of a composed origami-inspired deployable shelter : modeling and technological issues." Proc IASS Annu Symp 2016 "Spatial Struct 21st Century." 2016.

-ENGEL P, Folding the Universe: Origami from Angelfish to Zen, New York, Vintage Books, 1989.

-GUEST SD, "The stiffness of prestressed frameworks: A unifying approach." International Journal of Solids and Structures 43: 842-854, 2006.

-HEIMBS S, CICHOSZ J, KLAUS M, KILCHERT S, JOHNSON A F, "Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads." Compos. Struct. 92: 1485-97, 2010.

-JACKSON P, Folding techniques for designers. From sheet to form, Londra, Laurence King, 2011.

-JAMALI M, NAZAR POUR H, BARATI ARDIN M, "Tensegrified Folded Glass Shells and Domes." Cumhuriyet Sci J. 36 (6): 2-9, 2015.

-MIURA K, Method of packaging and deployment of large membranes in space, 31st IAF Congress, Tokyo, Japan, September 1980.

-MIURA K, "Method of packaging and deployment of large membranes in space." Inst Space Astronaut Sci Rep 618: 1-9, 1985.

-MIURA K, "Folding a plane-scenes from nature technology and art." In Danvas G, Nagy D (Eds.), Symmetry of structure: an interdisciplinary Symposium, Abstract, Aug 13-19, 1989. Budapest: Malév Kiadó, 1989.

-MIURA K, TACHI T, Synthesis of Rigid-Foldable Cylindrical Polyhedra,

- Journal of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry (ISIS-Symmetry), Special Issues for the Festival-Congress, Gmuend, Austria, August 23-28, pp. 204-213, 2010.
- PELLEGRINO S, CALLADINE CR, "Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks." *International Journal of Solids and Structures* 22: 409-428, 1986.
  - PERAZA-HERNANDEZ E A et al, "Origami-inspired active structures: a synthesis and review". *Smart Material and Structures* 23: 1-28, 2014.
  - PICKETT G T, Self-folding origami membranes, *Europhys Lett.* 78(4):48003, 2007.
  - SCHENK M, *Folded Shell Structures*, PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Cambridge, UK, 2011.
  - SCHENK M, GUEST SD, *Geometry of Miura-folded metamaterials*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(9):3276-81, 2013.
  - SCHENK M, GUEST SD, MCSHANE GJ. "Novel stacked folded cores for blast-resistant sandwich beams." *Int J Solids Struct.* 51 (25-26): 4196-4214, 2014. doi:10.1016/j.jisols.2014.07.027
  - STOUFFS R et al., *Investigations on Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures*, *Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA): 893-902, 2013.*
  - TACHI T, "Simulation of Rigid Origami." In Lang RJ (Ed.), *Origami 4: Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education (4OSME)*, 175-188, A K Peters, 2009.
  - TACHI T, *Rigid-Foldable Thick Origami*, *Origami 5 Fifth International Meeting of Origami Science Mathematics and Education*: 253-64, 2011.
  - TROMETER S, KRUPNA M, "Development and design of glass folded plate structures." *IASS Journal of International Association for Shell and Spatial Structures* 47 (3), 2006.
  - WILSON L, PELLEGRINO S, DANNER R, "Origami Sunshield Concepts for Space Telescopes." *LIV AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Struct Struct Dyn Mater Conf Boston, Massachusetts.* 2013. doi:10.2514/6.2013-1594
  - YOSHIMURA Y, *On the Mechanism of Buckling of a Circular Cylindrical Shell under Axial Compression*, Washington, National Advisory Committee for Aeronautics Technical Memorandum NACA 1390. 1955.

#### Parametric design

- TEDESCHI A, *AAD. Algorithms Aided Design*, Brienza, Le Penseur, 2014.

#### Materiali

- CHUNG DDL, "Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composites." *Mater Sci Eng R Reports* 113: 1-29, 2017. doi:10.1016/j.mser.2017.01.002
- CUOMO M, DELL'ISOLA F, GRECO L, "Simplified analysis of a generalized bias test for fabrics with two families of inextensible fibres"

- Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik 67(3): 61,2016. doi:10.1007/s00033-016-0653-z
- HOUTMAN R, "Materials used for architectural fabric structures." In de Llorens Duran JI (Ed.), *Fabric structures in architecture*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, Elsevier, 2016. ISBN-13: 978-1782422334
  - KU H, WANG H, PATTARACHAIYAKOOP N, TRADA M, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites." *Compos Part B Eng.* 42 (4): 856-873, 2011. doi:10.1016/j.compositesb.2011.01.010
  - LELIEVELD CMJL, VOORBIJ AIM, "Dynamic material application for architectural purposes." *Advances in Science and Technology* 56: 595-600, 2008.
  - LELIEVELD CMJL, *Smart Materials For The Realization Of An Adaptive Building Component*, PhD thesis Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 2013.
  - LENG J, LAN X, LIU Y, DU S, "Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications." *Prog Mater Sci.* 56 (7): 1077-1135, 2011. doi:10.1016/j.pmatsci.2011.03.001
  - LIENHARD J, *Bending Active Structures, Form-Finding Strategies Using Elastic Deformation in Static and Kinematic Systems and Structural Potential Therein*, Phd Thesis, ITKE, University Of Stuttgart, 2014.
  - LLORENS DURAN J I (Ed.), *Fabric structures in architecture*, Woodhead Publishing Ltd, Elsevier, Cambridge, ISBN-13: 978-1782422334, 2016.
  - MAURIN B, MOTRO R, *Textile Architecture. Matériaux Composites Souples en Architecture, Construction et Intérieurs*, Birkhauser, 2013. <hal-00856888>
  - MOOR T, WEBER-MARIN A, HÄBERLE J, *An aesthetic approach to the use of textiles in architecture*, in J. Redström, A. Valtonen & H. Wiltse (eds.) *DRS 2012 Design's Big Debates: Pushing the Boundaries of Design Research*, 2012.
  - MOTRO M, *Flexible Composite Materials in Architecture, Construction and Interiors*, Birkhauser, 2013.
  - NABI SAHEB D, JOG JP, "Natural fiber polymer composites: a review." *Adv Polym Technol* 18: 351-63, 1999.
  - OHKATA I, SUZUKI Y, "The Design of Shape Memory Alloy Actuators and their Applications." In Otsuka K, Wayman C M (Eds.), *Shape Memory Materials*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1998.
  - OHSHIMA T et al, "Analysis and design of elastic materials formed using 2D repetitive slit pattern" in *Future Visions, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015, Amsterdam, 17 - 20 August, 2015*.
  - OTSUKA K, WAYMAN CM (Eds.), *Shape Memory Materials*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1998.
  - POHL G (Ed.), *Textiles, polymers and composites for buildings*, Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited, 2010.

- STAVRIC M, WILTSCHE A, "Investigations on Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures." Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013), no. Caadria: 893-902, 2013.  
[http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/caadria2013\\_178.content.pdf](http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/caadria2013_178.content.pdf).
- SUNG D K, "Skin Deep: Breathing Life into the Layer between Man and Nature." AIA Report on University Research 3. 2008.

### Coperture per siti archeologici

- FERRONI AM, CACACE C, Carta del rischio: la vulnerabilità archeologica. 2010.
- LAURENTI M C (Ed.), Le coperture delle aree archeologiche: Museo Aperto, Roma, Gangemi editore, 2006.
- MILITELLO PM, "Archaeologists and archaeological cover." in Vanore M (Ed.) Archaeology's places and contemporary uses: Erasmus intensive programme 2009-2010 design workshop. Venezia, IUAV, 2010. ISBN 978-88-87697-46-9.
- RUGGERI TRICOLI MC, Musei sulle rovine: architettura nel contesto archeologico, Milano, Lybra Immagine, 2007.
- SANTOPUOLI N, SANTORO S, "La protezione delle aree archeologiche: ricerca e prassi operativa." Arkos 1: 3-5, 2000.
- VANORE M (Ed.), Archaeology's places and contemporary uses, Venezia, IUAV, 2010.
- VAUDETTI M, MINUCCIANI V, CANEPA S, Mostrare l'archeologia. Per un manuale degli interventi di valorizzazione, Torino, Allemandi, 2013.
- YAKA ÇETIN F, IPEKOGLU B, "Impact of transparency in the design of protective structures for conservation of archaeological remains." Journal of Cultural Heritage 14(3): e21-e24, 2013.
- ZANELLI A, "Architectural fabric structures in the refurbishment of archaeological and cultural heritage areas." In de Llorens Josep Ignasi (Ed.), Fabric Structures in Architecture. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, pp. 481-527. ISBN 978-1-78242-233-4

### Ottimizzazione di forma

- ADAMSKI M, "Optimization of the Form of a Building on an Oval Base." Building and Environment 42 (4): 1632-43, 2007. doi:10.1016/j.buildenv.2006.02.004.
- MACHAIRAS V, TSANGRASSOULIS A, AXARLI K, "Algorithms for Optimization of Building Design: A Review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 31 (1364): 101-12. 2014. doi:10.1016/j.rser.2013.11.036.

## Comfort termico

- BALDINELLI G, "Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system." *Building and Environment* 44 (6): 1107-18, 2009. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.08.005.
- BRÖDE P ET AL. "Calculating UTCI Equivalent Temperature." in Castellani JW, Endrusick TL (Eds.), *Environmental Ergonomics XIII*, University of Wollongong, Wollongong, 49-53, 2009.
- BRÖDE P et al, "The Universal Thermal Climate Index UTCI in Operational Use." *Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK*, 9-11 April 2010. London, no. April: 9-11, 2010.
- FRÖHLICH D, MATZARAKIS A, "A Quantitative Sensitivity Analysis on the Behaviour of Common Thermal Indices under Hot and Windy Conditions in Doha, Qatar." *Theoretical and Applied Climatology* 124 (1-2): 179-87. 2015. doi:10.1007/s00704-015-1410-5.
- HASSELAAR BLH, "Climate adaptive skins: Towards the new energy-efficient façade." *WIT Trans Ecol Environ.* 99: 351-360, 2006. doi:10.2495/RAVO60351
- MACKEY C, *Pan Climatic Humans. Shaping Thermal Habits in an Unconditioned Society*, Master thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- PESENTI M, MASERA G, FIORITO F, "Shaping an Origami Shading Device through Visual and Thermal Simulations." *Energy Procedia* 78: 346-351, 2015.
- REICHERT S, MENGES A, CORREA D, "Meteorosensitive Architecture: Biomimetic Building Skins Based on Materially Embedded and Hygroscopically Enabled Responsiveness." *CAD Computer Aided Design* 60. Elsevier Ltd: 50-69. . 2015. doi:10.1016/j.cad.2014.02.010.
- ROBERTSON E, CHOUDHURY V, BHUSHAN S, WALTERS DK, "Validation of OpenFOAM numerical methods and turbulence models for incompressible bluff body flows." *Computers & Fluids* 123: 122-145, 2015.
- ROBINSON D, *Computer Modelling for Sustainable Urban Design: Physical Principles, Methods and Applications*, New York, Earthscan, 2011.
- ROUDSARI M S, PAK M, ADRIAN SMITH + GORDON ARCHITECTURE "Ladybug: A Parametric Environmental Plugin for Grasshopper To Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design." 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 3129-35. 2013. [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p\\_2499.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2013/p_2499.pdf).
- TURRIN M, VON BUELOW P, KILIAN A, STOUFFS R, "Performative skins for passive climatic comfort: A parametric design process." *Autom Constr.* 22: 36-50, 2012. doi:10.1016/j.autcon.2011.08.001

## Norme

- UNI EN ISO 527-1:2012. Materie plastiche - Determinazione delle proprietà a trazione - Parte 1: Principi generali.
- UNI EN ISO 527-4:1999. Materie plastiche - Determinazione delle caratteristiche a trazione - Condizioni di prova per i compositi plastici rinforzati con fibre, isotropi ed ortotropi.
- UNI EN 12814-4:2003. Prove di giunti saldati di prodotti semifiniti di materiale termoplastico - Parte 4: Prova di pelatura.

## ELENCO DELLE FIGURE

### 1 INTRODUZIONE

Figura 1.1 | Kiefer Technic Showroom di Ernst Giselbrecht + Partner, Bad Gleichenberg, 2006-2007, pag. 3  
<http://www.dailytonic.com/>

Figura 1.2 | Villa Girasole di Angelo Invernizzi, San Martino Buon Albergo, 1929-1935, pag. 4  
<http://www.architetti.san.beniculturali.it>

Figura 1.3 | Villa Girasole di Angelo Invernizzi, San Martino Buon Albergo, 1929-1935, pag. 5  
<http://ofhouses.tumblr.com/>

Figura 1.4 | Total Theatre di W. Gropius e E. Piscator, progetto, 1924, pag. 6  
<https://library.calvin.edu/hda/>

Figura 1.5 | Emergency Center di S. Calatrava, San Gallo, 1988 - 1998, pag. 6  
<https://www.mimoo.eu/>

Figura 1.6 | Rigid-Foldable Origami Gallery di Tomohiro Tachi, progetto, 2009, pag. 7  
<https://architizer.com>

### 2 STATO DELL'ARTE

Figura 2.1 | Resonant Chamber di rvtr, Ann Arbor, 2011-2013, pag. 13  
<http://www.rvtr.com>

Figura 2.2 | PlusMinus, ILEK, Stoccarda, 2007, pag. 14  
<https://www.festo.com/>

Figura 2.3 | Smart Shell, ILEK, Stoccarda, 2012, pag. 14  
<https://www.detail-online.com>

Figura 2.4 | Studi sulle membrane dispiegabili per applicazioni aerospaziali, DSL, Cambridge, 1992, pag. 15  
<http://www.eng.cam.ac.uk/>

Figura 2.5 | Adaptive Building Component (ABC), TU, Delft, 2013, pag. 16 (Lelieveld, 2013).

Figura 2.6 | Fiore della Strelitzia reginae, pag. 17 (Lienhard, 2014)

Figura 2.7| Flectofold, ITKE, Stuttgart, 2011, pag. 18  
(Lienhard, 2014)

Figura 2.8 | Flectofold, ITKE, Stuttgart, 2011, pag. 19  
<http://transmaterial.net>

Figura 2.9 | Ombrelli protettivi per il tour di concerti dei Pink Floyd di Frei Otto, USA, 1977, pag. 21  
<http://www.artribune.com>

Figura 2.10 | Otto F. et al., Convertible roofs, 1972, pag. 25  
(Otto, 1972)

Figura 2.11 | Pannello in legno intagliato con pattern ripetitivo per generare la curvatura, pag . 39  
(Ohshima et al., 2015)

Figura 2.12 | Šekularac N. et al., Folded Structures In Modern Architecture, 2012, pag . 44  
(Šekularac N. et al., 2012)

Figura 2.13 | Resistenza per forma delle superfici piegate, pag . 45  
(Šekularac N. et al., 2012)

Figura 2.14 | Šekularac N. et al., Folded Structures In Modern Architecture, 2012, pag . 45  
(Šekularac N. et al., 2012)

Figura 2.15 | Aula universitaria di Van den Broek en Bakema, Delft, 1966, pag 46  
<https://www.dezeen.com>

Figura 2.16 | Cappella temporanea di Localarchitecture + Danilo Mondada + Hani Buri + Yves Weinand, Pomaples, 2008, pag . 47  
<https://www.architecturelab.net>

Figura 2.17 | Cappella temporanea di Localarchitecture + Danilo Mondada + Hani Buri + Yves Weinand, Pomaples, 2008, pag . 47  
<https://www.architecturelab.net>

Figura 2.18 | Trometer S. & Krupna M., Development and design of glass folded plate structures, 2006, pag . 48  
(Trometer & Krupna, 2006)

Figura 2.19 | Jamali M., Nazar Pour H. & Barati Ardin M., Tensegifi ed Folded Glass Shells and Domes, 2015, pag . 48

Figura 2.20 | Struttura mobile per l'estrazione dello zolfo di Renzo Piano, Pomezia, 1967, pag . 48  
<http://compositesandarchitecture.com/>

Figura 2.21 | Struttura mobile per l'estrazione dello zolfo di Renzo Piano, Pomezia, 1967, pag . 49  
<http://compositesandarchitecture.com/>

Figura 2.22 | Copertura mobile realizzata con struttura pieghevole in lastre di vetro sottili della SFL Technologies, prototipo, 2015, pag . 51  
<https://www.detail.de>

Figura 2.23 | Chiosco di Make architects, Londra, 2014, pag . 51  
<https://www.archdaily.com>

Figura 2.24 | Cardboard Banquet, Department of Architecture, University of Cambridge, 2009, pag . 53  
<https://ecoweekmilan2011w4.wordpress.com/>

Figura 2.25 | Angolo di piega  $\vartheta_i$  e raggio di curvatura R, pag . 54  
(Peraza-Hernandez et al., 2014)

Figura 2.26 | Come realizzare una reverse fold, pag . 55  
(Buri & Weinand, 2008)

Figura 2.27 | L'angolo fisso  $\alpha$ , l'angolo di inflessione  $\varphi$  e l'angolo di apertura  $\vartheta$ , pag . 55  
(Buri & Weinand, 2008)

Figura 2.28 | Ripetizione di pieghe con tassellazione fitta e disordinata e con tassellazione composta da poligoni differenti tra di loro, pag . 56  
(Casale & Calvano, 2012)

Figura 2.29 | Ripetizione di pieghe con gruppi di tasselli uguali tra di loro: Miura Ori e Yoshimura pattern, pag . 57

Figura 2.30 | Bloom di Doris Kim Sung, Los Angeles, 2011, pag . 62  
<https://arch.usc.edu>

Figura 2.31 | Bloom di Doris Kim Sung, Los Angeles, 2011, pag . 63  
<https://arch.usc.edu>

Figura 2.32 | Programmable Wood, pag . 64  
<https://www.zmescience.com/>

Figura 2.33 | Programmable Carbon Fiber, pag. 65  
<https://www.zmescience.com/>

#### 4 METODI E STRUMENTI

Figura 4.1 | Tipi di rinforzo nei materiali compositi: fibre continue, fibre discontinue, particelle e tessuti, pag. 68  
<http://imeulia.blogspot.it/>

Figura 4.2 | SEBS (Stirene-Etilene-Butilene-Stirene) in pallet, pag. 69

Figura 4.3 | Il processo per ottenere il film sottile di SEBS, pag. 69

Figura 4.4 | Tessuto di fibre di canapa prodotto da Composite Evolution - Biotex Flax 400 g/m<sup>2</sup> 2x2 Twill, pag. 70

Figura 4.5 | Tessuto di fibre di carbonio prodotta da Prochima - C-200/T, pag. 70

Figura 4.6 | Delocalizzazione delle fibre di rinforzo in campione di prova durante il settaggio dei parametri di produzione, pag. 73

Figura 4.7 | Opacizzazione della finitura della matrice in SEBS in campione di prova durante il settaggio dei parametri di produzione, pag. 73

Figura 4.8 | Macchina di trazione monoassiale Zwick-Roell modello zO50, pag. 75  
<http://www.zwick.co.uk/en.html>

Figura 4.9 | Schematizzazione test apertura, pag. 76

Figura 4.10 | Schematizzazione test chiusura, pag. 76

Figura 4.11 | Dettagli di alcuni sistemi di connessione e di giuntura utilizzati per le textile architecture, pag. 77  
(Llorens Duran, 2016)

Figura 4.12 | Le due sollecitazioni analizzate, con  $\delta$  angolo tra la sollecitazione e l'asse della saldatura, pag. 79

Figura 4.13 | Modelli di studio sulle possibili configurazioni geometriche ottenibili con le superfici ad origami, pag. 81

Figura 4.14 | Modellazione algoritmica di una geometria. Il momento ideativo e quello della modellazione sono contemporanei, pag. 83  
(Tedeschi, 2014)

Figura 4.15 | Progetto parametrico di una superficie piegata. La definizione di alcuni parametri attraverso slider permette di alterare agevolmente la geometria, pag. 85

Figura 4.16 | Modello fisico di studio per l'analisi dei punti di controllo, pag. 86

Figura 4.17 | Modello fisico in scala con sistema di attuazione automatizzato, pag. 87

Figura 4.18 | Localizzazione dell'intervento, pag. 89

Figura 4.19 | Modulo di copertura per la protezione durante la fase di scavo, pag. 89

Figura 4.20 | Fotoinserimento del sistema modulare di copertura sugli scavi archeologici dell'Insula di Akrai, pag. 89

Figura 4.21 | Localizzazione dell'intervento, pag. 91

Figura 4.22 | Moduli di copertura per la protezione del sito archeologico della Villa del Casale, pag. 91

Figura 4.23 | Render del sistema modulare di copertura, pag. 91

Figura 4.24 | Fotoinserimento di KREO nel sito archeologico delle Terme Romane di Centuripe (EN) , pag. 92

Figura 4.25 | Metodologia, strumenti e software utilizzati per il workflow circolare, pag. 96

Figura 4.26 | Workflow per l'ottimizzazione della configurazione geometrica secondo il minimo valore di UTCI sulla mappa microclimatica di riferimento, pag. 100

## 5 I RISULTATI DELLE INDAGINI SPERIMENTALI

Figura 5.1 | Stratificazione di layer da inserire in pressa per la realizzazione del materiale composito, pag. 102

Figura 5.2 | Il processo di produzione per stampaggio in pressa a caldo, pag. 104

Figura 5.3 | Campione finale SEBS-Carbonio, pag. 106

Figura 5.4 | Campione finale SEBS-Biotex, pag. 107

Figura 5.5 | Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4-provetta tipo 2, pag. 108

Figura 5.6 | Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4-provetta tipo 3, pag. 108

Figura 5.7 | Diagramma sforzo-deformazione, test trazione monoassiale fibre parallele SEBS-Biotex, pag. 110

Figura 5.8 | Diagramma sforzo-deformazione, test trazione monoassiale fibre parallele SEBS-Carbonio, pag. 111

Figura 5.9 | Deformazione geometrica di un campione di tessuto con fibre orientate a 45° sottoposto a prova di trazione, pag. 113  
(Cuomo, Dell'Isola & Greco, 2016)

Figura 5.10 | Provini SEBS-Biotex e SEBS-Carbonio sottoposti a prova di trazione monoassiale con fibre disposte a 45° rispetto all'asse di trazione, pag. 113

Figura 5.11 | Diagramma sforzo-deformazione, test trazione monoassiale fibre 45° SEBS-Biotex, pag. 114

Figura 5.12 | Diagramma sforzo-deformazione, test trazione monoassiale fibre 45° SEBS-Carbonio, pag. 115

Figura 5.13 | Campioni di KREO con piegatura da stampo ottenuto con prototipazione rapida e con stampo realizzato in lamiera di alluminio, pag. 119

Figura 5.14 | Stampi per conferire la piega a KREO ottenuti attraverso processi di prototipazione rapida riempiti con resina bicomponente e polvere di rame, pag. 121

Figura 5.15 | Sovrapposizione dei diagrammi di due provini, uno sottoposto ad apertura ed uno a chiusura, pag. 122

Figura 5.16 | Risultati della prova di piegatura: in alto il test di apertura, in basso il test di chiusura, pag. 123

Figura 5.17 | Schema di realizzazione della giunzione per il Single-lap joint shear test, pag. 125

Figura 5.18 | Schema di realizzazione della giunzione per il T-peel test, pag. 125

Figura 5.19 | Diagramma sforzo-deformazione di una provetta sottoposta al Single-lap joint shear test (in giallo) ed al T-peel test (in verde) , pag. 126

Figura 5.20 | Provetta di SEBS-Biotex sottoposta a Single-lap joint shear test, pag. 127

Figura 5.21 | Provetta di SEBS-Biotex sottoposta a T-peel test, pag. 127

Figura 5.22 | Rottura di una provetta di SEBS-Biotex sottoposta a Single-lap joint shear test, pag. 127

Figura 5.23 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione saldata SEBS-Biotex, pag 128

Figura 5.24 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione saldata SEBS-Carbonio, pag 129

Figura 5.25 | T-peel test sulla giunzione saldata SEBS-Carbonio, pag 130

Figura 5.26 | Sovrapposizione diagrammi sforzo-deformazione, T-peel test giunzioni saldate SEBS-Biotex (in verde) e SEBS-Carbonio (in rosso), pag. 130

Figura 5.27 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione cucita SEBS-Biotex, pag 131

Figura 5.28 | Diagramma sforzo-deformazione, T-peel test giunzione cucita SEBS-Carbonio, pag 132

Figura 5.29 | T-peel test sulla giunzione cucita SEBS-Biotex, pag 133

Figura 5.30 | T-peel test sulla giunzione cucita SEBS-Carbonio, pag 133

Figura 5.31 | Sovrapposizione diagrammi sforzo-deformazione, T-peel test giunzioni cucite SEBS-Biotex (verde) e SEBS-Carbonio (arancione), pag. 134

## 6 VALIDAZIONE DELLA METODOLOGIA

Figura 6.1 | Case terrazzate, Efeso, Turchia, pag. 138

Figura 6.2 | Sito archeologico di Bibracte, Saint-Leger-sous-Beuvray, Francia, pag. 142  
<http://www.tess.fr/>

Figura 6.3 | La città di Piazza Armerina è localizzata nel centro della Sicilia,

pag. 143

Figura 6.4 | Il sito archeologico inserito fra i siti patrimonio mondiale UNESCO, pag. 143

Figura 6.5 | L'area archeologica delle "Terme Sud" si trova alla destra del visitatore che percorre la strada di accesso alla Villa del Casale, pag. 145

Figura 6.6 | Planimetria e modello tridimensionale dell'area archeologica delle "Terme Sud" e della copertura ad Origami impiegato per la simulazione energetica, pag. 146

Figura 6.7 | La distanza  $L$  è la variabile che determina l'apertura complessiva dell'origami;  $a$  è l'angolo fisso legato alla geometria scelta;  $d$ , angolo di apertura, e  $f$ , angolo di inflessione, sono univocamente determinati da  $a$  e  $L$  (cfr algoritmo a pag 150)

Figura 6.8 | L'angolo di rotazione  $\omega$  ha intervallo compreso tra  $160^\circ$  e  $210^\circ$  avendo indicato con  $180^\circ$  l'origami dispiegato nella direzione nord-sud

Figura 6.9 | Definizione geometrica dell'origami in Grasshopper. L'elemento base e il modulo triangolare. Vengono poi definiti i tre angoli ( $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) che, quindi l'arco determinano la geometria elementare, il suo riflesso e la ripetizione di tali elementi, pag. 151

Figura 6.10 | Mappe microclimatiche dei valori di UTCI sul piano al di sotto del Benchmark, pag. 154

Figura 6.11 | Grafici di dispersione dei processi di ottimizzazione alle ore 10, 14 e 18, pag. 155

Figura 6.12 | Mappe microclimatiche dei valori di UTCI sul piano al di sotto della copertura adattiva ad Origami, pag 157

## ELENCO DELLE TABELLE

### 1 INTRODUZIONE

Tabella 1.1 | Terminologia utilizzata per oggetti architettonici dotati di cinematismo in relazione al livello tecnologico impiegato, TU Delft, 2007, pag. 9

### 4 METODI E STRUMENTI

Tabella 4.1 | Dimensione dei provini secondo la norma UNI EN 12814-4 del 2003, pag. 79

Tabella 4.2 | Scala di valutazione UTCI (IUPS 2003) , pag. 97

### 5 I RISULTATI DELLE INDAGINI SPERIMENTALI

Tabella 5.1 | Campioni SEBS-Biotex realizzati (in rosso il campione che ha superato le analisi ed i relativi parametri di produzione), pag. 104

Tabella 5.2 | Campioni SEBS-Carbonio realizzati (in rosso il campione che ha superato le analisi ed i relativi parametri di produzione) , pag. 105

Tabella 5.3 | Quadro riepiloativo dei risultati delle prove di trazione monoassiale, pag. 109

Tabella 5.3 | Quadro riepilogativo dei risultati dei T-peel test eseguiti sulle giunzioni, pag. 134

### 6 VALIDAZIONE DELLA METODOLOGIA

Tabella 6.1 | Posizione del sole nelle ore selezionate per il processo di ottimizzazione, pag. 149

Tabella 6.2 | Valori di UTCI su un piano di riferimento al di sotto dell'Origami ed al di sotto del Benchmark, pag. 153

Tabella 6.3 | Confronto tra le proprietà meccaniche dei compositi analizzati e di quelli comunemente utilizzati, pag. 161

