

# IL MONITORAGGIO DELLE AREE ARCHEOLOGICHE PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL PROGETTO DELLE COPERTURE

Elena Romoli<sup>1</sup>, Alessandra Zanelli<sup>2</sup>, Elisabetta Rosina<sup>2</sup>, Elisabetta Rotta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Soprintendenza per i Beni Archeologici delle province di Cagliari e Oristano

<sup>2</sup> Politecnico di Milano, dip. ABC

## ABSTRACT

The aim to keep the original architectures and decoration in their excavation site, that has been emerging in the last years, requires to protect them by temporary or definitive shelters. Soprintendenza per i Beni Archeologici of Cagliari and Oristano promoted and started monitoring four shelters already existing on the archaeological areas of these provinces, with the aim to check the effectiveness in the local environment, and to plan their improvement or/and new structures. Politecnico di Milano collaborated at the research by monitoring the environment and remains conditions, especially underneath the shelters, modelling the effects of the existing shelters and planning new solutions. In San Cromazio (Villaspeciosa), monitoring the new definitive shelter allowed the researchers to discover the critical points and to find out their improvement. In Su Monte (Sorradile), monitoring allowed the researchers to define the expected performances of the new shelter. In San Saturnino (Cagliari) monitoring and numerical analysis was applied to 2D and 3D models for improving the ventilation of the volume underneath the new shelter. In Nora (Pula) the results of monitoring and the innovative approach of design served to check the performances of the present temporary shelters. Nora approach shows how to overcome the limits of current protective systems, combining the requirements for preservation with new issues as feasibility of technical textiles, low maintenance and easy deconstruction to allow the reuse and adaptability of shelters in different locations and seasons. The ultimate goal was to renovate the design process by covering archaeological sites in a more environmentally conscious way and without the least destruction of the site.

**Parole chiave/Key-words:** Archaeological site, shelter, moisture, design, technical textiles, ventilation, solar irradiation, Sardinia.

## 1. Attività di studio della Soprintendenza per la protezione dei beni archeologici nelle province di Cagliari e Oristano

L'acquisizione di nuovi dati provenienti dall'attività di scavo e messa in luce di strutture e manufatti antichi, se è essenziale per l'implementazione della conoscenza, comporta necessariamente l'impegno alla loro conservazione. Così il mantenimento dei siti archeologici restituiti alla contemporaneità, che per la loro intrinseca delicatezza subiscono un rapido degrado dovuto all'aggressione ambientale, richiede l'attivazione di processi, apparati e tecnologie volti ad assicurarne la sopravvivenza.

"Salvaguardia" e "restauro" sono le attività relative ai beni tutelati individuate dalla Circolare n. 117 del 6 aprile 1972 del Ministero della Pubblica Istruzione, più nota come Carta Italiana del restauro 1972, mentre nello specifico del punto 3 dell'art. 6 è indicato con nettezza che «sono proibiti indistintamente, per tutte le opere d'arte di cui agli artt. 1, 2 e 3: (...) rimozione, ricostruzione o ricollocamento in luoghi diversi da quelli originari; a meno che ciò non sia determinato da superiori ragioni di conservazione»: a tali prescrizioni occorre attenersi nell'esercizio della tutela da parte degli organismi statali. Pertanto nei siti di rinvenimento vanno mantenuti in condizioni di efficienza, quanto più possibile, quei reperti immobili che meglio ne testimoniano gli antichi usi, quali mosaici, pavimentazioni, intonaci, affreschi, colonne, decorazioni, sarcofagi, ecc, che lasciati alle intemperie non potrebbero sfuggire al disfacimento, poiché sovente erano stati realizzati per ambienti coperti. In Sardegna, tra gli anni Cinquanta e Sessanta del Novecento, si svolgono importanti campagne di scavo condotte dal Soprintendente Gennaro Pesce e concluse dal successore Ferruccio Barreca, che rimettono in luce le città di Nora e Tharros, oltre a numerosissimi siti e monumenti tra cui le strutture tardoimperiali dell'abitato di San Cromazio a Villaspeciosa. Nel corso dei cantieri vengono predisposti contestuali interventi di consolidamento delle strutture murarie e di restauro, in particolare delle pavimentazioni a mosaico, comprese le relative opere di protezione quali diverse tettoie, rimaste in funzione per molto tempo. Negli anni seguenti si è poi provveduto a restaurare e a proteggere con coperture altri importanti scavi, nella stessa Nora, così come nell'area di particolare interesse della necropoli tardo romana della basilica cagliaritana di San Saturnino, messa in luce tra il 1993 e il 1998, e nell'edificio culturale di epoca nuragica di Sorradile, scavato nel primo decennio del Duemila. Nella maggior parte dei casi si può notare come la presenza di strutture di copertura si sia rivelato un fattore essenziale per la conservazione dei manufatti, mentre laddove sia intervenuta la loro rimozione, l'inesorabile accentuazione del degrado e il deperimento dei beni, ne ha reso necessario l'intervento di restauro. A tal proposito elemento decisivo è la specificità ambientale e climatica del contesto, che può risultare un acceleratore fatale del deterioramento. Oggi, definitivamente sancito l'intrinseco valore paesaggistico dei beni archeologici, ulteriori istanze chiedono di essere prese in considerazione nella valutazione di interventi di protezione, quali: l'interazione del "paesaggio archeologico" col "paesaggio naturale", l'interferenza addotta da alcune coperture architettonicamente molto strutturate col contesto in genere ruderale, la presa in considerazione del *genius loci* rappresentato dalle tecniche costruttive locali. Tali sollecitazioni impongono una riflessione anche sui linguaggi, sul contenimento dei volumi, sulla removibilità, ma contestualmente contengono una potenziale richiesta di implementazione prestazionale della tecnologia dei materiali o dei sistemi.

#### **Presentazione dei casi di studio**

**San Cromazio** (fig. 1) è un insediamento d'origine tardo-imperale (1), gli scavi occupano circa 2800 mq, di cui 270 (mosaici e due sepolture) sono protetti da una tettoia realizzata nel 2007, grazie al Comune di Villaspeciosa, a doppia falda in tegole alla portoghese posate su pannelli lignei protetti da guaina impermeabile e capriate di

legno lamellare, sorretta da 10 pilastri in acciaio, dotata di sistema di smaltimento delle acque meteoriche e di impianto allontanamento dei volatili.

L'attuale copertura è da considerarsi definitiva, pertanto le osservazioni redatte sono finalizzate soprattutto alla verifica, ottimizzazione delle prestazioni e alla manutenzione, più che alla progettazione come avviene per gli altri casi di studio.

**San Saturnino** (fig. 2) è una necropoli suburbana di origini tardo-repubblicane o primo-imperiali, la cui area scavata occupa circa 1532,00 mq del sedime della Basilica di 1880 mq, di cui 1047 esterni, e circa 300 sono protetti da tettoie realizzate negli anni '90 durante gli ultimi scavi. Si tratta di protezioni provvisorie, in absesto, che necessitano di urgente sostituzione. Il monitoraggio è avvenuto quindi mentre le coperture erano installate, e i dati ricavati sono stati utili per affiancare la progettazione della copertura definitiva e per valutarne gli effetti mediante modellazione numerica CFD.

**Su Monte** (fig. 3) è un complesso culturale nuragico, gli scavi occupano circa 12000 mq, di cui 300 sono protetti da una tettoia realizzata nel 2008 che copre il tempio realizzato da due/tre corsi di isodomi sovrapposti di trachite, costituito da un ingresso a pianta trapezoidale e vano circolare con tre nicchie e altare centrale. L'attuale copertura è da considerarsi provvisoria, benché predisposta con una certa accuratezza per consentirne l'efficienza per un periodo certamente non breve, pertanto le osservazioni redatte sono finalizzate soprattutto alla predisposizione del progetto esecutivo della copertura definitiva, in corso di redazione da parte della Soprintendenza.

**Nora** (fig. 4) è una città romana costiera di origine fenicio-punica, gli scavi occupano



*Fig. 1. La copertura a San Cromazio, Villaspeciosa*



*Fig. 2. La copertura a San Saturnino, Cagliari*



*Fig. 3. La copertura a Su Monte*



*Fig. 4. La copertura a Nora.*

circa 109.219 mq circa di cui 51 (una cisterna e i resti di murature decorate di un'abitazione) sono protetti da una tettoia realizzata nel 2002, la struttura è realizzata da una maglia regolare, da scatolari metallici con un interasse di 5 m, ancorati da plinti in cemento che poggiano all'esterno dei vani. La copertura, ad un solo spiovente ed è realizzata in tessuto. Le travi principali e secondarie sono reticolari. Non è presente alcun sistema di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche né di protezione dai volatili.

### **3. Indicazioni sul microclima e sugli effetti delle attuali coperture**

I monitoraggi microclimatici condotti dal 2005 ed attualmente in corso nelle quattro aree archeologiche hanno fornito i seguenti risultati (2):

1) I picchi di temperatura delle superfici dei reperti sono dovuti soprattutto all'irraggiamento solare e alla radiazione riflessa, in tutte le stagioni si raggiungono valori  $>40^{\circ}\text{C}$  per le superfici esposte all'irraggiamento diretto, mentre sotto le tettoie le temperature sono inferiori anche di  $20\text{-}35^{\circ}\text{C}$ , in dipendenza dell'orientamento e quindi della componente di radiazione obliqua che raggiunge le pareti che risultano non schermate verticalmente).

2) L'umidità ambientale è molto elevata (oltre il 70%) durante la notte in tutte le aree, e si osservano brusche diminuzioni nel corso delle giornate soleggiate, fino al 50% nel corso delle prime ore dopo l'alba.

Nonostante le differenze, è possibile trarre alcune osservazioni sulla funzionalità delle coperture e sulla loro possibile incidenza sul degrado dei manufatti paragonando i gradienti termici e di umidità che si verificano sotto e fuori le tettoie: le temperature minime dell'aria risultano le medesime in estate, mentre le massime sono lievemente inferiori sotto la copertura definitiva di San Cromazio.

Per quel che riguarda l'estensione dell'area di maggior protezione, tutte le coperture presentano un'area di minima efficienza in prossimità del bordo, in cui si rilevano le variazioni più ampie e frequenti: l'ampiezza di questa fascia dipende sia dall'altezza della copertura, sia dalla sua sporgenza rispetto alla superficie da proteggere, e dall'inclinazione rispetto alla direzione più obliqua dell'irraggiamento solare (alla sera e alla mattina). I gradienti che si misurano durante le condizioni di transitorio termico sono minori sotto le coperture: le temperature sia dell'aria sia delle superfici sono più elevate durante la notte, tranne che a Nora, e quindi nei mesi invernali si rileva un minor rischio di condensazione rispetto a quanto avviene all'esterno.

Le coperture influiscono invece poco significativamente sui gradienti di UR. Le brusche, ampie e rapide variazioni di UR sono un fattore di elevato rischio per la conservazione delle superfici dei materiali lapidei naturali e artificiali, che a causa della crescita di efflorescenze saline incorrono in degradi via via più gravi.

Nell'area di San Saturnino si rileva inoltre una scarsa ventilazione naturale per la posizione (in centro città), la conformazione del sito e la presenza della chiesa, e di un alto muro perimetrale che scherma i reperti anche dai venti ricorrenti. Sulla base dell'analisi prestazionale delle coperture presenti in merito alla loro capacità di mitigare i fattori di rischio per la conservazione, si è provveduto a redigere le opportune specifiche per il progetto di nuove coperture che ora sono in procinto di

essere realizzate e per le modifiche che occorre apportare ai progetti esistenti. I requisiti prestazionali che sono risultati comuni a tutte le coperture, esistenti ed in progettazione riguardano:

*1) Massima conservazione materica delle strutture in opera e significano:*

- Evitare interferenze tra i nuovi appoggi e le preesistenze antiche, limitandone l'estensione e soprattutto lo scavo fondazionale, la cui posizione viene determinata dalla presenza degli isodomi e dei reperti. Ridurre al minimo il contatto fisico tra gli elementi della nuova struttura e gli antichi manufatti.
- Reversibilità di tutti i dispositivi, specialmente negli appoggi e negli ancoraggi.
- Massima protezione dai rischi ambientali;
- Protezione del sito da agenti atmosferici.
- Garantire un microclima favorevole alla conservazione dei reperti mediante la regolazione del passaggio di aria e luce in ogni stagione
- Eliminare l'irraggiamento diretto della luce solare laterale con protezioni verticali removibili sui lati est e sud ovest.
- Controllo del regime delle acque meteoriche sul piano di copertura, loro raccolta, discesa al piede della struttura, e allontanamento delle acque dal sito protetto.
- Protezione da animali (nidificazione e presenza di uccelli, animali randagi o selvatici), in concomitanza delle azioni manutentive e di protezione che debbono essere messe a punto per evitare l'intrusione nell'area.

*2) Progettazione con materiali e tecniche compatibili alla funzione ed al luogo*

- Sicurezza per i fruitori ed i reperti e stabilità della struttura.
- Scelta di materiali adeguati per resistenza, peso specifico e durabilità.
- Scelta di materiali ad elevata capacità isolante che permettano di garantire un microclima ottimale per la conservazione e la compatibilità con i materiali protetti.
- Illuminazione naturale sufficiente per la fruizione diurna dei reperti sotto copertura.

*3) Modularità e flessibilità*

- Modularità degli elementi strutturali per renderli adattabili ad eventuali ampliamenti delle coperture nei settori ancora non scavati.
- Flessibilità: possibilità di variare il modulo base della struttura, con la disposizione di eventuali punti di appoggio al di fuori della rigida maglia.

*4) Sostenibilità*

- Il sistema di protezione deve consentire il trasporto dei vari componenti con piccoli mezzi e essere montabile in tempi brevi e senza particolari difficoltà.
- Scelta di soluzioni a basso costo, ma adeguate agli standard richiesti, estendibili anche su grandi aree archeologiche.
- Possibilità di recuperare e riutilizzare gli elementi costituenti la copertura in caso di smontaggio e rimontaggio presso un altro sito archeologico.
- Facilità di manutenzione: sostituibilità di tutti gli elementi deteriorabili, possibilità di eseguire facilmente trattamenti manutentivi per prevenire degrado e alterazioni.

Questi requisiti sono in parte raggiunti tramite la copertura definitiva di San Cromazio ma rappresentano indicazioni prioritarie per la progettazione delle coperture definitive

di Sorradile, San Saturnino e di Nora, poiché le attuali, provvisorie, adempiono minimamente alle necessità espresse.

### **3.1 Area di San Cromazio a Villaspeciosa (Ca)e di Su Monte a Sorradile**

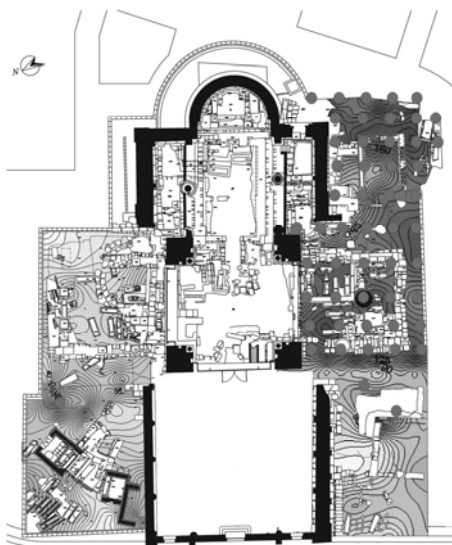
Dal monitoraggio effettuato si evincono alcune criticità delle attuali tettoie (3):

1) la radiazione solare raggiunge i mosaici, sia in forma diffusa che come irraggiamento tramite la copertura, provocando sbilanci termici nei materiali in opera.  
2) La copertura ostacola parzialmente il moto ascensionale di masse di aria più umida e calda che si verifica durante le escursioni giornaliere a seguito dell'irraggiamento solare; tali masse di aria più umida ristagnano in prossimità dell'intradosso della copertura e durante il raffreddamento notturno si possono verificare fenomeni di condensazione sulle superfici della copertura, sul telaio metallico e quindi percolamenti sui conci sottostanti.

3) La condensazione notturna, non legata necessariamente alla copertura, e la sua rapida evaporazione nelle prime ore di irraggiamento solare sono causa di degrado.

Pertanto si propone di soddisfare i requisiti 1) e 2) esposti nel precedente paragrafo, implementando la struttura esistente migliorando la tenuta all'acqua anche con l'aggiunta della canalizzazione e smaltimento dell'acqua al piede della struttura. Inoltre occorre modificare le falde al fine di permettere il passaggio di aria ma non di acqua per incrementare la ventilazione, prevenendo i fenomeni di condensazione notturna, e aggiungere protezioni verticali removibili su tutti i lati per prevenire l'irraggiamento diretto quando la direzione dei raggi solari è obliqua.

### **3.2 Area di San Saturnino a Cagliari**



*Figura 5. Battuta anemometrica del giorno 9 giugno 2010, la scala dei valori di velocità dell'aria in tonalità di grigio è compresa tra 0 e 2 m/S.*

La Soprintendenza ai Beni Architettonici e Paesaggistici di Cagliari ha realizzato la progettazione della copertura definitiva, con l'intento di proteggere i reperti e insieme di offrire la possibilità di visitarli mediante un sistema di passerelle integrate alla copertura. L'elevata umidità ambientale, soprattutto nei mesi autunnali, invernali e all'inizio della primavera, costituisce un fattore di rischio per la conservazione dei reperti a causa della condensazione notturna e della rapida



*Fig. 6. San Saturnino, progetto della copertura definitiva, sezione trasversale*

evaporazione nelle prime ore del giorno. Il progetto preliminare prevedeva una ventilazione ancora insufficiente, sia perché naturale, sia per il sottodimensionamento delle griglie di aerazione. I risultati di prove sperimentali e l'utilizzo di modelli numerici bidimensionali e tridimensionali in ambito CFD (Computational Fluid Dynamics) hanno permesso di valutare la ventilazione all'interno dell'area monumentale in diverse condizioni temporali e stagionali e di simulare le possibili soluzioni per implementare il progetto, permettendo un'adeguata ventilazione per garantire le migliori condizioni di conservazione. Considerato il progetto che si andava dettagliando (fig. 6), sono state eseguite simulazioni sulla parte in cui la velocità dell'aria è risultata minore (la zona sud ovest, analisi e simulazione in fig. 7).

Sezionando lo spazio considerato secondo il passo dei pilastri della struttura di progetto sono state eseguite diverse simulazioni per verificare gli effetti dell'utilizzo di aspiratori a ventilazione naturale e forzata, in modo da estrarre l'aria più umida a contatto con le superfici dei reperti. Le simulazioni con un solo aspiratore posizionato a un estremo della copertura o a entrambi gli estremi (fig. 8) hanno permesso di verificare le migliori condizioni di ventilazione ottenibili data la forma e dimensione della copertura. La simulazione con i due estrattori passivi contrapposti mostra incrementi di velocità media, una migliore distribuzione dei moti laminari, una migliore uniformità nei moti convettivi che risulta abbastanza omogenea a livello del suolo ed è dunque da preferire. La simulazione CFD è stata di grande aiuto per migliorare il progetto al fine di ridurre i fattori di rischio per la conservazione dei reperti e nello stesso tempo realizzare un progetto integrato che possa rispondere sia ai requisiti di conservazione sia a quelli di utilizzo, fruizione, e progettazione architettonica e urbanistica di un'importante zona centrale della città.

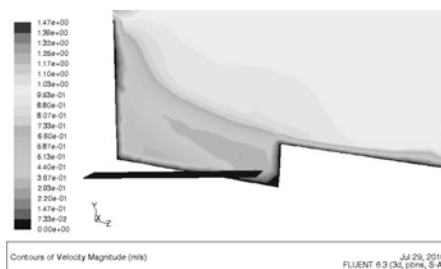


Fig. 7, Simulazione della distribuzione della velocità dell'aria nel piano sud-nord in prossimità della passerella

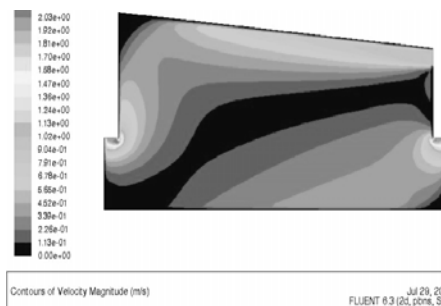


Fig.8 Distribuzione della velocità, sezione nord-sud, con l'utilizzo di due aspiratori.

### 3.4 Area di Nora a Santa Margherita di Pula (Ca)

Sulla base dei dati del monitoraggio climatico, inclusa velocità e direzione del vento raccolti dal 2007 ad oggi è stato possibile identificare i fattori di possibile rischio per la conservazione dei mosaici recentemente restaurati e che per la dimensione ridotta delle tessere in materiale lapideo, quindi dell'elevata superficie di malta di allettamento che rimane esposta, richiedono particolare protezione (4). Infatti, lo stato di conservazione dei mosaici dopo l'intervento di restauro è ottimale, ma la durata degli effetti del

restauro può essere sensibilmente abbreviata dalla mancanza di protezioni dai rischi insiti nell'ambiente. I mosaici sono costituiti da materiali porosi che reagiscono diversamente alle sollecitazioni che provengono dall'ambiente, e il degrado differenziale può aggravare le condizioni di rischio dell'intero sistema. L'esposizione agli agenti atmosferici e ai possibili depositi di guano è tra le principali cause di deterioramento dei materiali costituenti i mosaici e i prodotti del restauro (soletta, integrazioni, ecc.). Oltre a quanto rilevato per gli altri casi di studio, qui risultano critici anche i seguenti fattori:

1) La radiazione diretta è potenziata dalla riflessione offerta dalla superficie del mare.  
2) L'aerosol marino che comporta: occorre il rischio di incrementare il degrado per la presenza della miscela di sali solubili nell'aria, a causa della prossimità estrema con l'acqua marina e della direzione preferenziale dei venti che trasportano masse di aria umida e salmastra. Nel seguito sono elencate le ulteriori esigenze prestazionali che derivano dall'analisi effettuata, anche paragonando diverse tipologie di strutture (copertura tradizionale, con struttura in acciaio, plinti di fondazione, assito e coppi ed una innovativa in materiale tessile) (5), tenendo in considerazione il grado di esposizione dei reperti alla fruizione quotidiana e le attività di scavo in corso e programmate e il pregio del contesto ambientale.

#### *1) Fruibilità*

- Illuminazione naturale sufficiente per la fruizione dei reperti sotto la copertura;
- Individuare un modulo di base ed una maglia strutturale adattabile ad eventuali ampliamenti delle coperture nei settori ancora non scavati;
- Possibilità di variare il modulo individuato, con la disposizione di eventuali punti di appoggio al di fuori della rigida maglia.

#### *2) Sicurezza*

- stabilità della struttura al vento, alla corrosione, agli urti, scelta di materiali durevoli con buona resistenza meccanica e basso peso specifico,
- Facile manutenzione: sostituibilità in sicurezza di tutti gli elementi deteriorabili; facile approntamento dei trattamenti manutentivi dei vari componenti; prevenzione di fenomeni precoci di degrado e alterazioni.

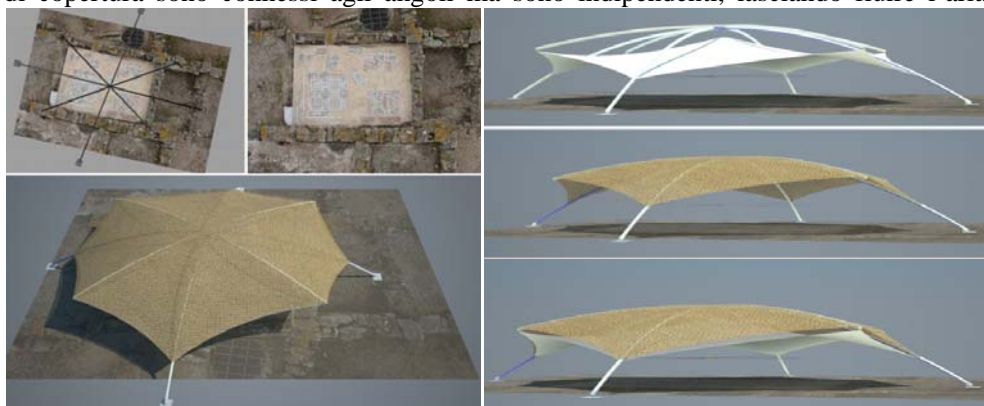
#### *3) Salvaguarda del paesaggio e del territorio*

- Possibilità di trasporto dei vari componenti con piccoli mezzi, breve tempo di montaggio e senza particolari difficoltà per evitare modifiche irreversibili del terreno circostante e dei percorsi esistenti di accesso all'area
- Studio di soluzioni a basso costo, standardizzabili ma anche adattabili;
- riutilizzabilità gli elementi costituenti la copertura in caso di smontaggio e rimontaggio presso un altro sito archeologico o altra area dello stesso sito;
- Basso impatto visivo nel territorio, tramite la scelta di un profilo di copertura dallo skyline basso e aerodinamico
- Stagionalità della copertura, prediligere scelta di soluzioni costruttive modificabili nelle diverse stagioni, così da conciliarsi con le variazioni climatiche, di protezione dagli agenti atmosferici, ma anche fruibili del sito.

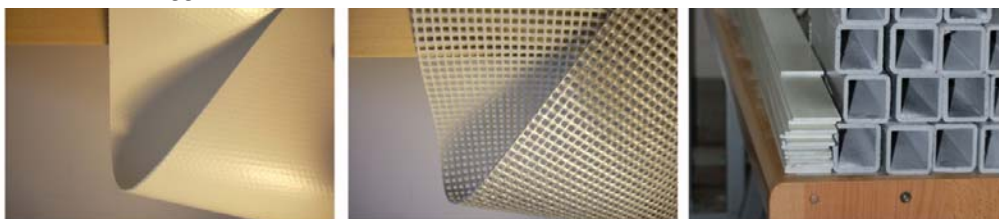


Il progetto messo a punto (6), e che ora verrà realizzato come prototipo per la protezione dei mosaici della casa tetrastilo, è una tettoia ultraleggera in tessile tecnico e struttura primaria in materiale composito fibrorinforzato, che non prevede alcuna parte metallica di sostegno e una serie di fondazioni puntuali a zavorra, completamente removibili. Il progetto vuole dunque soddisfare tutti i requisiti elencati, in particolare la struttura offre la possibilità di essere montata da operai senza l'uso di costose e pericolose gru o apparecchi di elevazione, e viene smontata e reinstallata con piccoli cambiamenti della forma.

I materiali selezionati per la struttura sono profili in pultruso fibrorinforzato (GFRP), e due differenti strati di membrane tessili di poliestere e rivestimento in pvc. tessuto PVC; una prima membrana garantisce la tenuta all'acqua, mentre la seconda è una rete a maglia fitta (tessuto a mesh aperta). Le qualità di tenuta all'acqua e di resistenza agli UV dipendono dallo strato di rivestimento, mentre i tessuti a mesh aperta riducono la quantità totale di radiazione solare che filtra, in modo da diminuire sostanzialmente la temperatura dello strato interno, permettendo di mantenere la temperatura richiesta sia sulle superfici dei reperti sia dell'aria sotto le tettoie. I vantaggi in termini di escursione termica giornaliera e stagionale sono notevoli e sono stati studiati in una precedente sperimentazione a Su Monte (7). I due strati di membrana tessile costituenti il sistema di copertura sono connessi agli angoli ma sono indipendenti, lasciando fluire l'aria



*Fig. 9. Il mosaico romano ricollocato in sito dopo il restauro (sinistra), la struttura portante è un telaio di fibre di vetro che rinforza lo strato a prova d'acqua (destra in alto); lo strato ombreggiante sopra (a destra, al centro): vista della tettoia con doppio strato ultraleggera (a destra, sotto).*



*Fig. 10. I materiali usati per il progetto pilota di riparo temporaneo: a sinistra la membrana resistente all'acqua, al centro il retino ombreggiante; a destra i profili in composito fibrorinforzato usati per gli archi di sostegno.*

nell'intercapedine, allo scopo di abbattere gran parte dell'effetto radiativo del sole incidente sulla membrana superiore. Gli elementi di supporto a forma di archi incrociati sono una struttura "attiva" ovvero raggiungono la condizione di equilibrio ai carichi di esercizio, proprio tramite il tensionamento opportuno degli strati di membrana di copertura. La presenza del mare e dell'elevato rischio di condensazione ha richiesto l'uso di materiali e forme che facilitino la ventilazione naturale, come appunto la forma ad ombrello, che risulta molto intuitiva per un uso stagionale del riparo. La curvatura del riparo previene anche il ristagno di eventuale condensa e favorisce il normale effluvio verso i bordi esterni dell'acqua piovana. Il rischio che penetri acqua nell'area è quindi estremamente ridotto, in quanto i punti più bassi dei bordi della copertura sono studiati per corrispondere alla giacitura di una canalizzazione preesistente dell'acqua piovana rinvenuta sul luogo. Dato il carattere sperimentale del tipo di riparo che non prevede parti in acciaio ma solo l'accoppiamento di elementi di supporto iperleggeri in poltruso e di membrane tessili, presso il Politecnico di Milano sono stati effettuati i test sulle proprietà meccaniche dei profili in GFRP e delle membrane per riprodurre il loro reciproco comportamento sotto carico. I risultati sono stati significativi per la messa a punto dei dettagli di connessione che ne facilitino l'installazione e la facile rimozione, in uno scenario d'uso stagionale.

#### **4. Conclusioni**

La ricerca multidisciplinare ha permesso la proficua collaborazione di esperti in restauro e tutela del patrimonio culturale, di scienziati e progettisti per ottenere soluzioni innovative per proteggere i reperti che ottimizzino le risorse disponibili e minimizzino le cause di degrado. In generale si può affermare che i quattro casi studio presentati sono esemplificativi di come l'uso combinato di strumenti predittivi di simulazione e di monitoraggio sul campo possa efficacemente supportare la fase progettuale, costruttiva e manutentiva di sistemi di protezione di nuova concezione, rispondenti sia ai requisiti di conservazione sia alle istanze di fruibilità dei siti archeologici e di salvaguardia del paesaggio.

In alcuni casi studio, la simulazione CFD è stata di grande aiuto nel prefigurare strategie progettuali atte a ridurre i fattori di rischio per la conservazione dei reperti e nello stesso tempo a conciliare nel nuovo progetto i requisiti di conservazione con quelli di utilizzo. Nel caso di Nora, la ricerca pre-progettuale finalizzata alla prototipazione di un riparo iperleggero e stagionale ha mostrato che una soluzione a doppia membrana può soddisfare diversi requisiti prioritari per la conservazione dei reperti, quali la protezione dalla radiazione solare. La combinazione di elementi strutturali iperleggeri con tessili tecnici ad alte prestazioni soddisfa inoltre i requisiti di rapida installazione e adattabilità alle diverse dimensioni delle preesistenze da conservare.

I risultati di questa ricerca sono infine applicabili ad altri siti che hanno simili caratteristiche di suolo e clima.

**Ringraziamenti:**

I materiali per i prototipi di copertura sono stati forniti da Canobbio S.p.A., Ferrari S.A., F.lli Giovanardi S.n.c. e Topglass S.p.A. Le prove biassiali sono state svolte presso il laboratorio "clusTEX" del Politecnico di Milano.

**Riferimenti bibliografici**

- (1) *San Cromazio. Il progetto mosaico*, atti dei convegni tenuti a Villa Speciosa nel 2002 e 2003, a cura di E. Cicu e G. Pianu, Sassari 2004.
- (2) E. Rosina, E. Romoli, La prevenzione del degrado in aree archeologiche: piani di manutenzione, coperture e monitoraggio. Il caso di studio di Su Monte a Sorradile (OR), Convegno Scienza e restauro, Luglio 2010, arcadia ricerche ed. Venezia 2010
- (3) *Proteggere gli scavi archeologici in area mediterranea: l'analisi microclimatica per la conservazione*, Tesi di laurea magistrale in architettura di Atzeni Nicola, Politecnico di Milano, A.A. 2007-2008
- (4) J. Stewart, S. Cosh, S, Protection of in situ mosaics: Lessons from England 1738 – 1939, Wall and floor mosaics: Conservation, maintenance presentation, Proceedings of the 8th conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics (ICCM), Thessaloniki, 2002, ed. Thessalonki: Ephoreia of Byzantine Antiquities of Thessalonikiù
- (5) *Proteggere con leggerezza*, tesi di laurea magistrale in architettura di Tomat Elia, Zerbi Marco, Politecnico di Milano, A.A. 2010-2011
- (6) Beccarelli P., Romoli E., Rosina E., Zanelli A. 2010, Textile shelters for archaeological areas: a change in the preservation of Cultural Heritage, in *Tensile Architecture: Connecting Past and Future, Proceedings TensiNet Symposium*, GSP 1900, Sofia, pp. 165-173.
- (7) Rosina E., Zanelli A., Beccarelli P., Gargano M., Romoli E. 2011, New procedures and materials for improving protection of archaeological areas, *Material Evaluation*, Vol. 69, n° 8, pp. 979-989.