

Innovative materials and technology for the renovation of the Donizetti Theatre of Bergamo: precast slabs for new ventilated façades

Materiali e tecnologia innovativi per il restauro del Teatro Donizetti di Bergamo: le lastre prefabbricate per le nuove facciate ventilate

N.Berlucchi¹, A. Piccinelli¹, M. di Prisco², C. Failla³, S. Signorini⁴, F. Sonzogni⁴

¹ *Berlucchi Studio, Brescia, Italy.*

² *Politecnico di Milano, Milan, Italy.*

³ *Engineer in Milan, Italy*

⁴ *Magnetti Building S.p.A., Italy*

ABSTRACT: The paper describes the main aspects related to the design, to the research of materials and to the construction of the new ventilated façades of the Donizetti Theatre in Bergamo. The Donizetti Theatre is the greatest cultural and historical building located in the centre of the town of Bergamo, and its current configuration is datable to at the end of the nineteenth century. Over the last three years (2017-2020) it has been subjected to a deep conservative restoration and to a technical and technological renewal of the external façades of the stage tower, the new volumes for the dressing rooms, the multifunctional area and the facilities facing Piazza Cavour on the east side of the building. The architectural design has foreseen to design ventilated façades made with cement material and with different colours ascribable to the range of colours of the historic façade and of the whole building. The identified material for the construction of these large slabs with small thickness is an architectural mortar with very high structural performance, for the first time adopted within an industrial precast process for a custom-mode project. The essay analyses the architectural explanations, the experimental investigation related to the material, the mortar characterization tests and the qualification of the final product. All in all, the technology design and the production and installation of the ventilated façade system are examined. / Nella memoria vengono illustrati gli aspetti salienti relativi alla progettazione, alla ricerca dei materiali e alla realizzazione delle nuove facciate ventilate del Teatro Donizetti di Bergamo. Il Teatro Donizetti, il maggiore spazio culturale e storico edificio nel cuore della città di Bergamo, databile nella configurazione attuale a fine Ottocento, è stato soggetto nel corso degli anni 2017-2020 ad un profondo intervento di restauro conservativo e rinnovamento tecnico e tecnologico che ha coinvolto anche le facciate esterne della torre scenica, dei nuovi volumi destinati ai camerini, dello spazio polivalente e dei servizi prospicienti la Piazza Cavour sul lato est dell'edificio. La progettazione architettonica ha previsto di realizzare le facciate ventilate utilizzando materiale cementizio con colorazioni differenti riconducibili alle nuance di colore rintracciabili sulla facciata storica e nel resto dell'edificio. Il materiale individuato per la realizzazione di tali lastre di grande dimensione e di piccolo spessore è una malta architettonica ad elevatissime prestazioni strutturali, per la prima volta adottata all'interno di un processo industriale di prefabbricazione su progetto. La memoria ripercorre le motivazioni architettoniche, il percorso di indagine sperimentale relativo al materiale, le prove di caratterizzazione dello stesso e di qualificazione del prodotto finito, la progettazione tecnologica del sistema di facciata ventilata, la produzione e l'installazione della stessa.

KEYWORDS: Renovation; Precast slabs; Ventilated façade; Architectural mortar / Restauro; Lastre prefabbricate; Facciata ventilata; Malta architettonica

1 INTRODUZIONE

Le opere di riqualificazione totale del Teatro Donizetti hanno previsto, oltre al miglioramento degli spazi interni e alla razionalizzazione delle “funzioni” del teatro, anche un ampliamento volumetrico pari a circa 1250 m³ e una ristrutturazione esterna che armonizzasse maggiormente l'edificio nel suo complesso e nel contesto.

L'intervento di restauro e recupero architettonico, si è posto da subito come una sfida complessa in quanto il progetto intendeva rispettare gli interventi del passato, che hanno caratterizzato il monumento,

senza cancellarne il segno. In quest'ottica, si è scelto di introdurre un intervento non in stile, ma rispettoso delle preesistenze e che utilizzasse materiali tradizionali e coerenti, introducendo giustapposizioni “classiche” recuperando le cromie della “pietra artificiale” storica.

2 IL PROGETTO DI RESTAURO E LA VALORIZZAZIONE DELLE FACCIATE

Il teatro Donizetti nacque come Teatro privato Riccardi alla fine del 1700, con una grande sala a ferro di cavallo e un semplice ingresso al piano terra, nei primi del '900 fu poi ampliato con una facciata

monumentale ed un piano nobile con saloni di rappresentanza.

Oltre al corpo storico del teatro, in affaccio verso il Sentierone di Bergamo, negli anni '60 del secolo scorso furono addossati due ampi corpi di fabbrica laterali per alloggiare molteplici funzioni accessorie a quella teatrale principale, per giungere infine a un ulteriore ampliamento del Ridotto Gavazzeni negli anni Novanta.

Come tutti gli edifici storici, il Teatro Donizetti, ha subito nel tempo diversi adattamenti funzionali con i quali si è dovuto, necessariamente, stabilire un dialogo.

I prospetti laterali dell'edificio sono stati pensati nella ricerca di una coerenza formale tra le nuove addizioni e le parti già esistenti rispettando quella delle facciate storiche, così da rendere l'immagine architettonica complessiva del teatro armoniosa e contemporanea. Il filo conduttore di questa operazione è stato dato dal materiale: il calcestruzzo colorato, materiale che si ritrova già fin dalla realizzazione della facciata monumentale realizzata tra il 1896 e il 1898, su progetto dell'architetto Pietro Via, e nelle addizioni successive, usato oggi con intelligenza in imponenti lastre con cinque differenti sfumature di colore rosato che si alternano tra loro, determinando così un forte senso di coesione tra le parti preesistenti e le nuove. In questo senso, l'intervento cerca di applicare l'innovazione tecnologica contemporanea ai materiali già utilizzati per l'edificio a fine dell'Ottocento, quando lo stesso Pietro Via menzionava la sapienza bergamasca nella produzione di elementi ornamentali prefabbricati in cemento.

L'intervento, in accordo con la Soprintendenza di Brescia Bergamo e Cremona, si è posto l'obiettivo di lasciare priorità alla facciata monumentale nord, cercando di incorniciarla in modo elegante e continuativo tra antico e contemporaneo (Fig. 1).



Figure 1. View of the final project. / Render fotorealistico del progetto finale.

Si è trattato di un intervento che si potrebbe definire "timido" dal punto di vista architettonico, un intervento che non ha voluto prevaricare sulla percezione della parte storica, lasciando volutamente "sottotono" l'intervento contemporaneo. È stato svi-

luppato un progetto di restauro delicato e complesso, esattamente l'opposto dei tanti che si trovano nel nostro paese e che fanno del contrasto la firma del progettista (Fig. 2).



Figure 2. Northern view of the Scenic Tower. / Vista nord della torre scenica.

Le facciate laterali oggetto di intervento sono state rivestite da una fascia basamentale in ceppo locale, con tessitura "a correre" ed un chiaro richiamo al corpo storico. Le porzioni sommitali sono state risolte con elementi modulari in malta cementizia colorata in pasta ad effetto materico in tonalità rosate, che riprendono le sfumature della facciata storica, caratterizzata da patine. Le caratteristiche dimensionali dei pannelli e dei relativi sistemi di aggancio derivano da un lavoro di mediazione tra i nuovi criteri compositivi e il raggiungimento di un'armonia compositiva e cromatica con le preesistenze (Fig. 3).



Figure 3. View of the Eastern façade. / Vista della facciata est.

Il disegno dei nuovi prospetti evidenzia l'orizzontalità e rimarca la corrispondenza degli ordini di palchi e gallerie interni e delle cornici del primo e del secondo ordine.

La facciata verso Piazza Cavour è stata ridisegnata segnalando tramite pensiline in metallo bronzato e sguinci laterali la presenza di funzioni importanti quali la Sala della Musica oltre che l'ingresso della biglietteria e del nuovo bar e coinvolgendo con continuità anche il nuovo corpo dei camerini mediante un ordine regolare di serramenti e di parti piene segnate solo dai principali marcapiani.

Il volume del corpo scenico è stato regolarizzato e rivestito di una pannellatura in malta colorata a grandi formati fino alla "quota di gronda".

I macchinari impiantistici collocati sui tetti piani dei corpi laterali sono stati integrati e nascosti il più possibile grazie ad una nuova pannellatura di mascheramento in continuità materica con i fronti principali.

Per la produzione dei 777 pannelli prefabbricati di facciata si è ricorso ad una malta cementizia studiata ad hoc per il teatro che ha permesso di ottenere elementi dallo spessore ridotto con ottime proprietà meccaniche. I pannelli sono stati oggetto di un trattamento finale di microsabbatura superficiale, così da ottenere un ricercato effetto di velatura e mazzatura e da un trattamento idrorepellente protettivo finale.

3 IL MATERIALE E IL PERCORSO DI RICERCA COLORE-FINITURA

Rispetto all'idea iniziale, che prevedeva la realizzazione di lastre di dimensioni maggiori, la proposta progettuale effettuata da Magnetti Building, a seguito di studi comparativi con altre soluzioni, è stata quella di realizzare pannelli prefabbricati di basso spessore realizzati con malta cementizia rinforzata con reti in fibra di vetro. La dimensione ridotta dei pannelli (fino ad un massimo di 5 mq) ha permesso un'ottimizzazione nello studio delle colorazioni delle facciate, una migliore industrializzazione della soluzione progettuale scelta e una maggiore facilità di montaggio delle lastre prefabbricate. Nel gergo tecnico tali materiali sono individuati dall'acronimo TRM (Textile Reinforced Mortar), già utilizzati da Magnetti Building in precedenti progetti e realizzazioni (Fig. 4) [1-2-3-4].



Figure 4. Previous project with the use of TRM. / Precedente realizzazione con l'utilizzo di TRM.

La soluzione con malta cementizia permette la realizzazione di manufatti dal peso contenuto (da 75 a 100 kg/mq), potendo realizzare soluzioni di finitura molto articolate, coniugando la variabile della colorazione, tramite l'inserimento di coloranti nell'impasto cementizio, con quella di diversi trattamenti superficiali. Soluzioni alternative al rinforzo con rete in fibra di vetro sono state analizzate, ma quelle più promettenti dal punto di vista tecnologico (malte rinforzate con fibre di acciaio o con fibre sin-

tetiche) hanno presentato controindicazioni dal punto di vista della finitura scelta, che veniva penalizzata dall'affioramento in superficie del rinforzo fibroso.

Il materiale indicato dal capitolato e poi utilizzato è stata la malta Effix prodotta da Italcementi, che presenta elevate prestazioni meccaniche ed un'alta durabilità grazie al suo mix design [5]. Effix è una malta pronta all'uso contenente cemento premiscelato con sabbia e additivi necessari al suo confezionamento, che mediante miscelazione con acqua diventa una malta molto fluida di colore bianco avorio. Le lastre sono rinforzate internamente con una rete in fibra di vetro (uno strato per pannelli da 35 mm, due strati per quelli con spessore 45 mm), applicata su tutta la superficie degli elementi e in corrispondenza dei punti di sospensione e di ancoraggio, che garantisce un comportamento post fessurativo parzialmente duttile e una sicurezza al prodotto in caso di danneggiamento.

Partendo da un'indagine colorimetrica realizzata sulle superfici esterne del Teatro al fine di ricercare delle tonalità che si avvicinassero il più possibile alle colorazioni presenti su tutta la struttura esistente e attraverso il dosaggio di ossidi all'interno della malta, sono state selezionate le cinque gradazioni di rosa più idonee ad armonizzarsi con il volume esistente. Gli ossidi di ferro utilizzati sono stati di quattro colori: giallo, arancio, nero e rosso, dosati contemporaneamente in percentuali diverse in ognuna delle cinque colorazioni studiate, partendo da una malta con base bianca. Si è optato per l'utilizzo di ossidi colorati in polvere, che rispetto al granulo o ai pigmenti liquidi ha permesso una loro migliore dispersione e omogeneità all'interno della matrice cementizia. Di seguito alcuni dei campioni realizzati in laboratorio e il confronto presso il Teatro (Fig. 5).



Figure 5. Test slabs made in lab. / Campioni di prova realizzati in laboratorio.

Per quanto riguarda il percorso che ha portato a definire la finitura superficiale dei pannelli, i primi studi sono stati realizzati mediante getto su fondo cassero liscio, su matrici in gomma o con realizzazione di microlavaggi della superficie con acqua in pressione successivamente allo sforno delle lastre, tramite l'utilizzo di specifici agenti disattivanti (lacche ritardanti) che permettono l'asportazione il giorno dopo il getto di alcuni millimetri di pasta superficiale per mettere in evidenza i microaggregati della

malta stessa. Dopo un lungo percorso di qualche centinaio di campioni e dopo aver sondato diversi livelli di finitura tramite trattamenti superficiali di varia natura, è stato raggiunto il livello desiderato dalla Direzione Artistica e dalla Soprintendenza con un trattamento meccanico di microsabbatura a secco con sabbia al quarzo, protetta da un successivo strato di idrorepellente, un trattamento protettivo per esterni in grado di proteggere le superfici da acqua, olio, macchie e graffi rendendole resistenti ai cloruri, alla carbonatazione e alla corrosione, limitando la formazione di efflorescenze, lasciando traspirare il supporto e rendendolo resistente ai raggi UV. Una finitura volutamente non liscia, che dona al Teatro un effetto antico e moderno allo stesso tempo.

Il progetto è proseguito con attività parallele di progettazione esecutiva e di realizzazione di prototipi in scala reale per la definizione delle colorazioni, della finitura, del rinforzo strutturale e della tipologia di appensione, fino all'individuazione della soluzione definitiva. Nell'immagine successiva (Fig. 6) si mostrano i primi prototipi realizzati.



Figure 6. The first prototypes. / I primi prototipi.

In concomitanza ad ogni getto sono stati preparati campioni per la qualificazione e caratterizzazione del materiale; inoltre, alcuni elementi in scala reale sono stati esposti ad irraggiamento solare per la valutazione delle deformazioni termiche.

Individuata la soluzione definitiva con la scelta della composizione del materiale e con la progettazione esecutiva, sono state eseguite prove per la caratterizzazione meccanica tramite test su provini e prove sui pannelli in scala reale. Tali prove di qualificazione sono state eseguite dal Politecnico di Milano, che ha redatto specifiche certificazioni (si veda il successivo paragrafo 6).

Si evidenzia, infine, come la definizione del prodotto, impiegando queste tipologie di materiali particolarmente sensibili alle condizioni ambientali e ai metodi di lavoro, prevede necessariamente la messa a punto di una procedura di fabbricazione che regoli tutte le fasi operative di esecuzione del prodotto, sia per quanto riguarda le modalità di confezionamento della malta, del getto e, soprattutto, delle modalità di maturazione del manufatto, che devono essere controllate per alcune settimane dopo il getto, per evitare la formazione di fenomeni fessurativi da ritiro plastico o igrometrico. Alla definizione di questo aspetto è stato dato uno spazio significativo nel cor-

so della prototipazione dei manufatti e nelle fasi di avviamento della produzione.

4 L'INDUSTRIALIZZAZIONE DEL PROGETTO: IL PROGETTO ESECUTIVO

Parallelamente alla definizione del materiale è stata affrontata l'industrializzazione del progetto architettonico, al fine di giungere ad un progetto esecutivo che ottimizzasse e sfruttasse appieno le potenzialità di una produzione industriale. Il progetto si compone complessivamente di 777 lastre con dimensioni ricorrenti e caratteristiche di 80x240 cm con spessore 35 mm e 150x300 cm con spessore 45 mm. Le nuove facciate del Teatro Donizetti sono di tipo ventilato (le lastre distano 18 cm dalle pareti di sostegno), a giunto aperto (1 cm) e coibentato in corrispondenza del corpo camerini e dei due corpi scala (coibente di spessore 12 cm).

Il progetto si configura essenzialmente suddiviso in cinque gruppi progettuali di elementi, con riferimento al volume architettonico destinazione della loro installazione: torre scenica, copri-impianti, camerini, sala polivalente, scale.

Il gruppo "torre scenica" include n. 488 lastre piane di dimensione variabile, tutte realizzate con spessore 35 mm e installate a rivestimento di tre lati del grosso volume della torre scenica, avente altezza al colmo fino a 40 m. Il progetto ha previsto la regolarizzazione della superficie del fronte nord della torre, originalmente caratterizzata da uno sfondato nella parte alta, per mezzo di apposita struttura metallica. Alcune lesene, sempre caratterizzanti il fronte nord, sono state rivestite con elementi tridimensionali.

Il gruppo di lastre "copri-impianti" (n. 126 di dimensione 80x180 cm e spessore 35 mm) sono state impiegate per la realizzazione di due "quinte" (una sul fronte est ed una sul fronte ovest) di oscuramento delle voluminose installazioni impiantistiche posizionate sulle coperture di due corpi di fabbrica (camerini lato est e Ridotto Gavazzeni lato ovest) (Fig. 7).



Figure 7. Cladding of the plant system on the roof. / Rivestimento del corpo impianti in copertura.

Le lastre sono state installate su apposite strutture metalliche ancorate ai solai di copertura, questi ultimi sia di nuova realizzazione (lamiera grecata con cappa in calcestruzzo) che esistenti (solai laterocemento anni '60/'80).

I pannelli dei gruppi “camerini”, “sala polivalente” e “scale” risultano essere quelli di fatto installati sui corpi di fabbrica più bassi e quindi immediatamente più visibili e accessibili dai Giardini di Piazza Cavour (est). Complessivamente si tratta di n. 90 pannelli piani di dimensione caratteristica 150x300 cm e spessore 45 mm e n.73 pannelli tridimensionali (con sezione trasversale a “C”) a comporre anche le imbottite delle finestre. I pannelli del corpo camerini sono stati installati su una struttura di nuova realizzazione, costituita da un telaio metallico e tamponamento in blocchi di gas-beton (Fig. 8).



Figure 8. Detail of the cladding of the changing rooms façade. / Dettaglio del rivestimento di facciata del corpo camerini.

Quelli del corpo polivalente sono stati installati in parte su muratura esistente e in parte su struttura metallica di nuova realizzazione (Fig. 9). La struttura metallica di nuova realizzazione è il supporto anche dei pannelli dei corpi “scale”.

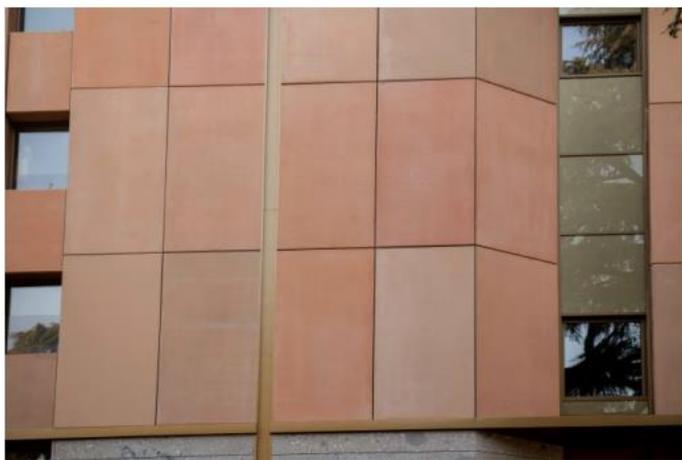


Figure 9. Cladding of the multipurpose room. / Rivestimento della sala polivalente.

La progettazione esecutiva ha compreso lo studio del sistema di sospensione delle lastre (Fig. 10), realizzato con elementi metallici zincati a caldo. La singola lastra è stata progettata con due punti di sospensione nella parte alta e due punti di ritegno nella parte bassa. Tali vincoli sono stati progettati per so-

stenere i carichi previsti da normativa: il peso proprio, l'azione del vento e l'azione sismica. I vincoli sono essenzialmente costituiti da un componente lato-lastra e da uno lato-supporto (installato in cantiere), nell'insieme dotati di sistemi di microregolazione nelle tre direzioni. Trattandosi di una produzione di tipo industriale, nell'ottica dell'ottimizzazione di tutte le fasi di produzione, si è previsto che i componenti del vincolo lato-lastra fossero già inseriti nell'elemento durante le fasi di getto. In tal modo, gli elementi metallici sono stati utilizzati anche come inserti per lo sforno e la movimentazione della lastra stessa.



Figure 10. Hanging system detail. / Dettaglio del sistema di sospensione.

Nella scheda esecutiva tipo riportata (Fig. 11) è possibile notare il posizionamento della rete in fibra di vetro, da progetto prevista al centro dello spessore della lastra. Quattro porzioni di rete sono inoltre state previste a rinforzo delle posizioni degli inserti metallici.

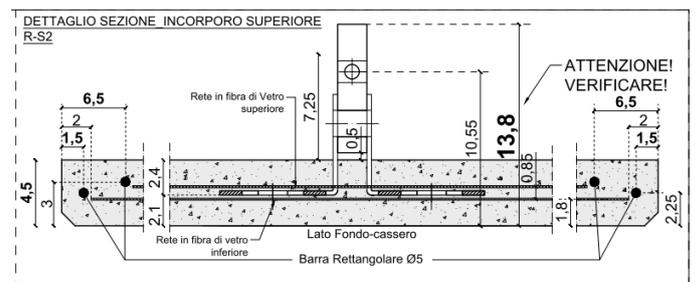


Figure 11. Technical type-drawing. / Scheda esecutiva tipo.

Le lastre sono state progettate verificando tutte le sollecitazioni transitorie, sforno, sollevamento, stoccaggio e movimentazione per l'installazione, oltre che per le sollecitazioni in fase definitiva.

Il progetto esecutivo ha previsto una fase di ottimizzazione dimensionale, al fine di contribuire all'efficienza del processo produttivo. In totale il progetto è risultato comunque composto da oltre 275 tipologie di elementi differenti per dettagli progettuali tali da richiedere un'identificazione univoca.

Al fine di evitare danneggiamenti agli spigoli del manufatto, il perimetro delle lastre è stato caratterizzato da uno smusso 1x1 cm e le lastre installate in

posizione d'angolo sono state dotate di lato con smusso a quartabuono (Fig. 12).



Figure 12. Edge of the slabs. / Smusso perimetrale delle lastre.

La possibilità di realizzare dettagli di questo tipo, anche in considerazione dei piccoli spessori complessivi, si deve all'elevata lavorabilità e alle caratteristiche reologiche della malta impiegata. Il progetto esecutivo è stato successivamente approvato dalla Direzione Artistica identificando per ogni singola posizione la colorazione tra le cinque approvate (Fig. 13).



Figure 13. Variety of colors approved. / Colorazioni approvate.

5 LA PRODUZIONE INDUSTRIALE

Il passaggio dal progetto esecutivo alla produzione industriale ha previsto innanzitutto un'attenta attività di pianificazione. Tale attività ha dovuto tenere in considerazione da un lato la sequenza di installazione richiesta dal planning generale delle attività di cantiere e dall'altro le necessità di ottimizzazione della produzione. La scelta finale è stata quella di procedere alla realizzazione di lastre con solo due colorazioni per giorno: questo per soddisfare sia gli importanti tempi di attrezzamento delle diverse tipologie di lastre, sia il notevole spazio di pre-stoccaggio per il trattamento superficiale, sia la preparazione dei lotti di lastre per la spedizione in cantiere. A questo si deve aggiungere che, per uniformità di risultato finale della sabbiatura superficiale, si è deciso di procedere con il trattamento su lastre aventi indicativamente il medesimo tempo di maturazione (circa una settimana), generando così necessità di notevole spazio di stoccaggio temporaneo. Le lastre sono state realizzate con l'impegno di casseri metallici. In particolare, le lastre tridimensionali sono state realizzate utilizzando appositi "controcasseri" per la realizzazione delle pareti laterali dell'elemento (Fig. 14).



Figure 14. Three-dimensional slab casting. / Getto della lastra tridimensionale.

In seguito (Fig. 15) si mostra il getto di una lastra piana: è possibile notare i sistemi di sospensione degli incorpori metallici e della rete in fibra di vetro, opportunamente tesa, che da progetto si dovevano posizionare esattamente a metà dello spessore dell'elemento stesso, variabile tra i 35 e i 45 mm.



Figure 15. Flat slab casting. / Getto della lastra piana.

La malta è stata prodotta con l'impiego di un mescolatore planetario da 1 m³ all'interno dell'impianto di betonaggio, miscelando impasti mediamente di circa 300 litri ciascuno. Il materiale utilizzato, essendo autocompattante, non ha previsto l'uso di vibrazione esterna per essere livellato nei casseri.

Viste le caratteristiche della malta impiegata, si è avuta una particolare attenzione in fase di produzione alle prime ore di maturazione, per controllare i fenomeni di ritiro plastico. Immediatamente dopo le fasi di getto, si è proceduto ad idratare con acqua nebulizzata tutte le lastre piane mediante operazione manuale, mentre per le lastre tridimensionali si è proceduto ad immersione totale in acqua, raggiungendo così umidità relative prossime al 100%. Di seguito gli elementi, per garantire le corrette condizioni termoigrometriche di maturazione, sono stati coperti con un telo di plastica e tutta la pista di getto con un telo accoppiato di tessuto non tessuto e polietilene. Nel periodo di produzione invernale, gli elementi hanno subito un ciclo termico di maturazione

accelerata pari a circa 30°C per 2 ore, in modo da poter permettere alla malta di raggiungere le prescritte resistenze a compressione in fase di sforno (16 h circa dal getto).

Una volta sfornate, le lastre sono state posizionate in casse di legno appositamente realizzate, all'interno delle quali nei giorni seguenti sono state mantenute le condizioni di umidità corrette (tramite nebulizzazione) per evitare il formarsi di fessurazioni dovute a ritiro igrometrico.

Il processo produttivo è stato completato con l'attività di microsabbatura e trattamento superficiale protettivo con idrorepellente (Fig. 16).



Figure 16. Sandblasting process. / Processo di sabbatura.

Stante le caratteristiche geometriche del progetto e la necessità di mantenere un giunto tra gli elementi il più possibile uguale, la produzione ha dovuto garantire una tolleranza sulla geometria dei pezzi di +/- 3 mm.

Particolare attenzione è stata, infine, riservata al sistema di imballaggio per lo stoccaggio e il successivo trasporto. Sono state realizzate casse di legno ad hoc (Fig. 17) predisposte per accogliere le lastre posizionate in verticale con appoggio lungo la dimensione maggiore e opportunamente distanziate.



Figure 17. Prestorage and wooden crates. / Prestoccaggio e casse in legno.

È stata inoltre svolta un'importante attività logistica nello studio dell'assortimento delle lastre in ogni cassa, funzionale alla spedizione per l'installazione giornaliera essendo lo spazio di stoccaggio in cantiere molto limitato.

6 I TESTS DI CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE E DEL PRODOTTO

I tests di caratterizzazione del materiale e del prodotto sono stati realizzati alla fine di un percorso che ha visto la produzione di numerosi prototipi realizzati con matrici e sistemi di rinforzo diversi, in quanto la maggiore difficoltà è stata quella di mettere a punto una soluzione in cui fossero positivamente risolti i problemi relativi sia alla finitura (aspetto maggiormente caratterizzante il progetto) che alla resistenza del manufatto durante le fasi tecnologiche e di installazione, senza che si creassero fessurazioni sulla superficie dell'elemento.

Sui prototipi definitivi sono state eseguite prove per la caratterizzazione meccanica tramite tests su provini e prove sui pannelli in scala reale. Tali prove di qualificazione sono state eseguite al Politecnico di Milano presso i laboratori della sede di Lecco.

Il materiale è stato sottoposto a prove di flessione a 4 punti su provini aventi lo spessore effettivo dei pannelli (35 e 45 mm) dopo averli sottoposti a cicli di gelo e disgelo, in quanto il problema principale da verificare non era tanto la resistenza a tempo zero, ma il mantenimento nel tempo delle caratteristiche di duttilità richieste.

I campioni soggetti a prova sono stati sottoposti a 25 cicli di gelo/disgelo, a cicli tra +4°C e -18°C con una velocità di raffreddamento e riscaldamento di 11°C/h e una fase di permanenza alle temperature di riferimento (+4°C e -18°C) per 30 min. I provini hanno mostrato un comportamento duttile post-fessurativo di tipo elasto-plastico.

Sono state inoltre condotte prove per verificare l'ancoraggio nelle lastre del sistema di sospensione dell'elemento, visti gli spessori molto modesti del manufatto.

Nella fotografia (Fig. 18) si mostra l'apparecchiatura di prova e nelle immagini successive (Fig. 19) si presenta l'elemento in una fase di prova all'inizio e al termine della stessa in cui si individua la multifessurazione del manufatto.



Figure 18. Test equipment. / Apparecchiatura di prova.

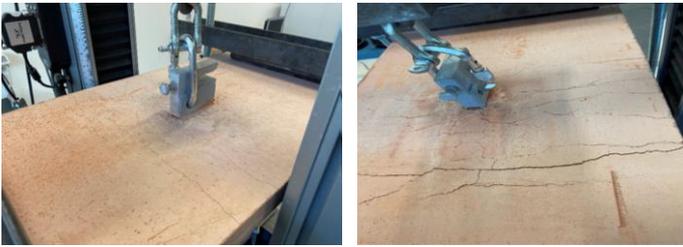


Figure 19. Test element at the beginning and end of the test. / Provino all'inizio e al termine della prova

I risultati delle prove sono riassunti nel grafico (Fig. 20) e sono espressi in curve Carico (Load) - spostamento dell'attuatore (Stroke).

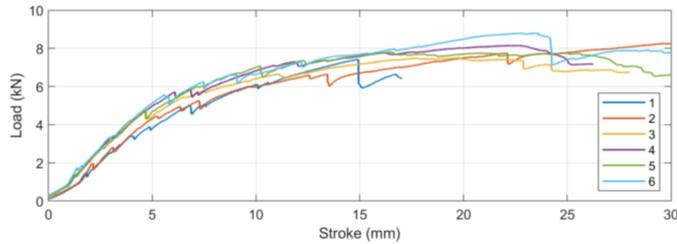


Figure 20. Lines chart Load-Stroke / Grafico Carico-Spostamento.

Le due tipologie di pannelli più ricorrenti sono state sottoposte a prove di impatto realizzando manufatti in dimensione reale come previsto per gli elementi di facciata.

Si mostrano (Fig. 21) la struttura su cui sono stati montati i due pannelli, di diverse dimensioni, sottoposti alla prova e l'intera attrezzatura con il castello dal quale veniva lasciato cadere il grave per la prova di impatto (Fig. 22).



Figure 21. Structure for the panels assembly. / Struttura per il montaggio dei pannelli.

Figure 22. Crash test equipment / Attrezzatura per la prova di impatto.

L'esecuzione delle prove con corpo duro (sfera d'acciaio 0,5 kg) non hanno dato origine ad alcun effetto sulla tipologia di elementi e sono probabilmente prescritti dalla norma di riferimento perché significativi per elementi realizzati con materiali diversi, mentre più interessanti sono state quelle realizzate con il corpo molle (sacco da 50 kg).

Il manufatto di maggiori dimensioni e spessore, pur evidenziando una certa deformazione che non è stata registrata durante la prova, in quanto la norma di riferimento indica solo un controllo visivo dell'elemento, non ha subito alcun effetto anche nella prova con maggior altezza di caduta del grave che corrisponde all'applicazione di un'energia pari a 660 J. Quello di dimensioni e spessori inferiori, invece, ha mostrato una fessurazione passante allo step di carico di 400 J e, la rottura al successivo passo di carico, come si evidenzia in seguito (Fig. 23).



Figure 23. Cracking state of the panel. / Quadro fessurativo del pannello.

I risultati delle prove di impatto hanno permesso di classificare il pannello di maggiori dimensioni e spessore nella Categoria d'uso I e quello di dimensioni e spessore inferiori nella Categoria d'uso II sulla base della norma ETAG 034 [6-7-8].

7 L'INSTALLAZIONE E I LAVORI DI CANTIERE

I lavori di cantiere per l'installazione delle nuove facciate del Teatro Donizetti si sono svolti nel periodo compreso tra il mese di dicembre 2019 e il mese di novembre 2020, sospese e rallentate per qualche mese a causa della pandemia legata al Covid-19 (Fig. 24).



Figure 24. View of the changing rooms assembly. / Vista del montaggio dei pannelli dei camerini.

Le attività di installazione si sono inserite nel complesso e articolato programma generale dei lavori, adattandosi ai fronti di lavoro disponibili e alle milestones intermedie di realizzazione del progetto.

Le prime attività di cantiere svolte sono state di tipo propedeutico alla definizione del progetto esecutivo. È stato innanzitutto svolto un accurato rilievo topografico di tutte le superficie sedi di intervento che ha fornito la base per la progettazione di dettaglio. Nel contempo sono state eseguite prove di estrazione dei tasselli, in accordo con i carichi di progetto, sulle differenti tipologie di supporti, dal calcestruzzo armato e murature in laterizio esistenti alle nuove murature in blocchi di gas-beton: tali prove sono state eseguite al fine di valutare localmente il sistema di ancoraggio più adatto, fosse esso di tipo meccanico o chimico.

Gli angolari puntuali di sostegno sono stati invece ancorati alle strutture metalliche tramite saldatura eseguita in cantiere (Fig. 25).



Figure 25. Cladding of the access stairs to the gallery. / Rivestimento della scala di accesso alle gallerie.

L'installazione sull'alto volume della torre scenica (Fig. 26) è stato, per gran parte, realizzato mediante l'impiego di piattaforme automontanti per raggiungere anche i punti più alti. In particolare, sulla facciata nord della torre, prospiciente il più basso tetto in falda della sala teatrale, i sostegni delle piattaforme sono stati ancorati direttamente alla parete in calcestruzzo armato mediante dispositivo di sostegno appositamente progettato e realizzato. Gli angolari puntuali di sostegno agli incorpori nelle lastre sono stati ancorati alle murature tramite tassellatura, per le murature e le pareti in c.a., o tramite saldatura eseguita in cantiere sulle strutture metalliche.



Figure 26. North Scenic Tower assembly. / Montaggio della Torre Scenica a nord.

I lavori di cantiere si sono conclusi, come da programma, nelle tempistiche previste per l'inaugurazione ufficiale del Teatro a fine novembre 2020, poi sospesa a causa del protrarsi della pandemia (Fig. 27).



Figure 27. Eastern façade assembly. / Montaggio della facciata est.

8 CONCLUSIONI

The redevelopment project of the Donizetti theatre is one of the most important and notable projects carried out in the recent years in the city of Bergamo. The work done on the façades has been tackled by an outstanding solution that made it possible to limit the additional loads of the existing buildings, to use materials of long durability and to give the building the sense of continuity of the finishing with the pre-existing building.

This is an application that demonstrates how pre-cast concrete, with a great variety of technical and finishing solutions offered, can also be used for several areas and applications, where other materials and technologies are typically used.

The study and development of the project, both from a technical and operational point of view, was certainly rather complex and onerous, but it has shown that the new technologies available for cementitious materials open up broad prospects and new possibilities of use (Fig. 28). / La riqualificazione del Teatro Donizetti è uno dei progetti più im-

portanti portati a termine negli ultimi anni nella città di Bergamo a causa della sua grande significatività estetica. L'intervento sulle facciate è stato affrontato con una soluzione innovativa che ha permesso di limitare i carichi aggiuntivi sulle opere esistenti, di impiegare materiali di particolare durabilità e di conferire all'edificio l'effetto di continuità di finitura rispetto alle opere preesistenti.

Si tratta di un'applicazione che dimostra come la prefabbricazione in calcestruzzo, con le grandi varietà di soluzioni tecniche e di finitura che offre, possa essere positivamente utilizzata anche in settori e applicazioni in cui normalmente vengono adottati altri materiali e tecnologie.

Lo studio e la messa a punto del progetto, sia dal punto di vista tecnico che operativo, è stata certamente piuttosto complessa e onerosa, ma dimostra come le nuove tecnologie disponibili per i materiali cementizi aprano ampie e nuove possibilità di utilizzo.



Figure 28. View of the Donizetti Theater. / Vista del Teatro Donizetti.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare: lo Studio Arassociati e lo Studio Pezzetti, componenti del team di progettazione architettonica; lo studio SPC e il Prof. Giorgio Croci, progettisti strutturali generali; l'ing. Alessandro Bozzetti, direzione lavori strutturale; l'ing. Franco Melocchi, progettista delle componenti e strutture metalliche di facciata; il Prof. Matteo Colombo del Politecnico di Milano, responsabile scientifico dei test di laboratorio sui materiali e sulle lastre. Un ringraziamento particolare all'arch. Giovanni Mantovani e all'ing. Marcello Maltagliati di Fantino Costruzioni Spa e Notarimpresa Spa, imprese appaltatrici dell'intervento complessivo di restauro. Si ringrazia Gianfranco Rota per la gentile concessione delle fotografie Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 28.

REFERENCES

- [1] Colombo, I.G., Colombo, M., di Prisco, M., 2014 Pannello multi-strato prefabbricato di facciata: ottimizzazione strutturale per l'adeguamento energetico e per costruzioni sostenibili, *Atti del Convegno CTE, Milano*.
- [2] Colombo, I.G., Colombo, M., Magri, A., Zani, G., di Prisco, M., 2012 Malte rinforzate con reti in fibra di vetro al-

calino-resistenti: un'indagine sperimentale sui parametri di progetto, *Atti del Convegno CTE, Bologna*.

- [3] Colombo, I.G., Colombo, M., di Prisco, M., 2014 Comportamento a trazione del calcestruzzo rinforzato con rete in fibra di vetro (TRC) soggetto a cicli di gelo-disgelo in condizione non fessurata e prefessurata, *Atti del Convegno CTE, Milano*.
- [4] Brumana, R., di Prisco, M., Colombo, M., Marchi, F., Terletti, S., Coeli, F., Failla, C., Sonzogni, F., 2016 ALER Building in Cinisello Balsamo (MI): an example of energy efficient refurbishment with EASEE method, *Atti del Convegno CTE, Roma*.
- [5] Italcementi - Effix Architecture - Avis Technique 2/13-1566 (2012).
- [6] ISO 7892 (2012) Vertical building elements – Impact resistance tests – Impact bodies and general test procedures.
- [7] ETAG 034 (2012) Guideline for European technical approval of kits for external wall claddings – Part I: Ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings, Brussel.
- [8] EOTA TR 001 (2003) Determination of impact resistance of panels and panel assemblies.