

L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi

Enrico Sergio Mazzucchelli
Politecnico di Milano – Dip. ABC

Una delle tendenze odierne negli edifici di nuova costruzione è volta all'ottenimento di un involucro dalle prestazioni variabili: il cosiddetto "adaptive building envelope" o "involucro dinamico". La realizzazione di un involucro adattivo rappresenta una delle possibili soluzioni per garantire una risposta efficace alle variazioni climatiche esterne e ottenere condizioni ambientali interne ottimali, sia a livello stagionale, sia durante l'arco di una stessa giornata, senza un eccessivo consumo energetico. A tal fine l'involucro di un edificio rappresenta un ambito di sperimentazione particolarmente promettente per quanto concerne l'integrazione con sistemi impiantistici, ad esempio per lo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili. Le soluzioni oggi disponibili per la realizzazione di involucri opachi e trasparenti ad altre prestazioni sono molteplici e derivano dall'evoluzione che prodotti e sistemi costruttivi hanno avuto nel corso degli ultimi anni.

Tra le principali tappe dell'evoluzione delle soluzioni tradizionali verso involucri con prestazioni sempre più elevate e innovative, le più significative sono state: la definizione di nuove tipologie ed assemblaggi di sistemi multistrato di tipo termoisolato, la specializzazione sempre

più spinta dei singoli strati e il controllo delle loro prestazioni, lo sviluppo di nuove tipologie di vetro e di coating, il controllo della durabilità e del fabbisogno manutentivo degli strati maggiormente esposti al degrado, la considerazione della sostenibilità e dell'impatto ambientale delle soluzioni, la ricerca di trasparenza e permeabilità verso l'ambiente esterno. In questo scenario, l'innovazione tecnologica ha messo a disposizione nuovi materiali e sistemi per l'involucro edilizio, alcuni di tipo passivo, ad esempio in grado, grazie semplicemente alla particolare forma, di controllare la quantità di energia trasmessa (sia luminosa che termica) in funzione dell'inclinazione dei raggi solari, e altri di tipo attivo, che possono cioè modificare la quantità di energia trasmessa in funzione di stimoli esterni forniti al sistema. A ciò si aggiungano la disponibilità di materiali o prodotti innovativi che, rispetto a quelli tradizionali, sono in grado di garantire, grazie a proprietà intrinseche, elevate prestazioni a fronte di spessori assai ridotti.

Una ulteriore tendenza che accomuna molti edifici di nuova costruzione è la ricerca di una peculiare complessità stilistica e geometrica della forma, che spesso non può essere ricon-

"The wave" (Henning Larsen Architects), Vejle, Danimarca. La particolare forma del complesso fa sì che su alcuni fronti non esista più una reale distinzione tra chiusura verticale e copertura.



dotta solamente alla sovrapposizione di forme semplici. Tali forme, generate con l'ausilio di moderni software, introducono nei progetti una fonte di complessità aggiuntiva, tanto rilevante da portare talvolta a chiedersi il motivo di una così esasperata ricerca di "complessità geometrica". Risposta che trova solo una parziale giustificazione nei criteri di efficienza energetica, nello studio della migliore esposizione climatica e dell'orientamento ottimale delle facciate, nell'integrazione nel contesto urbano e nel minimo impatto ambientale.

A quanto sopra anticipato si sta progressivamente affiancando ed affermando il concetto di adattività: *"the idea of "adaptive architecture" has emerged from the debate on efficient building systems, meaning a form of architecture that constantly adapts itself to changing climatic conditions depending on the time of day or season. Not dissimilar to nature, it responds dynamically to change"* (Fonte: T. Klein, TU Delft). In altre parole, l'edificio viene sempre più considerato come un organismo che si auto-adatta al variare delle condizioni climatiche esterne in dipendenza della stagione o, addirittura, nell'arco della stessa giornata.

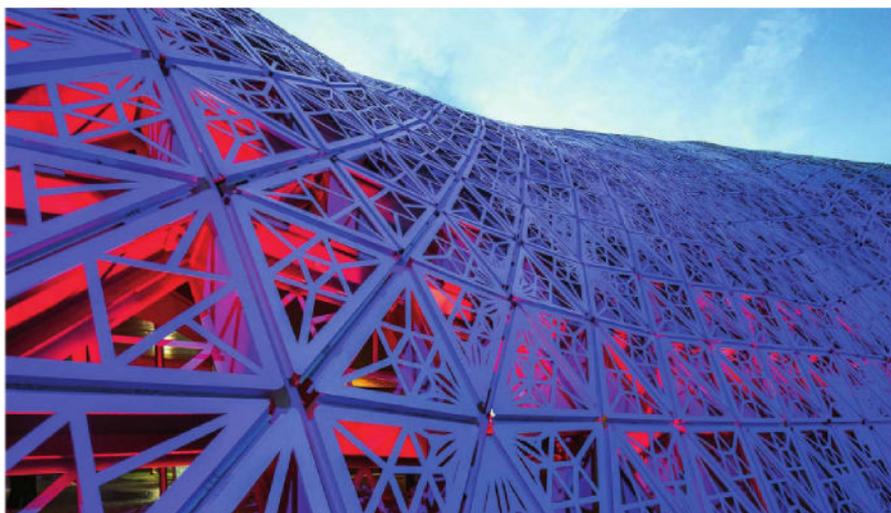
Questa adattabilità è di norma maggiormente evidente e percepibile a livello dell'involucro esterno. Un tale approccio verso un'architettura adattiva è fonte di cambiamenti non solo per quanto concerne gli aspetti tecnologici, come le caratteristiche di prestazione, ma anche nel modo stesso in cui viene considerata l'architettura in termini estetici e culturali. Per esempio, un edificio in un contesto climatico tropicale si adatterà visivamente e funzionalmente in modo differente al suo contesto rispetto ad un edificio sito in una zona temperata o polare. Una ulteriore distinzione di adattività può essere delineata considerando l'adattamento come risultato (adattamento statico) oppure l'adattamento come processo (adattamento dinamico). In ogni caso, il processo di evoluzione dell'involucro degli edifici mostra come la tendenza sia rivolta verso sistemi con maggiore adattività verso la variazione delle condizioni climatiche esterne. A tal riguardo, il modo con cui una facciata adattiva può reagire a degli stimoli o a delle forzanti esterne sono molteplici: esse possono infatti modificare forma e geometria, colore, trasparenza, permeabilità, etc.

Il legame tra facciate di edifici complessi ed energia prodotta da fonti di energia rinnovabili è spesso imprescindibile, anche con riferimento al raggiungimento del sempre più prossimo obiettivo "zero energy". Ciò comporta implicitamente la necessità di integrare nell'involucro edilizio sistemi attivi per lo sfruttamento di energia solare, eolica, etc. Al fine di individuare

quale strategia e quale/i sistema/i utilizzare è necessario valutare con precisione le superfici disponibili per l'integrazione di tali sistemi (che sono in ogni caso strettamente legati al contesto climatico e alla geometria dell'edificio) e la reale efficienza della soluzione individuata. Inoltre, considerando che la domanda di energia di un edificio non è quasi mai sincrona con la sua produzione (e, sebbene sia possibile ottenere il loro bilanciamento nell'arco di un anno solare, ciò non avviene di norma giorno per giorno), è necessario un attento dimensionamento di eventuali accumuli energetici e una specifica valutazione dei fattori di costo connessi all'importazione e all'esportazione delle diverse forme di energia verso le reti territoriali a cui l'edificio è eventualmente connesso. L'integrazione di sistemi per lo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili nell'involucro edilizio ha l'indubbio vantaggio di minimizzare la distanza tra generazione e utenza finale, limitando le perdite legate al trasporto e alla distribuzione.

Tra i sistemi più diffusi vi sono certamente i "BIPV" ("Building Integrated PhotoVoltaics"), sviluppati appositamente per rendere l'involucro una pelle in grado di sfruttare parte della radiazione solare incidente e di convertirla in energia elettrica. Integrare i sistemi "BIPV" nell'architettura di un edificio significa riuscire ad equilibrare gli aspetti tecnici ed estetici dei sistemi fotovoltaici con quelli dell'involucro, senza compromettere le caratteristiche prestazionali e funzionali di entrambi. L'integrazione di tali sistemi deve pertanto garantire i requisiti di performance energetica, acustica e di illuminazione tipici dell'involucro edilizio, inserendosi armoniosamente nel disegno architettonico e garantendo, accanto alla generazione di energia elettrica, tutte quelle prestazioni richieste all'elemento di involucro o finitura che esso va a sostituire. L'integrazione architettonica di sistemi fotovoltaici nell'involucro dell'edificio può ricondursi essenzialmente a due tipologie principali: integrazione in facciata (chiusure opache di tipo microventilato, chiusure trasparenti, sistemi di schermatura, elementi accessori, etc.) e integrazione in copertura. In climi temperati, soprattutto di tipo mediterraneo, i "BIPV" possono rappresentare una efficace soluzione per ridurre la domanda elettrica di punta legata al funzionamento di impianti di climatizzazione estiva che, temporalmente, corrisponde al periodo di maggior produzione elettrica dei sistemi fotovoltaici.

L'energia solare può essere efficacemente utilizzata anche per il riscaldamento di acqua a media e alta temperatura a supporto dell'impianto di riscaldamento (ed eventualmente utilizzabile da gruppi frigoriferi ad assorbimento in



Gallery of "Future of Us" Structural Building Envelope / SUTD Advanced Architecture Laboratory - Singapore (www.archdaily.com).

impianti di "Solar Cooling"), oppure per il riscaldamento di acqua per usi sanitari. La convenienza economica dei sistemi solari termici dipende in buona misura da un profilo di utilizzo continuo dell'energia fornita dal Sole: mentre la richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria ha, di norma, un profilo lineare e costante lungo tutto l'arco dell'anno, quella relativa al riscaldamento ambientale è normalmente di tipo stagionale nella maggior parte dei climi, per cui è preferibile che siano presenti più di una unica tipologia di utenza finale.

Anche i sistemi microeolici si adattano perfettamente ad attuare i principi della generazione distribuita con tutti i benefici derivanti dalla vicinanza del punto di produzione a quello di utilizzo dell'energia. L'impiego di macchine micro e minieoliche è estremamente vario: si va da sistemi autonomi in isola a sistemi di microgenerazione per l'alimentazione di singole utenze con scambio in rete. Le macchine di generazione mini e microeoliche sono le più diffuse per le loro dimensioni non eccessivamente elevate, la convenienza economica, la duttilità di impiego e la facilità di integrazione nell'involucro edilizio. Al pari dell'energia solare, l'energia eolica non può essere sfruttata in qualsiasi momento ma solamente quando è effettivamente disponibile: la produzione di energia di un impianto eolico è di fatto legata alla presenza di vento con velocità superiori ad un valore minimo che dipende dalla particolare tipologia di generatore, per cui tali impianti sono caratterizzati da variabilità ed intermittenza di produzione. Se si considera il caso di un singolo "nZEB", i generatori eolici più facilmente integrabili sono quelli ad asse verticale ("VWAT", "Vertical Air Wind Turbine"), che non raggiungono elevate potenze ma hanno il pregio di avere velocità di avviamento molto più basse rispetto ai genera-

tori ad asse orizzontale. Questi aeromotori hanno il duplice vantaggio di produrre elettricità in modo indipendente dalla direzione del vento e di garantire il proprio funzionamento anche con venti di bassa intensità, mentre il loro limite principale è costituito dalla resistenza aerodinamica che offrono sotto l'azione del vento.

Nonostante la spinta verso l'innovazione, quello attuale appare tuttavia ancora un periodo di transizione, in cui spesso la costruzione di edifici innovativi ricorre frequentemente a tecnologie di tipo tradizionale. Tutto ciò evidenzia la profonda distanza che ancora esiste fra il progetto architettonico e quello strutturale e di involucro, che risulta essere tanto maggiore quanto più complessa ed elaborata è la forma dell'involucro stesso. E' inevitabile osservare che la riduzione di questa distanza sia strettamente legata ad una più efficace collaborazione fra le varie discipline volta alla messa a punto di un progetto integrato. L'involucro non va pertanto considerato solamente come un mero insieme di strati e materiali combinati tra loro per fornire determinate prestazioni ma va invece inteso, concepito e sviluppato come una composizione di elementi, funzionalmente differenti e/o complementari, sinergicamente collaboranti tra loro al fine di dare luogo ad un efficiente sistema di divisione tra ambiente interno ed esterno.

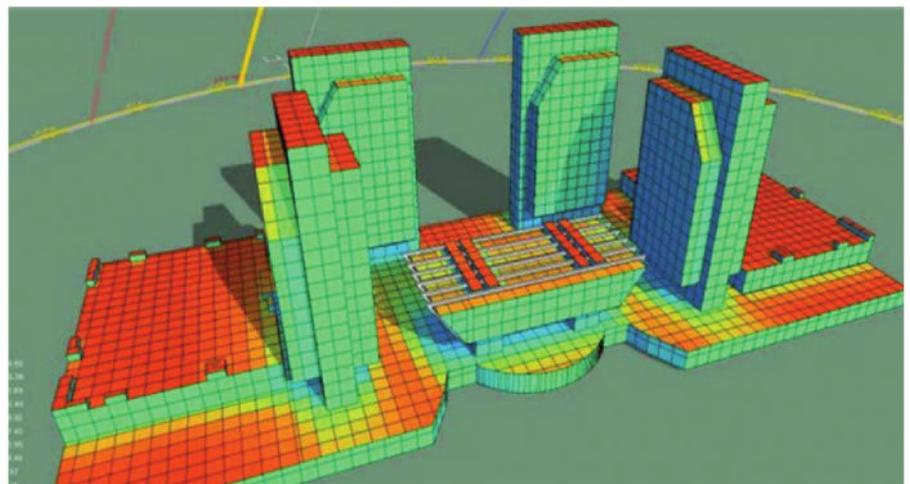
In sintesi, la complessità degli organismi e del loro involucro può dipendere da svariati fattori: elevata altezza e superficie, forma (articolata, curva, fluida, etc.), destinazioni d'uso (residenziale, terziaria, commerciale, ricettiva, etc.), integrazione con servizi tecnologici ed altro ancora. Ciò comporta che una progettazione di un sistema di involucro evoluto debba necessariamente definire in modo preciso le caratteristiche del sistema, individuare e sviluppare i nodi

critici ed i particolari di dettaglio, considerare gli aspetti di semplicità e velocità di installazione, manutenzione. In fase di progetto, la modellazione funzionale e prestazionale diviene un utile strumento di supporto e di controllo delle effettive prestazioni di involucro e impianti. In questo ambito, tra le funzioni di corrente modellazione si ricordano quelle relative a: verifica dell'illuminazione naturale ed artificiale degli ambienti, comportamento energetico, effetti di discomfort locale (ad esempio dovuto ad asimmetria termica radiativa), verifica di temperature e flussi d'aria nella climatizzazione degli ambienti, aspetti relativi alla Fire Safety Engineering (FSE) e altri ancora. Sotto quest'ultimo punto di vista, occorre considerare come molti recenti e drammatici casi di incendio (tra cui quello della Grenfell Tower del giugno 2017) hanno evidenziato come sia imprescindibile il miglioramento delle conoscenze tecniche e delle procedure pratiche nella progettazione di sistemi di facciata per quanto riguarda la loro vulnerabilità al fuoco, soprattutto in edifici di grande altezza. Dal momento che negli anni recenti lo spessore di isolante termico è più che raddoppiato, nel caso di impiego di materiali combustibili sono inevitabilmente aumentati anche i carichi di incendio. Sono di conseguenza aumentate anche la durata sia del potenziale incendio, sia del suo spegnimento, con un possibile conseguente incremento del rischio di propagazione del fuoco sulle facciate dell'edificio e, in aggiunta, anche verso il suo interno e/o verso costruzioni limitrofe. Sebbene i casi di incendio innescati e propagati in facciata attraverso "layers" di materiali combustibili siano relativamente rari, tuttavia essi possono portare a conseguenze considerevoli, sia in termine di entità dei danni che di perdite di vite umane. Ciò in particolare in edifici di grande altezza, dove diviene di importanza primaria associare gli interventi di

riqualificazione ad una efficace pianificazione e gestione dell'esodo e della sicurezza delle vie di fuga. A tal riguardo, i seguenti aspetti specifici assumono particolare rilevanza:

- presenza di materiali facilmente combustibili in facciata;
- assenza di ostacoli contro la propagazione dell'incendio in facciata e/o verso facciate limitrofe;
- presenza di caratteristiche geometriche e di ventilazione nella facciata che favoriscono lo sviluppo dell'incendio e la sua propagazione verso l'alto, ma anche in direzione orizzontale;
- possibilità di distacco di porzioni di facciata incendiate e coinvolgimento di porzioni di facciata ancora integre. Al fine di prevenire e limitare la diffusione di un incendio in facciata è possibile adottare già oggi alcune semplici soluzioni, sia in termini di scelta di materiali, sia di progettazione dei dettagli tecnologici. Ad esempio, un possibile obiettivo di progetto è quello di limitare la propagazione di un incendio ad un'area che non coinvolga più di due piani al di sopra di quello in cui l'incendio si è sviluppato prima dell'intervento dei Vigili del Fuoco. Tra le possibili misure adottabili per ridurre il rischio di sviluppo e propagazione di un incendio in facciata vi sono: controllo della reazione al fuoco dei materiali e utilizzo di materiali preferibilmente incombustibili, progetto ed esecuzione di elementi "tagliafuoco", in grado di suddividere l'edificio in compartimenti e definizione di dettaglio della loro connessione con facciate e coperture, controllo della diffusione dell'incendio attraverso le aperture di facciata (tramite elementi "tagliafuoco", fasce di materiali incombustibili, etc.) e attraverso la facciata stessa. La protezione della diffusione del fuoco in facciate ventilate, che ben si prestano agli interventi di riqualificazione termoenergetica del patrimonio edilizio, è invece un problema assai

*Esempio di modellazione
relativa alla quantità di energia
solare incidente.*



più complesso, dal momento che non esiste attualmente un sistema universale che possa essere applicato indifferentemente ad ogni sistema di facciata. In particolare, la ventilazione naturale dell'intercapedine retrostante il rivestimento rappresenta un ulteriore aspetto critico nei confronti della limitazione della diffusione dell'incendio. A tal riguardo è possibile tuttavia configurare alcune soluzioni che possono limitare la diffusione dell'incendio attraverso l'intercapedine tramite l'inserimento di appositi elementi tagliafuoco.

Un significativo contributo alla efficace modellazione FSE degli scenari di incendio e al miglioramento della sicurezza delle soluzioni deriva dal crescente numero di test al vero che vengono condotti per valutare il comportamento delle differenti soluzioni di facciata in caso d'incendio, sia per quanto concerne l'utilizzo di differenti materiali, sia per quanto concerne gli effetti dovuti a differenti geometrie e configurazioni delle aperture in facciata.

A tal riguardo alcune ricerche hanno dimostrato come il pericolo di diffusione di un incendio in facciata sia superiore in caso di incendio che si propaga dall'interno dell'edificio verso la facciata rispetto al caso di incendio innescato dall'esterno. E' per tale motivo che in molti paesi europei i test su campioni di facciata a scala reale si basano sull'esposizione delle facciate ad una fiamma che simula un incendio sviluppato in ambiente interno dopo la fase di "flashover". Una ultima considerazione riguardo agli involucri di edifici complessi concerne le modalità con la quale accedere, in sicurezza, all'involucro stesso per le operazioni di manutenzione, ordinaria o straordinaria. Tale aspetto è stato purtroppo troppe volte trascurato dagli operatori del settore e ancora oggi esiste una certa carenza culturale riguardo le operazioni di

manutenzione, che vengono spesso identificate solamente con interventi di tipo straordinario, ignorando quasi del tutto quelli ordinari. Ciò a discapito dell'inserimento nella consuetudine della prassi operativa della verifica e del monitoraggio delle condizioni di conservazione delle parti dell'edificio stesso.

La previsione e la programmazione degli interventi manutentivi (che una buona qualità del costruito può, in ogni caso, ridurre ma non eliminare completamente) deve in primis considerare delle soluzioni tali da garantire un'agevole esecuzione delle operazioni indicate nel programma di manutenzione (controlli, pulizia, riparazioni, sostituzioni, ecc.).

Se da una parte è opportuno che materiali e componenti costituenti l'involucro siano scelti in base alle loro prestazioni di durata ed affidabilità, dall'altro è necessario che le soluzioni costruttive individuate, l'assemblaggio di unità tecnologiche complesse e le procedure di montaggio dei componenti siano dotate di tutta una serie di accorgimenti e dispositivi in grado di garantire e facilitarne la manutenibilità. Per consentire un'agevole esecuzione delle operazioni di manutenzione ordinaria e/o straordinaria dell'involucro è consigliabile che, fin dalle prime fasi progettuali, sia prevista la modalità di accesso all'occorrenza, e ove ve ne sia l'opportunità e la convenienza, tramite sistemi permanenti a navicella su gru o binari. Le tipologie oggi più diffuse e utilizzate sul mercato (tralasciando quelle più tradizionali, quali scale aeree su braccio, piattaforme idrauliche e trabattelli) sono riconducibili ai sistemi con piattaforme sospese a livello variabile (tra cui le unità di manutenzione permanente – BMU: Building Maintenance Unit – e le piattaforme sospese temporanee - TSP: Temporary Suspended Platform), scale e passerelle mobili (ad a-

Esempio di sistemi BIPV.



zionamento manuale o meccanizzato) e operatori in fune.

Più nel dettaglio, i sistemi di accesso alle facciate sono di norma realizzati tramite:

- gru fisse (unità di manutenzione permanente - BMU) collocate in copertura dotate di braccio telescopico installato su basamento rotante. Il cestello collocato

all'estremità del braccio, qualora i fronti dell'edificio siano verticali e privi di aggetti e/o rientri, è in grado di raggiungere ogni punto del rivestimento di facciata. Questi sistemi sono caratterizzati da un elevato peso del macchinario posto in copertura, che deve essere perciò considerato durante le fasi progettuali dell'edificio. Difficilmente una sua collocazione può avvenire su edifici esistenti;

- piattaforme sospese con sistema di movimentazione collocato in copertura. Tali macchinari dotati di sistemi di traslazione orizzontale si muovono su binari o monorotaie installate all'interno o all'esterno del filo di gronda dell'edificio. Nel primo caso, la piattaforma vincolata ad un carrello che si muove lungo binari collocati sul perimetro dell'edificio viene calata mediante elementi di sospensione e permette agli operatori di raggiungere ogni punto della facciata. Tale dispositivo necessita di spazi liberi e di dimensioni adeguate in copertura per poter essere installato ed utilizzato. La seconda tipologia di navicella è dotata di binario fisso, collocato esternamente al coronamento dell'edificio, sul quale si muovono i carrelli di movimentazione.

Tale sistema, a differenza del precedente, può essere dotato di binari con cremagliera che permettono di superare anche differenze di quota, per cui risulta più flessibile e meglio adattabile ad ogni tipologia di facciata;

- operatori in corda. Questo sistema prevede

degli ancoraggi in copertura ai quali si assicurano, mediante corde ed imbragature, operatori specializzati per calarsi in facciata. Tale sistema necessita di spazi ridotti in copertura ed è utilizzabile sia su edifici esistenti (dove spesso vi è l'impossibilità di installare un sistema meccanizzato di accesso alle facciate), sia su edifici di nuova costruzione, in particolare laddove le geometrie sono assai complesse e con superfici difficilmente raggiungibili con sistemi TSP e BMU. In sintesi, il progetto di una soluzione di involucro deve prevedere e valutare lo sviluppo nell'arco di vita utile, dei fenomeni di degrado e di obsolescenza fisiologica (non patologica) delle varie parti edilizie e impiantistiche che formano l'edificio ed assicurare che tutte quelle parti bisognose di cura manutentiva possiedano caratteristiche tecniche tali da razionalizzare le attività ed i costi di manutenzione, ossia una favorevole manutenibilità.

E' evidente quindi come negli interventi di nuova realizzazione e negli interventi di riqualificazione i progettisti devono considerare le caratteristiche di affidabilità e manutenibilità del sistema di facciata nel suo complesso, che dovrà essere tale da garantire e semplificare l'accesso a tutte le sue parti e la sostituibilità dei suoi componenti.

Ove possibile si dovrà prevedere l'installazione di uno o più dei sistemi in precedenza descritti per la pulizia, la manutenzione e il controllo delle facciate, scelti in relazione a fattibilità, sicurezza, logistica, rapidità di intervento ed economicità in relazione al contesto specifico, valutando al contempo la frequenza delle operazioni di manutenzione, l'entità dei carichi trasferiti agli elementi strutturali, le modalità di funzionamento e di ancoraggio in facciata o in copertura, l'eventuale interazione con il sistema di tenuta all'acqua ed altro ancora.

Operatori in fune.

