

KREO – Kinetic Responsive Envelop by Origami

Gianluca Rodonò*, Vincenzo Sapienza

Highlights

The paper shows the first results of our research on folding surfaces and their application to achieve responsive architectural components capable to change their configuration and to adapt themselves to needs of the users or to climatic conditions.

Abstract

One of the most interesting fields of contemporary research is addressed to the realization of kinetic building components. It can be obtained by using foldable surfaces, that are light surfaces which increase their strength thanks to the folds. They could be useful to form envelopes, coverings, shading elements or entire pavilions. KREO is classifiable in this field; it is an experimentation concerning geometric modelling and fold texture, in relation with kinematism. In addition, in KREO project, tests of composite materials are carried out with CNR of Catania, to evaluate the most useful of them, to this purpose.

Keywords

Responsive architecture, Foldable surface, Lightweight structure, Textile Technology, Composite material

1. INTRODUCTION

Starting from the Nineties, the necessity of individuating Cultural Heritage at risk of damage or fall and the opportunity of programming possible interventions, led to the realization of the *Carta del Rischio* (Risk Map), a data bank system addressed to catalogue and measure all aspects which contribute to determine risks [1]. As known, risks are determined by two factors: vulnerability and hazard. This second one, which represents the probability that a risk occurs, is not controllable by human actions. So, the mitigation techniques are addressed to reduce the propensity to damage, so as to reduce vulnerability.

In the specific case of archaeological heritage, there is a higher level of risk: it is due to the characters of incompleteness and fragmentation, that cause a reduction of the performance of its components and a major exposition to the

Gianluca Rodonò

DICAR - Dipartimento di
Ingegneria Civile e Architecture,
Università di Catania, via Santa
Sofia 64, Catania, 95123, Italia

Vincenzo Sapienza

DICAR - Dipartimento di
Ingegneria Civile e Architecture,
Università di Catania, via Santa
Sofia 64, Catania, 95123, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-095-7382500;
fax: +39-095-330309;
e-mail: gianluca.rodono@unict.it

weather. So, the mentioned *Carta del Rischio* has a special section related to the presence of a covering structure [2]. In this section the constructive efficiency of the cover is evaluated (protection from sunshine, rain, hailstorm and so on) together with its formal relationship with the landscape and the archaeological heritage.

In view of these experiences, the aim of the research is to project a protection element for archaeological heritage. Rather than current, our design has an additional performance: responsivity. This is the ability of something to change its performances, on users' requirements.

Our project is called KREO (Kinetic Responsive Envelope by Origami); its main idea is to reduce risks. It can evaluate the possibility for an event to occur, thanks to its sensorial grid; through it, KREO can change its spatial configuration so reducing risks.

2. STATE OF ART

The typological analysis on architectures with kinetic components is a critical step, that could direct the work. In particular, we have decided to start from the first approach to this topic, done by Frei Otto and his research group at the ILEK in Stuttgart. Our contribution consists in updating this catalogation, by taking into account the most recent cases. "Fold" is classified as one of the types of possible movements (such as rolling, sliding, rotation, ...) which allows the building components or the entire building to change configuration. The construction system, which allows the bending movement, can be obtained in two different ways: with membranes or with rigid elements. In the first case, the flexible surface is made with light materials, usually supported by space lattice structures with hinges that allow movement [3]. A further typological classification, useful to our studies, divides the structures of the last years on the base of the needs that architectures with kinematic components try to meet. Among them, the most frequent are the following: resistance against intrusion with building envelope protection systems, flexibility and adaptability of spaces, control of solar gain and lighting, noise control and sound insulation. This research aims at cataloguing the projects of the last years by following these two typological classifications for possible future developments of this issue. As shown in Figure 1, the folding is the most used type of movement due to its expressive potentiality and its propensity to movement. For this reason, our research has been focused on folding surfaces. In the last years, folding surfaces are widely used in engineering and architectural field thanks to the performances that they are capable to exhibit.

1. INTRODUZIONE

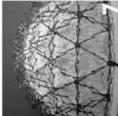
Già negli anni '90 del secolo scorso l'esigenza di individuare i beni culturali del patrimonio italiano esposti al rischio di logoramento o perdita e di programmare gli interventi da realizzare si è tradotta, grazie al progetto Carta del Rischio, in un sistema di banche dati che misurano gli aspetti che concorrono a determinare il rischio stesso. Quest'ultimo, come ben noto, è funzione di due grandezze: vulnerabilità e pericolosità[1]. Quest'ultima, che rappresenta la probabilità che il danno si verifichi, sfugge al controllo umano; pertanto le tecniche di mitigazione consistono nella riduzione della propensione dei manufatti a danneggiarsi, ossia nel ridurre la vulnerabilità.

Se si considera lo specifico caso dei beni archeologici questi, a differenza del costruito storico, presentano un carattere di incompiutezza e frammentarietà a cui è associata la perdita delle caratteristiche prestazionali dei componenti. Ciò espone maggiormente il manufatto agli agenti atmosferici. Pertanto la forma di mitigazione più ricorrente ed efficace consiste nel realizzare un elemento di protezione. Infatti nella già citata banca dati delle Carte del Rischio, è stata predisposta una sezione apposita per classificare la presenza di una struttura di copertura di protezione[2] con una scheda che ne valuta non solo l'efficienza costruttiva (capacità di protezione dal sole, di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche, ...) ma pure il rapporto formale con il bene archeologico, in termini di adeguatezza.

Sulla base di queste esperienze, la ricerca si è indirizzata sulla progettazione di un elemento protettivo per beni archeologici. Rispetto alle realizzazioni correnti, si è voluto dare al manufatto una prestazione aggiuntiva: la responsività. Con tale termine si indica la capacità di variare le prestazioni offerte in base alle esigenze delle utenze. L'idea che si pone alla base di KREO (Kinetic Responsive Envelope by Origami) è quindi quella di contrastare l'esposizione al rischio e valutare estemporaneamente la probabilità che avvengano determinati fenomeni, attraverso il proprio "sistema sensoriale", e in reazione ridurre la vulnerabilità dei propri elementi assumendo nuove configurazioni spaziali.

2. STATO DELL'ARTE

L'analisi tipologica sulle realizzazioni di manufatti edili dotati di cinematiso è un passaggio fondamentale per indirizzare il futuro lavoro. In particolare si è deciso di partire dal primo approccio alla materia, realizzato da Frei Otto e dal suo gruppo di ricerca presso l'ILEK di Stoccarda, provando ad implementarlo, tenendo in considerazione le realizzazioni più recenti. La "piegatura" viene individuata come uno dei tipi di movimento (come l'arrotolamento, lo scorrimento, la rotazione, ...) che consentono ai componenti edili o all'intero organismo edilizio di modificare la propria configurazione. Il sistema costruttivo, che consente il movimento di piegatura, può

Requirement category	Type of movement	Sliding				Folding				Rolling			
		Parallel	Central	Circular	Peripheral	Parallel	Central	Circular	Peripheral	Parallel	Central	Circular	Peripheral
Security	Requirements												
	Intrusion resistance												
Usability	Flexibility (space adaptability)												
	Solar radiation/lighting control												
Comfort	Noise control/soundproofing/absorption												

- 1 DRMM, SLIDING HOUSE, SUFFOLK, 2009.
- 2 PINO ZOPPINI, PISCINA ALLA SCIORBA, GENOVA, 1993.
- 3 BAD GLEICHENBERG, 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.
- 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.

Figure 1. Synopsis of architectures with kinematic.

This characteristic is related to the mechanical properties of corrugated structures (folded surfaces without kinetic properties). By folding a surface, it is possible to produce a stiffening in the direction of the bend. In fact, a folded surface is capable of covering a much larger space than a flat surface, made with the same material. The additional resistance is called “form-resistance”. This property is useful in many applications to optimize the use of base materials. The result is an articulated form, the charm of which consists in the complexity of the tessellated geometry, together with the evidence of stress distribution.

Folding properties, and the consequent kinetic properties, of these surfaces give them a high degree of transformability, while maintaining adequate mechanical performances in all possible configurations. Given the complexity, experiments on these issues often interact with various engineering sectors when coordinating issues related to materials, mechanical behaviour, architectural composition and building production.

Furthermore, the use of lightweight innovative materials, such as wood, glass, metal sheet and last generation plastic, improves the aesthetical-morphological appearance of corrugated surfaces, by guaranteeing extreme lightness to the overall structure. These features make foldable surfaces an excellent tool in types of work that show these needs, such as environmental emergencies, social and cultural events, temporary shelter for migrants, protection of cultural heritage. In these cases, in fact, you can take full advantage of lightness and reversibility of this type of facilities, by reducing transportation costs, by speeding up the construction and by exploiting the strong communicative skills of the employed geometries.

3. FOLDABLE SURFACES

The geometry of foldable surfaces comes from the Japanese Origami art, in which the structural element is the fold. This characteristic allows to generate a hinge for movement in a surface and, simultaneously, a stiffening along the direction of the fold. In particular, once fixed a XY reference system on the surface's plane, it is possible to distinguish two types of folds: the mountain fold and the valley fold. Their difference depending on whether they tend to move, during their closing, either in the positive direction of the Z axis or in the negative one. A second fold [4], called reverse fold, is a further important Origami technique [5]. This is a cross-fold with respect to the main fold. It determines an inversion of the bending type. A mountain fold that is crossed by a reverse fold becomes a valley fold and vice versa, a valley fold becomes a mountain fold. Unlike the first category of folds, that generates

essere o a membrana o a elementi rigidi. Nel primo caso la superficie flessibile è realizzata con materiali leggeri, in genere supportati da strutture reticolari spaziali con elementi cerniera che permettono i movimenti[3]. Una ulteriore classificazione tipologica, che è stato utile considerare per i nostri studi, divide le realizzazioni degli ultimi anni in funzione delle categorie essenziali cui le architetture dotate di cinematismo cercano di dare risposta attraverso specifici requisiti. Tra questi ultimi i più frequenti sono: la resistenza alle intrusioni, con sistemi di protezione per l'involucro; la flessibilità e adattabilità degli spazi; il controllo del fattore solare e del flusso luminoso; il controllo del rumore e l'isolamento o l'assorbimento acustico.

La ricerca mira a catalogare i progetti degli ultimi anni seguendo queste due classificazioni tipologiche per individuare possibili sviluppi futuri di questa tematica. Come mostra la Figura 1, la piegatura risulta il tipo di movimentazione più utilizzato nelle realizzazioni pratiche grazie alla sua potenzialità espressiva e alla propensione al movimento. Per tale motivo la ricerca si è concentrata sulle superfici pieghevoli. Negli ultimi anni, le superfici piegabili hanno un riscontro positivo in ambito ingegneristico e architettonico grazie alle prestazioni che sono capaci di esplicitare. Ciò discende in parte dalle proprietà meccaniche delle strutture corrugate (strutture a superfici piegate prive di cinematismo). 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. La resistenza aggiuntiva creata è chiamata “resistenza per forma”. Questa proprietà è utilizzata in numerose applicazioni in cui è necessario ottimizzare l'utilizzo 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. Scarto in più rispetto alle superfici corrugate è rappresentato dalla piegabilità e quindi dal cinematismo applicabile in tali superfici che conferisce loro un elevato grado di trasformabilità, 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.

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 tecnologiche degli ultimi decenni, esalta l'aspetto estetico-morfologico della superficie corrugata garantendo estrema leggerezza alla struttura complessiva. Sono proprio queste caratteristiche a fare delle superfici foldable degli

an alternating of mountains and valleys on the surface, the reverse folds are always mountain folds or valley folds.

ottimi strumenti per applicazioni in tipi di opere che necessitano di tali prestazioni: dalle emergenze ambientali, dagli eventi culturali e

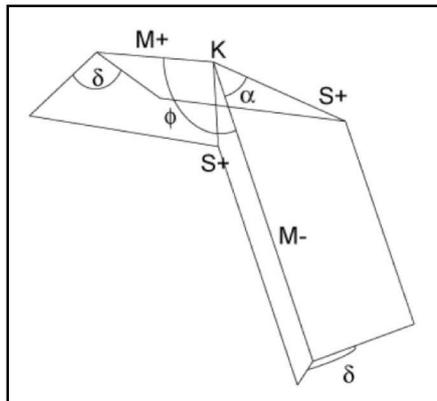


Figure 2. Reverse fold [5].

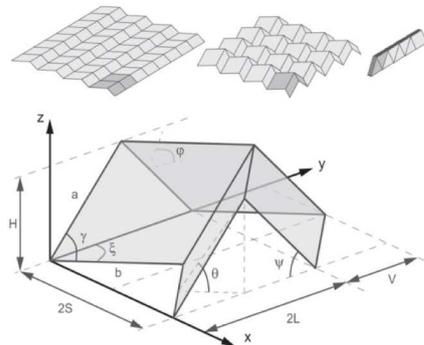


Figure 3. Module of Miura Ori pattern[6].

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

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

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

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

The fixed angle α , that is an acute angle between the main fold and the reverse fold, the angle of deflection Φ and the angle of opening between the main folds δ , determine the geometric relationship between the two categories of folds (fig.2). When $\Phi=180$ and $\delta=180$ the surface is lying on the floor, on the contrary it is fully closed when $\delta=0$ and $\Phi=180-2\alpha$ (5). There are three structural families of folding:

- dense, disordered tessellation (the plan may become deformed with endless configurations in the space);
- tessellation composed by polygons that are different among them (the surface reaches a specific configuration in accordance with the folds);
- division of the surface into groups of tiles that are identical among them (the surface assumes many possible configurations in the space).

The last case presents an infinity of possible configurations between two values: from the flat configuration to the configuration in which the shape cannot move because the vertices, or the edges, are touching.

This third type is certainly the most interesting one for architectural or engineering applications. In particular, Yoshimura tessellation and Miura Ori tessellation are the most studied in literature and the most used in practice. The Yoshimura pattern (or Diamond pattern) is characterized by a series of longitudinal folds, crossed by opposite reverse folds that generate a continuous inversion between the mountain and the valley folds. This kind of tessellation tends to close the surface on itself, by approaching the geometry of a cylinder. Depending on the distribution of reverse folds, the generated tiles can be triangular or quadrilateral. In the case of quadrilateral tiles there is a rectilinear preferential direction of the structure movement, from flat configuration to that in which all vertices are touching. On the contrary, the

di intrattenimento, alla sistemazione temporanea dei migranti, alla protezione dei beni culturali. In questi settori, infatti, è possibile sfruttare a pieno le prestazioni di leggerezza e reversibilità di questo tipo di strutture, riducendo i costi di trasporto e accelerandone l'allestimento, sfruttando anche la forte capacità comunicativa delle geometrie impiegate.

3. ARCHITETTURE PIEGABILI

La geometria che governa le superfici piegabili attinge al mondo dell'arte orientale degli Origami il cui elemento strutturante è la piega. La piega permette 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 e pieghe di valle a seconda che esse tendano a spostarsi, chiudendosi, nella direzione positiva o negativa della Z. Una seconda piega[4]o reverse fold è una ulteriore tecnica fondamentale degli Origami [5]. Questa è una piega trasversale rispetto ad una piega principale che determina in quest'ultima un'inversione del tipo di piega. 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 le due categorie di pieghe è determinata dall'angolo fisso α , angolo acuto determinato fra la piega principale e la reverse fold, dall'angolo di inflessione Φ e dall'angolo di apertura tra le pieghe principali δ (fig.2). Quando $\Phi=180$ e $\delta=180$ la superficie è distesa sul piano, mentre risulta completamente chiusa quando $\delta=0$ e $\Phi=180-2\alpha$ (5).

In letteratura vengono individuate tre famiglie strutturali di pieghe:

- tassellazione fitta e disordinata

triangular tile pattern gives more degrees of movement to the surface along the rectilinear direction.

The Miura Ori pattern (or Herringbone Pattern) is also characterized by a repetition of longitudinal folds crossed by reverse folds; but in this case the latter ones are repeated in a concordant way. Generated tessellation wrinkles the surface, though it tends to maintain its flat configuration. The generated tiles are quadrilaterals and the movement imposed on a tassel univocally affects the entire surface (Fig. 3).

The mentioned geometric, kinetic complexity makes it necessary a control through simple, iterative methods that can be implemented through the Parametric Design, an expression that indicates the definition of three-dimensional models, by using an algorithm. This name derives from the central role of the input data, the parameters, through which you can create the link between geometry and building material [7] or environmental data. The result is a complex system where the particular and the general are continually in contact; at any time, you can get a fast reconfiguration of the pattern by adjusting the parameters explained in the algorithmic sequences.

(il piano può deformarsi assumendo nello spazio infinite configurazioni);

- tassellazione composta da poligoni differenti tra loro (la superficie raggiunge, attraverso la piega, una configurazione specifica);

- divisione del piano in gruppi di tasselli uguali tra di loro (la superficie assume nello spazio molte configurazioni possibili).

Quest'ultima presenta una infinità di configurazioni possibili tra due valori: dalla forma distesa sul piano fino alla configurazione in cui la forma non può muoversi perché i lati o i vertici si toccano.

Questo terzo tipo rappresenta sicuramente quello più interessante per le applicazioni architettoniche o ingegneristiche. In particolare le tassellazioni più studiate in letteratura ed utilizzate nella pratica sono la Yoshimura e la Miura Ori.

Lo Yoshimura pattern (o Diamond pattern) 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 sé stessa avvicinandosi alla geometria di un cilindro. A seconda della distribuzione delle reverse fold i tasselli generati possono essere triangolari o quadrilateri. In caso

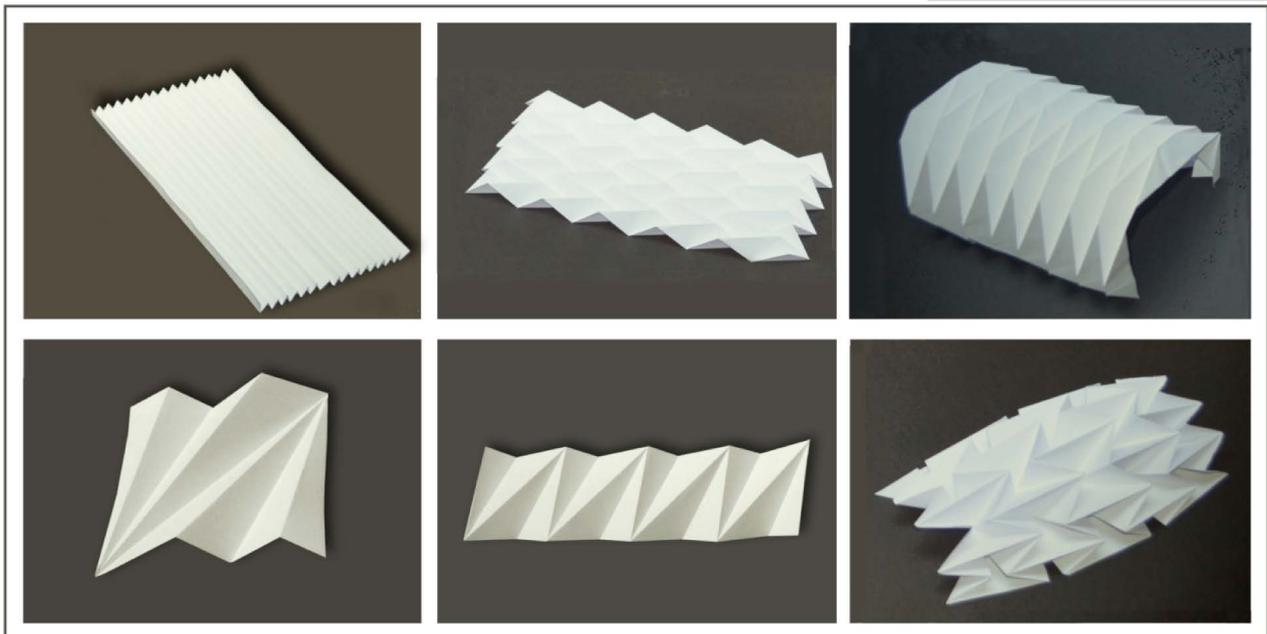


Figure 4. Pattern with triangular and quadrilateral tiles.

4. THE CONCEPT OF KREO

KREO (Kinetic, Responsive Envelop by Origami) is the project of an advanced architectural component that has a high degree of kinematic motion, that is the ability to be folded back on itself.

From the constructive point of view, KREO consists of a thin sheet of composite

di tasselli quadrilateri esiste una direzione preferenziale rettilinea di movimento della struttura, dalla configurazione completamente distesa sul piano a quella in cui tutti i vertici si toccano. Il pattern a tasselli triangolari conferisce, invece, alla superficie ulteriori gradi di movimento oltre la direzione rettilinea.

Il Miura Ori pattern (o Herringbone Pattern) è anch'esso caratterizzato da una ripetizione di pieghe longitudinali attraversate da reverse fold, ma

material, on which the mountain and valley folds are realized by following the adopted pattern. Then, this element is connected to a structure consisting of vertical supports, made of metal or wood, and horizontal elements, that are wires or steel bars. There are also other components such as the substructure elements and the manual or automated movement system.

There are two different versions. The first for the protection of archaeological excavation areas, in which lightness and mobility are required. Its structure is made of aluminium profiles and it is laid directly on the ground, regardless of specific foundation works, in fact it is ballasted. The covering surface can be stretched or closed manually, as necessary.

The second version is designed as a permanent protection for an archaeological site opened to visitors. In this case, KREO structure is fixed and it is made of welded, painted tubular steel elements. The foundation consists of prefabricated plinths and the movement of the cover surface is mechanized.

5. METHODOLOGY

Implementation and testing of the base composite material are carried out through laboratory experiments in collaboration with the Institute for Polymers, Composites and Biomaterials (IPCB) of CNR of Catania. This collaboration has helped to optimize a flexible, composite, pre-folded material achieved by using a matrix of TPE (Thermoplastic Elastomer) and a fabric reinforcement. The choice of a thermoplastic is linked to the type of cross-linking of the structures which, unlike the most common thermoset elastomers, allows malleability at high temperatures, so making it possible the subsequent folding step, on the base of a specific tessellation. The product has been obtained by thermoforming thin films in hot press, by alternating TPE and reinforcing fibres. Two versions of it have been optimized. The first one is with a hemp fabric, while the second version is with glass fibre.

As the matrix, we have chosen SEBS (Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene), a TPE that has adequate resistance to weather, high toughness, good impact resistance and, finally, aptitude to be processed by thermoforming. We made about 25 samples, varying the production parameters (matrix-reinforcement ratio, thermoforming pressure, time of thermoforming, agents for the detachment from the press). The samples were subjected to various analyses: visual analysis, sensitive analysis and measures of the final thickness. Thanks to them it was possible to achieve the optimization of the ratio between the matrix and the reinforcement material. The final result was a good interface between matrix and reinforcement, the absence of air bubbles, constant thickness, minimization of the matrix with respect to the reinforcement.

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 (fig. 3).

La citata complessità geometrica e cinetica rende necessario il controllo attraverso metodi semplici e iterativi che è possibile implementare attraverso il Parametric Design, espressione che indica la definizione di modelli tridimensionali mediante un algoritmo. Il nome deriva proprio dal ruolo centrale dei dati iniziali di input, i parametri, attraverso i quali si può creare l'anello di collegamento tra la forma geometrica e il materiale da costruzione utilizzato[7]o i 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.

4. IL CONCEPT DI KREO

KREO (Kinetic, Responsive Envelop by Origami) è il progetto di un componente architettonico avanzato che possiede un elevato grado di cinematismo, grazie alla possibilità di essere ripiegato su sé stesso.

Dal punto di vista costruttivo KREO è formato da un foglio sottile in materiale composito, su cui sono realizzate le pieghe di monte e di valle, secondo il pattern adottato. Tale elemento viene poi accoppiato ad una struttura portante costituita da appoggi verticali, tipicamente in metallo o in legno, ed elementi orizzontali, in cavetti o barre di acciaio.

Completano il tutto altri componenti secondari di corredo quali l'apparecchio di appoggio al terreno ed il sistema per la movimentazione meccanica, manuale o automatizzata.

Sono previsti due differenti allestimenti. Il primo, per la protezione delle aree di scavo archeologico, in cui viene privilegiata la leggerezza e la spostabilità. La struttura portante è in profili in alluminio e viene posata direttamente sul terreno, senza opere di fondazione fisse, e viene zavorrata. La superficie di copertura può essere stessa o raccolta manualmente, secondo i bisogni.

Il secondo allestimento è pensato come protezione permanente di un bene archeologico esposto al pubblico.

In questo caso la struttura portante di KREO è fissa ed è realizzata in tubolari in acciaio saldati e verniciati. Il vincolo al suolo è costituito da con una fondazione prefabbricata in plinti a bicchiere. La movimentazione della superficie di copertura è meccanizzata.

5. METODOLOGIA

L'implementazione e le verifiche sul materiale vengono realizzate con sperimentazioni di laboratorio sui materiali compositi grazie alla collaborazione con l'Istituto per i Polimeri, Compositi e Biomateriali (IPCB) del CNR di Catania. La collaborazione ha consentito di ottimizzare un materiale composito

The specimens that passed these first analyses were subjected to a mechanical characterization method that uses uniaxial tensile tests and follows the EN ISO 527-4 directives.

The next step will be oriented to the development of the folding procedure. To get this purpose, we have already tested some handicraft procedures, starting from which, a protocol will be defined in relation with the industrial production process.

We will then go on with the parametric design of a virtual model, and finally with the construction of a physical prototype, to perform some mechanical, structural analysis.

6. INNOVATION OF THE PROPOSAL

KREO is an innovative and performing component. Its high flexibility makes it suitable to be used in wide range of situations, with various pragmatic implications. As said, the first hypothesis of application is the covering of archaeological areas, with two aims: to get higher preservation levels and to increase touristic fruition, thanks to better comfort conditions.

At present, protections of archaeological areas are made with several, various solutions.

During the excavation and the study of finds, economic resources are not enough to provide a protective structure, almost always. Where it is possible, corrugated sheet with steel tubes is used, that is a very inflexible solution, without aesthetic form.

Firstly, the alternative offered by KREO shows a lower cost, thanks to the possibility to reuse it for a high number of cycles. But the expression “cost” can assume a wider meaning, if you take into account that the economic cost is only a part of the environmental cost. In this sense, the use of KREO is advantageous, if you consider that the utilized raw materials are potentially recyclable and also possibly recycled.

Another improvement is their easy transportability. In fact, while the common structures are fix, KREO can be easily moved, to follow the development of excavation. This ability is due not only to the low weight of its component, but also to the possibility of packaging the covering surface. In addition, the componibility of modules with small size, allows to cover large areas in a quick, flexible way. Obviously, in order to exploit this advantage, the design of the module must be addressed to facilitate assembly and disassembly, which don't require skilled workers or specific tools.

Once archaeological areas are open to visitors, protection structures are

flessibile pre-piegabile realizzato utilizzando una matrice in TPE (TermoplasticElastomer) e un rinforzo in tessuto in fibre. La scelta di un termoplastico è legata al tipo di reticolazione delle sue strutture che, al contrario dei più comuni elastomeri termoindurenti, ne consente la modellabilità a caldo, rendendo possibile la successiva fase di piegatura secondo una specifica tassellazione. Il prodotto è stato realizzato tramite termoformatura mediante stampaggio in pressa a caldo di film sottili, alternando il TPE ai fogli di rinforzo. Sono state ottimizzate due versioni: nella prima è stato impiegato un tessuto in canapa; nella seconda invece è stata utilizzata la fibra di vetro. Come matrice la scelta è ricaduta sul SEBS (Stirene-Etilene-Butilene-Stirene), un TPE che possiede adeguata resistenza agli agenti atmosferici, elevata tenacità e buona resistenza agli urti ed infine facilità di lavorazione tramite termoformatura. Sono stati realizzati circa 25 campioni, variando i parametri di produzione (rapporto matrice-rinforzo, pressione di termoformatura, tempi di sottoposizione a termoformatura, agenti per il distacco dalla pressa). I campioni sono stati sottoposti ad analisi visiva, analisi al tatto e dalla misurazione dello spessore finale, per ottenere l'ottimizzazione della proporzione tra matrice e rinforzo (buona compenetrazione tra matrice e rinforzo, assenza di bolle d'aria, minimizzazione della matrice rispetto al rinforzo, spessori costanti). I provini che hanno superato queste prime analisi sono stati sottoposti ad un procedimento di caratterizzazione meccanica tramite prove di trazione monoassiale condotte seguendo le direttive delle norme EN ISO 527-4. Il successivo passaggio sarà orientato alla messa a punto della procedura di piegatura. A questo scopo sono state già condotte alcune prove con una procedura artigianale; partendo da queste, verrà definito un protocollo in relazione al processo produttivo di tipo industriale. Si procederà quindi alla progettazione parametrica di un modello virtuale ed infine alla costruzione di un prototipo fisico, per effettuare alcune analisi meccaniche e costruttive.

6. ORIGINALITÀ DELLA PROPOSTA

KREO si presenta come un componente fortemente innovativo e performante. L'elevata flessibilità d'uso lo rende adatto ad un ampio novero di impieghi, con risvolti anche pragmatici. Come già detto, il primo impiego ipotizzato è la copertura delle aree archeologiche, con il fine di innalzare il livello di salvaguardia del patrimonio e di incrementare la fruizione turistica, garantendo migliori condizioni di comfort. Allo stato attuale la protezione delle aree archeologiche avviene utilizzando soluzioni di varia natura. Nella fase di scavo e di studio dei ritrovamenti, sovente i fondi non sono sufficienti a consentire il montaggio di una struttura protettiva. Ove possibile, vengono utilizzate lamiere ondulate montate su tubolari in acciaio, una soluzione rigida e priva di valenze estetiche.

often invasive compared with the heritage to preserve. Considering existent solutions [8], KREO shows a series of evident advantages, first of all, its kinematism linked with its geometrical pattern. In fact, the adopted pattern offers the possibility of folding and packaging the covering surface, when it is not useful, so reducing the visual disturbance of it. But folds, as (it has been) already said, together with kinematism, corrugate the surface. So you have an additional form resistance. Therefore, thanks to KREO, it is possible to improve the covered span, in comparison with a similar not corrugated material. So, it is possible to reduce the number or the dimension of the supports of the load bearing structure and minimize their impact.

KREO's kinematism is associated with its responsivity, i.e. the ability to change its form and adapt its efficiency to environmental conditions, such as rain, wind, sunshine, ... In fact, the new pattern's configuration changes the performance of the corrugated surface, according with the needs of the users. In general, KREO has a high level of sustainability. In the last years this concept, in the architecture field, has been addressed especially to energy saving. Vice versa, in this case, this expression assumes a wider meaning, if you consider the wide range of solutions and performances that KREO has.

7. STATE OF RESEARCH AND FUTURE DEVELOPMENTS

KREO started in the last part of 2014 and foresees the realization of a prototype in three years.

The first work package of this research was the analysis of the state of art. It allowed us to define the field of the research, that before was extended to the entire sector of kinematic architecture. Thanks to it, our attention was addressed to the typology to which the module belongs, that is a mobile membrane with a light load bearing structure, and the possible application field of it.

Successively, we proceeded with the design of the base material and its characterization. We obtained two composites with suitable performances; so, the technology to make the folds, will be experimented on both of them.

Next year, we will continue with the design of a case study. In particular, as already said, three different study cases will be assumed, to verify the use of KREO in the possible alternatives considered so far (realization of a provisional cover for an archaeological excavation area, final cover for a visitable archaeological area, covering of an archaeological area useful for theatre performances). In the plans we will have a particularly attention to the formal relation with the landscape, to the design of the load bearing structure

L'alternativa proposta con KREO presenta innanzi tutto un costo contenuto, grazie alla possibilità di riutilizzare il componente per uno svariato numero di volte. Ma il termine "costo" può essere interpretato in maniera più ampia, riferendosi, oltre al prezzo economico, a quello ambientale. In questo senso il manufatto in analisi ha un comportamento particolarmente virtuoso se si considera che le materie base utilizzate sono riciclabili e virtualmente provenienti a loro volta dal riciclo.

Un altro requisito migliorativo è la trasportabilità. Infatti, mentre le strutture di comune impiego sono fisse, KREO può essere facilmente spostato, per seguire lo sviluppo delle aree di scavo. Ciò è dovuto non solo alla leggerezza dei componenti, ma alla possibilità di impacchettamento del manto di copertura. Inoltre, la componibilità di più moduli di dimensioni contenute, consente di coprire grandi aree in maniera rapida e flessibile. Ovviamente per rendere reale questo vantaggio il componente è progettato in modo da agevolare le fasi di montaggio e smontaggio, rendendole eseguibili anche da personale non esperto, privo di utensili particolari.

Nella fase successiva, di apertura delle aree al pubblico, le strutture di protezione, quando il budget lo consente, risultano spesso invasive, se non prevaricanti, rispetto ai reperti da salvaguardare. Rispetto alle soluzioni esistenti [8] KREO presenta una serie di vantaggi piuttosto evidenti. Primo tra tutti il cinematismo insito nella geometria adottata. Il pattern scelto infatti consente alla superficie di essere ripiegata e impacchettata quando non più necessaria, riducendo il disturbo visivo. Ma la piegatura della superficie, come detto, oltre alla possibilità di cinematismo, rende la superficie corrugata. Il che comporta l'insorgenza di una resistenza aggiuntiva, per forma. Pertanto grazie a KREO è possibile quindi aumentare la luce coperta, rispetto ad un analogo materiale non corrugato, riducendo di conseguenza il numero di punti di appoggio e la loro invasività, oppure assottigliare la consistenza della struttura e minimizzarne così l'impatto.

Al cinematismo è associata la responsività, ossia la capacità del manufatto di variare la sua forma in opera e modificare la sua efficienza rispetto alle condizioni ambientali, quali la pioggia, il vento, la posizione del sole, ... Infatti una nuova configurazione del pattern, altera le prestazioni della superficie corrugata in ordine al comportamento meccanico.

Considerando KREO nel suo insieme è possibile percepire il suo elevato livello di sostenibilità. Negli ultimi anni tale concetto, nell'ambito dei componenti edilizi, è stato limitato alla possibilità di ridurre il dispendio energetico. Nel caso specifico, viceversa, il termine assume un significato più ampio se si considera il ricco ventaglio di prestazioni che KREO è in grado di garantire.

7. STATO DELLA RICERCA E SVILUPPI SIGNIFICATIVI

Il progetto KREO è stato avviato

and to the possibility of moving and controlling the covering surface. In the third year of the research, we will realize a prototype in real scale. Thanks to an agreement with the Superintendence for Cultural Heritage, that is under definition, it will be possible to use KREO in their projects. At the same time, we are in contact with some companies which are potentially interested in producing and commercializing KREO in other sectors; they also could become sponsors and offer economic help to improve our project. At the end of the research, KREO will be patented and we will found a Spin-off.

nell'ultimo scorcio del 2014 e prevede la realizzazione di un prototipo nell'arco di tre anni. La prima fase affrontata è stata l'analisi dello stato dell'arte. Questa ha consentito di definire il campo della ricerca, inizialmente esteso a tutto il settore dell'architettura dotata di cinematisimo, alla tipologia del componente, ossia a membrana supportata da elementi mobili, e i possibili campi di applicazione del manufatto in progetto. Successivamente si è passato alla progettazione del materiale di base, alla sua caratterizzazione. Ciò ha consentito di ottenere due composti con prestazioni idonee, sui quali verrà sperimentata la tecnologia per la

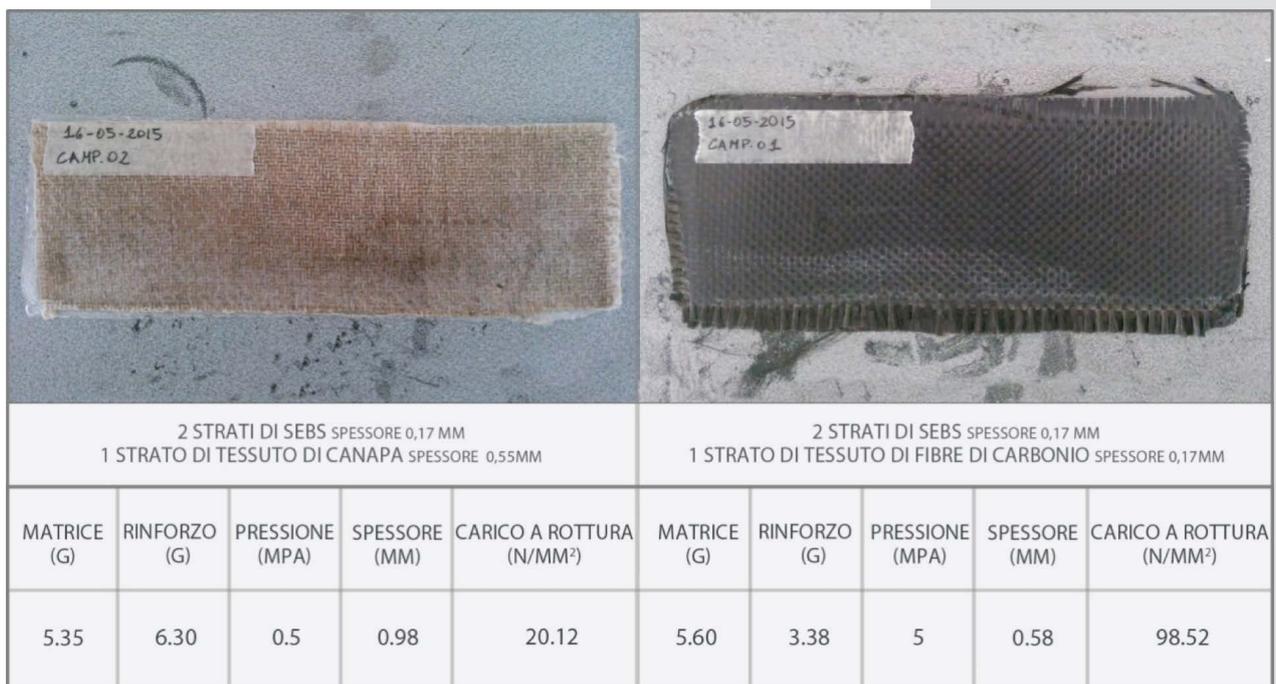


Figure 5. Characteristic parameters of the samples realized in the laboratory of CNR.

8. CONCLUSION

Kinetic architectures form a set of the contemporary architecture with a large number of interesting aspects. Among them, the foldable architectures are the most promising subset; in fact, movement allows changes of configuration, so amplifying performances (flexibility, responsivity, lightweight, ...). This type of constructions is particularly suitable to give an answer to the contemporary, complex, increasing needs of our society.

The project KREO, which is developing at DICAR of Catania, in collaboration with CNR of Catania, is addressed to realize a particular type of foldable surface. It will be used for the protection of archaeological heritage, to minimize the exposition to environmental risks and to facilitate safety fruition. At the moment, the preliminary work packages of the research have been

formazione di piegatura. Il prossimo anno di lavoro verrà dedicato alla progettazione esecutiva di più casi studio. In particolare, come già accennato, verranno presi in considerazione tre casi studio differenti per la realizzazione delle alternative possibili sin ora individuate (realizzazione di copertura provvisoria di aree di scavo, copertura fissa di un'area archeologica visitabile, copertura di un'area archeologica destinata a rappresentazioni teatrali). Verrà quindi curata l'ambientazione formale e funzionale del manufatto, il disegno della struttura di sostegno, la possibilità di controllo e movimentazione della superficie di copertura. Il terzo anno della ricerca verrà destinato alla realizzazione di un prototipo in scala reale. Un accordo con la Soprintendenza, in corso di formalizzazione, prevede di poter utilizzare KREO nell'ambito delle attività progettuali dell'Ente. Parallelamente, sono in corso di formalizzazione alcuni contatti

completed, with the definition of the base material. The realization of various simulations of its use is programmed. The research will be concluded with the realization of a prototype.

9. ACKNOWLEDGEMENT

The work group is composed of the authors of this article, Giuseppe Recca (CNR of Catania) and Massimo Cuomo (DICAR of Catania).

10. REFERENCES

- [1] Germanà M.L., *La vulnerabilità del patrimonio architettonico: tipologie di rischio ed affidabilità degli interventi. Vulnerability of 20th Century Cultural Heritage Hazards and Prevention Measures*. Rhodes; 2002. p. 673–80.
- [2] Ferroni A.M., Cacace C., Carta del rischio: la vulnerabilità archeologica. 2010.
- [3] Otto F., *I LEK/IL5*. Stuttgart: ILEK press; 1972.
- [4] Casale A., Valenti G.M., *Architettura delle superfici piegate. Le geometrie che muovono gli origami*. Roma: Edizioni Kappa; 2012.
- [5] Buri H., Weinand Y., *ORIGAMI-folded plate structures, architecture. 10th World Conf Timber Eng [Internet]*. 2008; Available from: http://www.academia.edu/download/30357534/00c08a04_origami_arch_f.pdf
- [6] Schenk M., Guest S.D., Geometry of Miura-folded metamaterials. *Proc Natl Acad Sci [Internet]*. 2013;110(9):3276–81. Available from: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1217998110>
- [7] Tedeschi A., *AAD. Algorithms-aided design*. Brienza: Le Pensur; 2014.
- [8] Indrigo A., Pedersoli A., *Iuav 81. Archeologia e contemporaneo*. Venezia: Grafiche Veneziane; 2010.

con varie aziende potenzialmente interessate alla produzione e commercializzazione di KREO in altri settori, in modo da trovare una possibilità di sponsorizzazione che copra i costi di una implementazione. Gli studi verranno conclusi con l'apposizione di un brevetto sul manufatto sperimentato, con l'avvio di uno Spin-off.

8. CONCLUSIONI

Le architetture dotate di cinematiso sono un settore dell'architettura contemporanea che rivela numerosi aspetti di interesse. Tra esse quelle foldable costituiscono il sottoinsieme più promettente; infatti in esse il movimento consente di variare la configurazione, ampliando il novero delle prestazioni offerte (flessibilità, responsività, leggerezza, ...). Grazie ad essa questo tipo di costruzioni è particolarmente adatto a fornire una risposta alle esigenze più complesse della società contemporanea.

Il progetto KREO, attualmente in corso di sviluppo presso in DICAR ed il CNR di Catania, è orientato alla realizzazione di un particolare tipo di superficie ripiegabile, destinata alla protezione di beni archeologici, in modo da mitigarne l'esposizione al rischio ambientale e favorirne la fruizione in sicurezza. Al momento sono state concluse le fasi preliminari della ricerca, con la definizione del materiale base. È stata programmata la realizzazione di varie simulazioni a cui seguirà la costruzione di un prototipo.

9. RINGRAZIAMENTI

Il gruppo di lavoro comprende, oltre gli autori, l'ing. Giuseppe Recca del CNR di Catania e il prof. Massimo Cuomo, del DICAR di Catania.