

Innovative technical solutions for improving performance of wooden floors

Davide Prati*, Matilde Signorello, Riccardo Gulli

Highlights

At design level it was developed an innovative sandwich plywood panel slab made with a core of a GFRP moulded grating.

This new composite structural element aims at improving existing wooden slabs using only mechanical connections.

The main features of the slab were laboratory tested in terms of stiffness and flexural displacement.

After testing and data analysis it was proposed a simplified calculation method for its use in residential buildings.

Abstract

This paper presents an innovative technology of timber floor whose function is both the replacement of horizontal elements in historical buildings, not subject to constraints of protection, and the utilization in new buildings. The new system responds to the market demand that requires high performance characteristics in terms of stiffness in the plane, correct transmission of the horizontal actions, lightness and low thicknesses. The floor at issue is composed of two plywood panels glued in the intrados and extrados to a moulded grid panel in GFRP with a single warping of glass fibres. We want here to present the stages of study, research and design, that helped define an element considerably rigid and at the same time lightweight, trying to contain the thickness of the section. Laboratory testing phase has highlighted the increase in stiffness and flexural limitation that the coupling of the moulded grid panel with plywood panels undergoes in the different configurations.

Keywords

Sandwich wooden panel slab, GFRP core moulded grating, Stiffness improvement, Cross section optimization

1. STATE OF THE ART

In historical construction, intermediate horizontal structures offer several recurring typologies. The most widespread, for upper floors' slabs, is a wooden structure with fitted boards, or tiles or wicker mats ("cannicciati"). The constructive typology is usually made up of beams in simple support on masonry walls, with less than 5 meters span. Above these stands directly wooden planks or the substructure on which the slab is placed.

Wooden beams static failure is a recurring aspect, largely due to poor availability in money and local materials. When the situation described above involves primary structural elements, without any particular architectural qualities, the possible intervention of renovation is inappropriate for both

Davide Prati

DA - Dipartimento di Architettura,
Università di Bologna, viale del
Risorgimento 2, Bologna, 40136,
Italia

Matilde Signorello

Ingegnere Edile-Architetto,
Bologna, Italia

Riccardo Gulli

DA - Dipartimento di Architettura,
Università di Bologna, viale del
Risorgimento 2, Bologna, 40136,
Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-347-4108978;
e-mail: davide.prati5@unibo.it

economic and operational reasons. This allows for greater stiffness in the plane, proper connection between structural components, suitable cross sections and elimination of the most common degradation causes. [7-8-10]

In the last century, in non-monumental historic buildings without safeguard restrictions, replacing wooden floors with concrete and masonry flooring systems was normal practice, even compulsory when operating in seismic areas, until promulgation of “Ordinanza No 3227/2003” into Italian regulation. Adopting this system shown many problems over time, especially following seismic events; floors and roofs, made up of reinforced concrete lying on ancient walls built in brick, stone or mixed techniques, amplified the earthquake effects. Because of excessive weight and extreme stiffness, they caused greater push on the walls, enough to produce, in some cases, crushing and overturning. [1-11]

In this regard, construction market proposes many innovative systems designed to ensure stiffness in the floor plane together with a proper transmission of horizontal actions, with significantly lower weights. Most of the solutions however present the application of wood-concrete mixed floors. [16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-33-34-35]

2. WOODEN SLAB'S FEATURES

The component, subject matter of experimentation, well integrable into nowadays' market, has to face floors ordinary functions: loads' support and distribution to vertical structures, as well as connection between the walls to ensure greater stability. One key feature is lightness, to avoid, in case of earthquake, the onset of high dynamic actions on the walls, the main cause of their collapse outside the plane for thrust and hammering. [5]

The floor at issue consists of a core made of a grating printed in polyester resin, reinforced with a single frame of glass fibres. This is an innovative structural element with high load-bearing capacity, low thickness and low weight.

In order to increase its stiffness, the structural core has been coupled with plywood panels both at the intrados and at the extrados. The coupling of GFRP gratings and wood multilayer panels is done by a gluing system made with a high performance adhesive and fiberglass mesh.

This solution minimizes relative sliding problems between various layers and punching phenomena associated with the use of mechanical connectors, which will be employed only for connections to the bearing structure and to the perimetric bond-beam. [2-3] Glass fibre mesh, which acts as a “matrix” for bonding, is functional in restoring the discontinuities determined by joints

1. STATO DELL'ARTE

Nell'edilizia storica gli orizzontamenti intermedi presentano diverse tipologie ricorrenti. La più diffusa, per i solai dei piani superiori, è costituita da una struttura lignea con impalcato in assito, in pianellato o con stuoiate (cannicciati). La tipologia costruttiva è generalmente costituita da travi in semplice appoggio sulle murature d'ambito con luci mediamente inferiori ai 5 metri. Al di sopra di queste stesse poggia direttamente il tavolato o una struttura secondaria su cui è disposto l'impalcato.

L'insufficienza statica delle travi lignee è un aspetto ricorrente, dettato prevalentemente da una scarsa disponibilità economica e di materiali locali. Nel caso in cui la situazione sopra descritta interessi elementi strutturali primari, privi di particolari qualità architettoniche, l'eventuale intervento di ripristino risulta inopportuno, sia per ragioni economiche sia operative. In tal caso si preferisce quindi la completa sostituzione del solaio con travi e impalcato di nuova fattura. Si può così garantire una maggiore rigidità nel piano, una corretta connessione tra gli elementi strutturali, idonee sezioni resistenti e l'eliminazione delle più comuni cause di degrado. [7-8-10]

Nel secolo scorso, negli edifici storici non a carattere monumentale e privi di vincoli di salvaguardia, la sostituzione di solai lignei con solai latero cementizi era pratica frequente, nonché obbligatoria quando si operava in zone sismiche, fino alla promulgazione dell'Ordinanza n.3274/2003. L'adozione di questo sistema ha mostrato nel tempo non pochi problemi, soprattutto in seguito a eventi sismici; i solai e le coperture, realizzati in cemento armato appoggiati a murature antiche realizzate in mattoni, pietrame o a tecnica mista, hanno amplificato gli effetti del sisma. A causa del peso troppo elevato e della estrema rigidità hanno determinato maggiori spinte sulle pareti d'ambito tanto da causarne, in certi casi, lo sgretolamento e il ribaltamento. [1-11]

A tal proposito, il mercato delle costruzioni propone una serie di sistemi innovativi volti a garantire la rigidità nel piano del solaio unitamente ad una corretta trasmissione delle azioni orizzontali, con pesi nettamente inferiori. La gran parte delle soluzioni presenta comunque l'applicazione di solai misti legno-calcestruzzo. [16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30-31-32-33-34-35]

2. CARATTERISTICHE DELL'IMPALCATO

L'elemento di fabbrica oggetto di sperimentazione, che ben si inserisce nel mercato odierno, è chiamato ad assolvere le funzioni ordinarie degli orizzontamenti: sostegno dei carichi e ripartizione degli stessi alla struttura in elevazione, nonché collegamento tra le pareti garantendone una maggiore stabilità. Caratteristica fondamentale è la leggerezza per scongiurare, in caso di sisma, l'insorgenza di elevate azioni dinamiche sulle pareti, causa principale del collasso fuori dal piano delle stesse per spinta e

between gratings. The whole package has a significant reduction in weight and thickness compared to a traditional intervention with cooperating r.c. slab: the plywood panels have a weight of about 5 kg/m² for 9 mm thick while the moulded grating weighs about 30 kg/m² for 42 mm thick. Total thickness is therefore limited to 62 mm and the entire slab weighs about 40 kg/m². (Fig. 1)

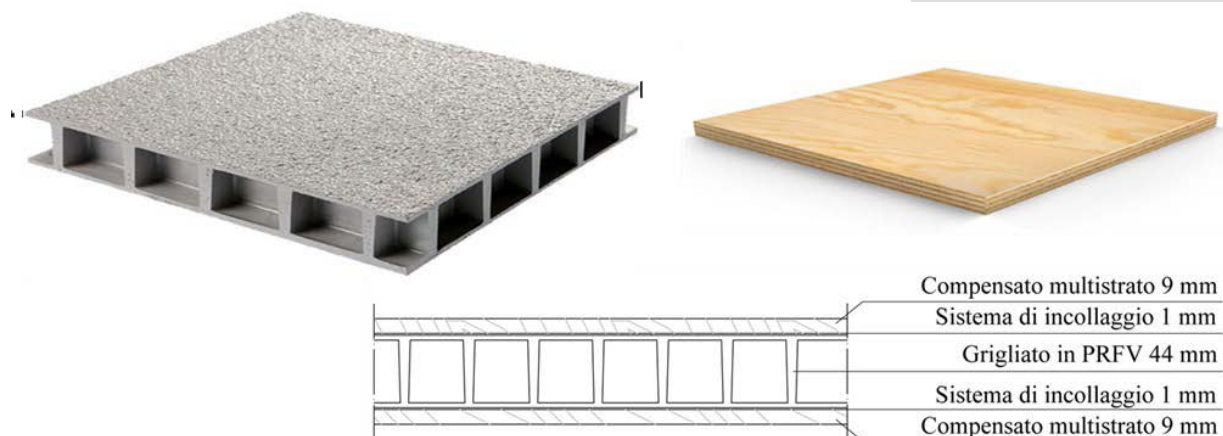


Figure 1. Sandwich panel slab composition.

3. FIRST TESTING PHASE

Experimental work main purpose is to highlight stiffness increase and bending limitation generated by coupling moulded grating panels with plywood panels. The experimentation involves a comparison of two adhesives to determine which one ensures better cohesion between materials and highest mechanical properties to the entire panel. The two adhesives compared are a water based one, IPN, and an epoxy resin.

All types of tests defined match up to different configurations of the specimens. In first place for presence or absence of structural layer discontinuities, related to the need to test slab behaviour in presence of disconnections dictated by standard moulded panels sizes (usually 1220x2000 mm). On second hand for the use of the two bonding systems in order to decree which one ensures the best performances. The specimens tested consider, in fact, both non-discontinuous configurations and discontinuous ones, with joints in the moulded panels near the maximum stress zones, concerning bending moment (mid-point) and shearing force (support).

A specially designed test machine configuration has been crafted in order to determine resistance and stiffness of tested slabs. Through this, it has been carried out a four points bending test in order to test 1220x300 mm specimens,

martellamento. [5]

L'impalcato in esame è costituito da un'anima realizzata con un grigliato stampato in resina poliestere rinforzato con un'unica orditura di fibre di vetro. Si tratta di un elemento strutturale innovativo con capacità portanti elevate, spessori contenuti e peso proprio ridotto.

Per incrementarne la rigidità, il "core" strutturale è stato accoppiato

con pannelli multistrato di legno sia all'intradosso che all'estradosso. La solidarizzazione dei grigliati in PRFV e dei pannelli in legno avviene mediante un sistema di incollaggio realizzato con un adesivo ad alte prestazioni e una rete in fibra di vetro. Questa soluzione minimizza i problemi di scorrimento relativo fra i vari strati ed i fenomeni di punzonamento legati all'utilizzo di connettori meccanici, che verranno impiegati esclusivamente per i collegamenti alla struttura portante ed al cordolo perimetrale. [2-3] La rete in fibra di vetro, che funge da "matrice" per l'incollaggio, è funzionale al ripristino delle discontinuità determinate dai giunti tra i grigliati. L'intero pacchetto presenta un peso ed uno spessore sensibilmente ridotti rispetto al tradizionale intervento con soletta collaborante in c.a.: i pannelli di compensato hanno un peso di circa 5 kg/m² per 9 mm di spessore mentre il grigliato pesa circa 30 kg/m² per 42 mm di spessore determinando uno spessore totale limitato a 62 mm per circa 40 kg/m². (Fig. 1)

3. PRIMA FASE DI SPERIMENTAZIONE

Lo scopo principale del lavoro sperimentale condotto è quello di evidenziare l'incremento di rigidità e la limitazione flessionale ottenute dall'accoppiamento del grigliato con i pannelli multistrato di legno. La sperimentazione prevede una comparazione tra due tipi di adesivi al fine di determinare quale assicuri migliore adesione tra i materiali e più elevate caratteristiche meccaniche all'intero impalcato. I due adesivi

with span between supports 1000 mm.

This choice was made in order to obtain a condition close to that of the actual laying configuration, in which wooden beams, on which lies the slab, have 1000 mm span. The load is supplied by a press through a splitter that transfers load to two loading pins symmetrically positioned at 350 mm from the external supports (Fig. 2).

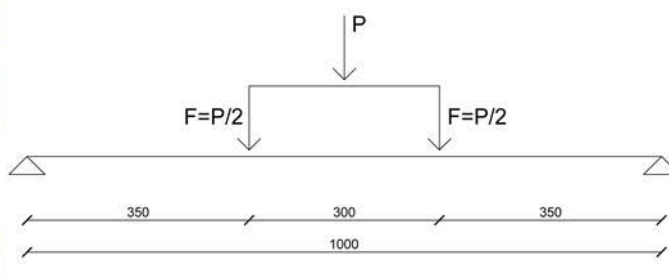


Figure 2. Configuration of the testing machine.

The test machine was calibrated using two different data tracking systems: two electromagnetic displacement transducers (LVDT) and a specific DIC 3D camera (Digital Image Correlation) able to determine three-dimensional displacements and deformations by capturing stereoscopic images. [14] Monotonic and quasi-static cyclic tests were performed on different sandwich panel configurations. Standalone tests were also performed both on moulded grating panels and on plywood panels.

The testing and analysis procedure used for single specimens was the same for all configurations. In monotonic tests, the sample was loaded until reaching crisis and subsequently discharged. In cyclic tests, subsequent loading steps were followed (10, 20, 30 kN) unloading the specimen every time to check the onset of plasticity residue.

For sandwich panels, plywood panel failure was considered as slab's crisis: once occurred, the specimen was unloaded. Subsequently, results obtained from different tests were compared to determine the real increase in stiffness of the sandwich panel compared to the single moulded grating, as well as for gluing system choice.

4. DATA ANALYSIS

Thanks to results extrapolation, after processing the images captured with the DIC system, intrados vertical displacements were identified to define most stressed areas. Five checkpoints were selected on the specimen centre line to evaluate panel homogeneity in response to loading. (Fig. 3)

confrontati sono uno ad acqua, IPN, e una resina epossidica.

Il numero di prove definito corrisponde a diverse configurazioni dei provini sia per la presenza o assenza di discontinuità nello strato strutturale, legate all'esigenza di testare il comportamento dell'impalcato in presenza dei giunti dettati dalle misure standard dei grigliati (generalmente 1220x2000 mm), sia per individuare quale dei due sistemi di incollaggio

assicuri le migliori performances. I provini oggetto della sperimentazione prevedevano, infatti, configurazioni prive di discontinuità e altre con giunti a livello del grigliato in prossimità delle zone di sollecitazione massima in termini di momento (mezzzeria) e taglio (appoggio).

Al fine di determinare la resistenza e la rigidità dell'impalcato si è scelto di realizzare una prova di carico a flessione a quattro punti attraverso una configurazione della macchina di prova, studiata ad hoc, tale da testare un elemento di dimensioni 1220x300 mm, con interasse tra gli appoggi di 1000 mm. Tale scelta è stata effettuata al fine di ottenere una condizione prossima a quella della reale configurazione di posa, in cui le travi lignee su cui poggia l'impalcato abbiano luce pari a 1000 mm. Il carico è impartito da una pressa attraverso un ripartitore e due coltelli di carico posizionati simmetricamente a 350 mm dagli appoggi (Fig. 2).

La macchina di prova è stata tarata utilizzando due diversi sistemi di rilevamento dei dati: due trasduttori di spostamento elettromagnetici (LVDT) e una fotocamera DIC 3D (Digital Image Correlation) in grado di determinare spostamenti e deformazioni tridimensionali attraverso l'acquisizione di immagini stereoscopiche. [14] Sono state eseguite prove monotone e cicliche quasi-statiche su diverse configurazioni e sui singoli componenti dell'impalcato in esame. Il procedimento di prova e di analisi adottato per i singoli provini è stato il medesimo per tutte le configurazioni. Per le prove monotone il campione è stato quindi caricato fino al raggiungimento del momento di crisi e successivamente scaricato. Nelle prove cicliche sono stati seguiti successivi step di carico (10, 20, 30 kN) scaricando ogni volta il provino per verificare l'insorgenza di residuo plastico. Per i provini composti da grigliato e legno, la rottura del pannello in legno è stata considerata

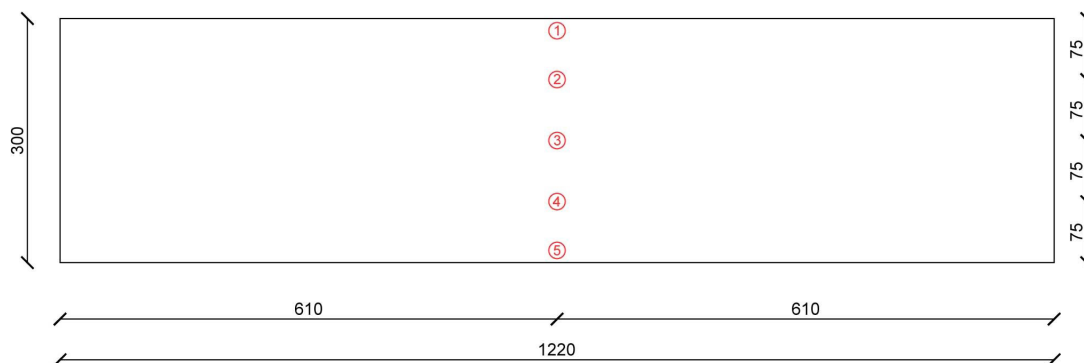


Figure 3. Checkpoints on the centreline of the specimen.

The load-displacement graphs of checkpoints detected are useful in comparing deflections during the test. This comparison showed that it is possible to refer just to the central point's load-displacement graph, point 3, in comparing the different tests. By comparing LVDT data with the DIC ones, concerning outermost checkpoints in the centre line, corresponding to the position of transducers, it is possible to determine any breaks during the test, in order to verify the proper functioning of bonding system. The graph shows that, since the curves are substantially overlapping, the specimen has not detached itself. All the examined specimens confirm these results. (Fig. 4)

come crisi dell'impalcato, avvenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino. Successivamente i risultati ottenuti dalle diverse prove sono stati comparati al fine di determinare l'effettivo incremento di rigidità dell'impalcato completo rispetto al singolo grigliato, nonché per la scelta del sistema di incollaggio.

4. ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI

Grazie all'extrapolazione dei risultati, a seguito dell'elaborazione delle immagini acquisite con il sistema DIC, sono stati individuati gli spostamenti verticali dell'intradosso del provino in modo da definire

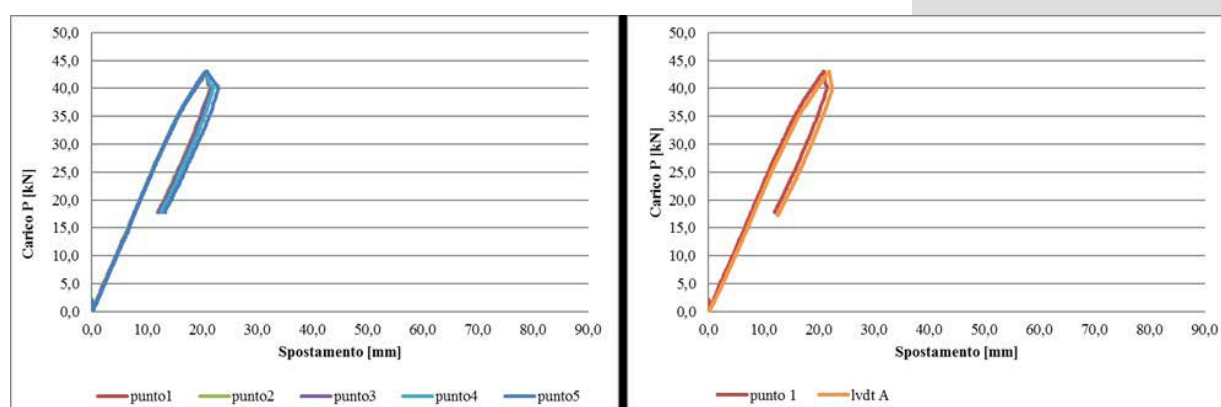


Figure 4. Load-displacement graph comparison between DIC's checkpoints;
load-displacement graph comparison between DIC and LVDT.

5. COMPARISON BETWEEN TESTING RESULTS

Once all ten tests have been performed, it was possible to correlate collected results in order to better define the panel's characteristics and the two interfaces. Crosswise comparisons were made, between tests with the same adhesive and different configurations, as well as vertical ones, between similar configurations with different adhesives.

le aree maggiormente sollecitate. Sulla mezzeria del provino sono stati scelti cinque punti campione per valutare l'omogeneità della risposta dell'impalcato sotto carico. (Fig. 3) I grafici carico-spostamento dei punti individuati sono utili al fine di compararne l'abbassamento nel corso della prova. Grazie a tale confronto si è dimostrato come sia possibile giustificare l'utilizzo del grafico carico-spostamento del solo punto 3, quello centrale, nella fase di confronto tra le diverse prove. Attraverso un ulteriore confronto tra i dati ottenuti

5.1. COMPARISON OF TESTS PERFORMED ON SANDWICH PANEL WITHOUT DISCONTINUITY AND SINGLE MOULDED GRATING

The addition of plywood panels resulted in a remarkable increase in stiffness, but caused a decrease in the maximum load corresponding to the specimen crisis, when compared to the standalone moulded grating one. This is true if the specimen crisis is meant as the moment when one of its components breaks. In fact, only the underlying plywood panel cracked, subjected to tensile stress, at a load lower than the one reached by the single moulded grating. This assumes that, if the specimen were still loaded after the plywood panel failure, the load-displacement curve would be positioned close to that of the single moulded grating, ensuring a maximum load closer to that of the test in question, or even greater. In this case, stiffness would have been affected, being subjected to a drastic drop caused by the intrados panel loss of collaboration.

In regards to the two sandwich panels with different adhesives, results do not deviate too much from each other, leaving great freedom in gluing system choice.

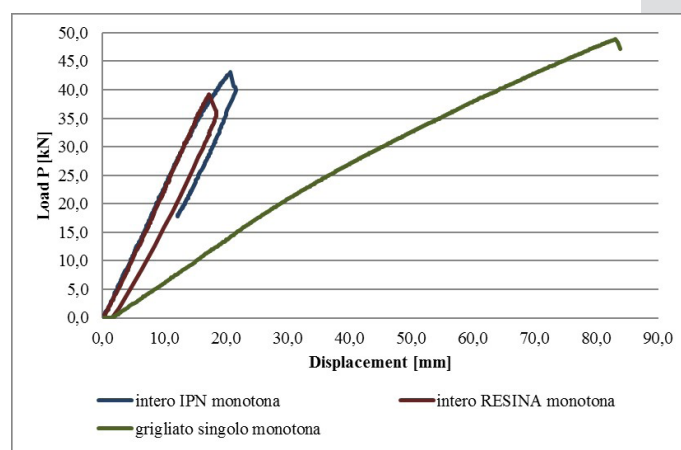


Figure 5. Load-displacement graph comparison between different adhesives and single moulded panel.

5.2. COMPARISON OF TESTS PERFORMED ON SANDWICH PANEL WITH DISCONTINUITY IN THE MIDDLE AND NEAR THE SUPPORT

In the presence of the central discontinuity in the grating, the behaviour of the two specimens with IPN gluing system and epoxy resin was extremely similar, with a slight decrease in performance in the IPN system.

dagli LVDT con quelli della DIC, relativi ai punti più esterni in mezzzeria, corrispondenti alla posizione dei trasduttori, è invece possibile determinare eventuali scollamenti nel corso della prova in modo da verificare il corretto funzionamento del sistema di incollaggio. Dal grafico si evince che, essendo le curve tra loro sostanzialmente sovrapponibili, il provino non ha subito distacchi. Questi risultati sono stati confermati da tutti i provini esaminati. (Fig. 4)

5. CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI

Una volta effettuate tutte e dieci le prove è stato possibile mettere in relazione i risultati raccolti in modo da definire maggiormente le caratteristiche dell'impalcato e delle due interfacce. Sono stati effettuati confronti sia trasversali, tra prove che prevedevano stessa tipologia di incollaggio e diverse configurazioni, sia verticali, tra configurazioni analoghe con tipologie di incollaggio differenti.

5.1. CONFRONTO PROVE SU IMPALCATO COMPLETO SENZA DISCONTINUITÀ E GRIGLIATO SINGOLO

L'aggiunta dei pannelli in multistrato in legno ha portato ad un notevole aumento della rigidità totale, comportando però anche una diminuzione del carico corrispondente alla crisi del provino rispetto al singolo grigliato. Quanto detto è

vero se si intende come crisi del provino il momento in cui uno degli elementi che lo compongono giunge a rottura. Si è assistito infatti alla sola rottura del pannello multistrato ligneo sottostante, sottoposto a trazione, a un carico inferiore a quello massimo del singolo grigliato. Questo fa presupporre che, nel caso in cui il provino fosse stato ancora caricato, la curva carico-spostamento, in seguito alla rottura del legno, si sarebbe posizionata in prossimità di quella del grigliato singolo, garantendo un carico massimo prossimo, se non maggiore, a quello del provino in

Conversely, in case of a joint near the support, the performance of the panel glued with water adhesive (IPN) was lower than that of the epoxy resin. In case of the IPN, the plywood panel unglued without cracking. This is related to a lack of strength of the adhesive in shearing force: once it became too high, it generated the detachment of the two surfaces in the point where strains and fragility were greater.

questione. In questo caso ne avrebbe però risentito la rigidezza, soggetta ad un drastico calo causato dalla perdita di collaborazione del pannello ligneo all'intradosso.

Per quel che concerne i due impalcati completi con incollaggio differente, i risultati non si discostano troppo gli uni dagli altri, lasciando grande libertà nella scelta dell'adesivo.

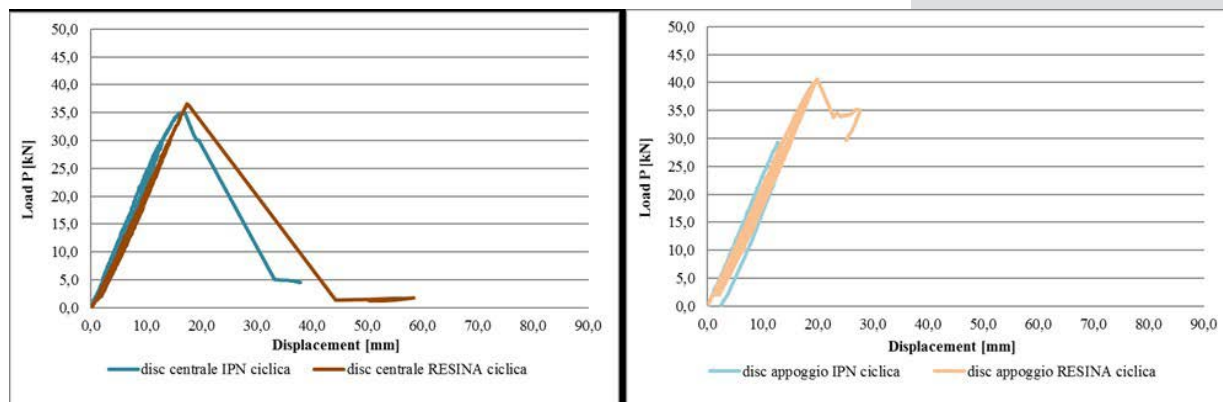


Figure 6. Load-displacement graph comparison between different adhesives: a) centreline discontinuity; b) side discontinuity.

5.3. COMPARISON BETWEEN THE RESULTS OF CURRENT TESTS AND THE PREVIOUS ONES

Since a previous test campaign has been carried out on this sandwich panel, using a different adhesive applied without glass fibre mesh, it is possible to compare the results obtained from tests with the same typological characteristics. In particular, a comparison was made between packages presenting the new gluing systems, IPN or epoxy resin, and the previous epoxy adhesive.

5.2. CONFRONTO PROVE CON DISCONTINUITÀ IN MEZZERIA E IN PROSSIMITÀ DELL'APPOGGIO

In presenza della discontinuità centrale del grigliato, il comportamento dei due provini, rispettivamente con incollaggio in IPN e resina epossidica, è risultato estremamente simile, con una leggera diminuzione delle prestazioni nel sistema con l'IPN. Al contrario nel caso di giunto in prossimità dell'appoggio le caratteristiche prestazionali del pacchetto che prevede l'utilizzo dell'adesivo ad acqua (IPN) sono risultate inferiori a quelle

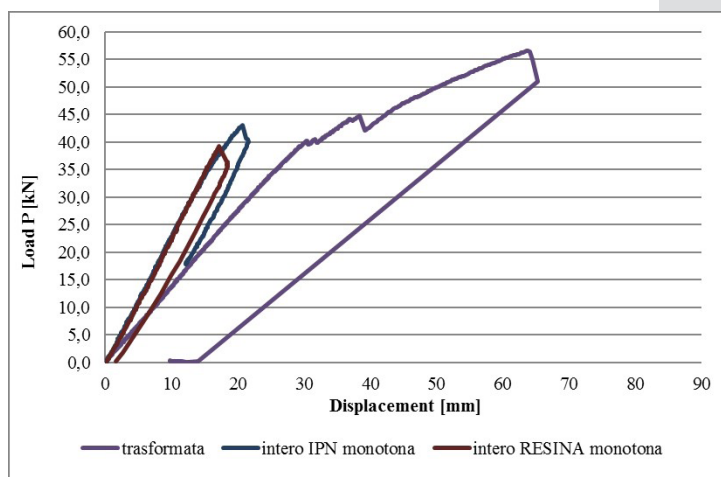


Figure 7. Load-displacement graph comparison with previous tests.

The presence of glass fibre mesh in the new configurations increases the panel stiffness, to the detriment of ultimate load, which is lower. Stiffness increase is clear from the first load values, where the slope of the curve tangent line is significantly greater, providing smaller deflections. Early failure phenomena, however, can be attributed to the over-stiffness of the interface. This causes greater stress on plywood panels, therefore they crack first, without compromising the resistance reserve determined by the grating, which remains intact.

5.4. CONCLUSIONS ON THE FIRST PHASE OF EXPERIMENTATION

This first phase of experimentation allowed achieving the goals set at the beginning of the path. The comparison between the different adhesives, IPN and epoxy resin, showed that their mechanical response is almost coincident, in terms of maximum bearable load and stiffness. The stiffness increase given by the grating-wood coupling is quite marked, the maximum flexural deflection drops from about 83 mm for the single grating to about 20 mm for the sandwich panel.

The aspects that lead to prefer resin are related to a factor of practicality in laying and gripping times. The workability of the IPN has a direct dependence on its preparation, which is strongly modified by the addition of the thixotropic agent. This adhesive showed signs of collapse in the test with separation between the gratings placed near the support, resulting in an interface detachment, similar to a lack of resistance in case of high shear stresses. The addition of fiberglass mesh further contributes to increase stiffness and limit flexural displacements. Through monotonous tests, it was also verified that ultimate loads are extremely high, well above those used for residential slabs.

6. CRITICAL CONSIDERATIONS ABOUT THE SANDWICH PANEL'S STIFFNESS

After the experimental phase, which has shown excellent results in terms of stiffness and flexural limitation, it seems appropriate to make a critical analysis of obtained results. This in order to be able to define whether the placement of the grating between the two plywood panels is effective, ensuring a maximized contribution. The goal is to obtain a slab not only effective and able to bear considerable size loads, but equally efficient, ensuring to obtain these results in the best possible way.

dell'impalcato con resina epossidica. Non si è giunti, nel caso dell'IPN, alla rottura del pannello in legno, ma si è assistito allo scollaggio dello stesso. Ciò è legato ad una mancanza di resistenza dell'adesivo alla sollecitazione a taglio: una volta divenuta troppo elevata, ha generato il distacco delle due superfici nel punto di maggiore sollecitazione e fragilità.

5.3. CONFRONTI TRA I RISULTATI DELL'ATTUALE SPERIMENTAZIONE E DELLA PRECEDENTE

Essendo già stata effettuata una precedente campagna di sperimentazione su questa tipologia di impalcato, in cui era previsto un adesivo differente e un'interfaccia priva di rete in fibra di vetro, si sono voluti confrontare i risultati ottenuti dalle prove con le medesime caratteristiche tipologiche. In particolare è stato effettuato un confronto tra i pacchetti che presentano le nuove tipologie di incollaggio, IPN o resina epossidica, ed il precedente adesivo epossidico. La presenza della rete nelle nuove configurazioni comporta un incremento di rigidità dell'impalcato, a discapito del carico di rottura, che risulta inferiore. L'aumento della rigidità è visibile fin dai primi valori di carico, dove la pendenza della retta tangente alla curva è nettamente maggiore, garantendo frecce minori. Fenomeni di rottura precoce, invece, possono essere ricondotti all'eccessiva rigidità dell'interfaccia. Questo causa maggiori stress sui pannelli multistrato che giungono prima a rottura senza pregiudicare, però, la riserva di resistenza determinata dal grigliato stampato singolo, che rimane comunque integro.

5.4. CONCLUSIONI SULLA PRIMA FASE DI SPERIMENTAZIONE

Questa prima fase di sperimentazione ha permesso di raggiungere gli obiettivi preposti all'inizio del percorso. Il confronto tra i diversi adesivi, IPN e resina epossidica, ha dimostrato che la risposta meccanica dei due risulta pressoché coincidente, in termini di carico massimo sostenibile e di rigidità. L'incremento di rigidità dato dall'accoppiamento legno-grigliato risulta piuttosto marcato, la deformazione flessionale massima passa da circa 83 mm per il grigliato singolo a circa 20 mm per l'impalcato sandwich.

Gli aspetti che portano a preferire la resina sono legati a un fattore di praticità di posa in opera e ai tempi di maturazione. La lavorabilità dell'IPN ha una dipendenza diretta con la sua preparazione, si modifica con l'aggiunta dell'agente tixotropico. Lo stesso adesivo ha mostrato segni di cedimento nella prova con il giunto tra i grigliati posto in prossimità dell'appoggio, comportando un distacco dell'interfaccia, assimilabile con una mancata resistenza in caso di sollecitazioni a taglio elevate. L'aggiunta della rete in fibra di vetro contribuisce ulteriormente all'incremento di rigidità e alla limitazione flessionale. Attraverso le prove monotone, inoltre, si è potuto constatare che i carichi di rottura

After experimentally determining the elastic modulus E_g of the grating, total stiffness of the entire slab has been calculated, given the elastic modulus E_l of plywood panels and the moments of inertia J of the resistant cross sections.

$$EJ = E_g J_g + E_l J_l = (1,043 \cdot 10^4 \cdot 1,136 \cdot 10^6) + (7,433 \cdot 10^3 \cdot 3,829 \cdot 10^6) \\ = 4,030 \cdot 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$

From this result, the percentage contribution of the grating can be calculated:

$$\% = 100 \cdot \frac{E_g J_g}{EJ} = 100 \cdot \frac{1,043 \cdot 10^4 \cdot 1,136 \cdot 10^6}{4,030 \cdot 10^{10}} = 29\%$$

It is evident from this parameter that the grating is not exploited at its fullest mechanical potential, as the percentage of maximum bore bending moment does not reach high values. [9]

The incorrect placement of the grating, which implies an ineffective exploitation, is evidenced by the fact that just after failure, cracking occurred only in the lower plywood panel, subjected to tensile stress, whereas in the composite material inside the core of the sandwich panel failure did not occur. Given these experimental data, the slab cross section with grating inserted between two plywood panels does not optimize these two materials performance. The grating contribution is significantly lower than the plywood, less performing material. This is theoretically the result of internal stress distribution, generated by the application of a bending moment. [15] Therefore it is obvious, even at a theoretical level, that the grating, located near the neutral axis, is placed in a position that does not allow its maximum exploitation while the wood is placed in the most stressed areas. [13]

Trying to ensure a more rational use of the composite material, more performant to tensile stress, it was decided to search for other design solutions redistributing the cross section components in order to place the most performant in the most stressed position.

Bearing this in mind, the new design hypotheses, studied analytically in terms of total stiffness and percentage contribution of the grating, provide for a different distribution of the elements. In the first instance it was supposed to remove the underlying plywood panel; this solution shows an increase in grating contribution accompanied by a marked decrease in total stiffness. (Tab. 1)

Subsequently, it was hypothesized to double the thickness of the upper plywood panel while leaving the intrados free; in this case, results were more satisfactory because, while maintaining a high grating contribution, stiffness

sono estremamente elevati, ben oltre quelli di esercizio per solai di civile abitazione.

6. CONSIDERAZIONI CRITICHE SULLA RIGIDEZZA DELL'IMPALCATO

Terminata la fase sperimentale, che ha mostrato ottimi risultati in termini di rigidezza e limitazione flessionale, risulta opportuno effettuare un'analisi critica di quanto determinato. Questo per poter definire se il posizionamento del grigliato interposto tra i due pannelli multistrato sia corretto, garantendo un contributo massimizzato. L'obiettivo è quello di ottenere un impalcato non solo efficace, e quindi in grado di riprendere carichi di notevole entità, ma altrettanto efficiente, garantendo l'ottenimento dei risultati nel miglior modo possibile.

Determinato sperimentalmente il modulo elastico E_g del grigliato è stata calcolata la rigidezza totale dell'impalcato, noto il modulo elastico dei pannelli multistrato in legno E_l , ed i momenti di inerzia J delle sezioni resistenti.

Da questo risultato si può calcolare la percentuale contributiva del grigliato. Risulta evidente da tale parametro, che il grigliato non viene sfruttato nel pieno delle sue potenzialità meccaniche, in quanto la percentuale di momento flettente massimo, assorbita dallo stesso, non raggiunge valori elevati. [9]

L'errato posizionamento del grigliato, che ne implica uno sfruttamento non ottimale, è evidenziato dal fatto che, al momento della rottura, si è assistito alla comparsa di lesioni solo sul pannello ligneo inferiore, soggetto a trazione, mentre il materiale composito, all'interno dell'impalcato, non ha subito rotture.

Basandosi su questi dati sperimentali, la sezione dell'impalcato con grigliato interposto a due pannelli multistrato di legno, non ottimizza la prestazione dei due materiali. Il contributo del grigliato è nettamente inferiore a quello del legno, materiale meno performante. Ciò è riconducibile, in via teorica, all'andamento a farfalla delle tensioni interne alla sezione, generate dall'applicazione di un momento flettente. [15] Da quanto affermato è evidente, anche a livello teorico, che il grigliato, posto in prossimità dell'asse neutro, si trovi in una posizione che non ne permette il massimo sfruttamento mentre il legno è posto nelle zone esterne, più

values close to those of the sandwich panel were achieved. The theoretical optimum solution would include the grating coupled at the extrados with a 21 mm thick plywood panel. This can generate a cross section optimization by obtaining a slab with maximized mechanical features in terms of both efficacy and efficiency.

*sollecitate. [13]
Per cercare di garantire un uso più razionale del materiale composito, maggiormente performante a trazione, si è pensato di ricercare soluzioni progettuali che vedano una ridistribuzione dei componenti della sezione in modo da predisporre quello più performante nei punti maggiormente sollecitati.
Tenuto conto di ciò le nuove ipotesi*

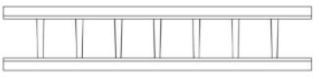
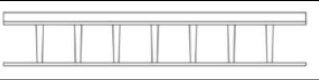


Graphical scheme	Total Height [mm]	Total Stiffness EJ [N/mm ²]	Grating contribution [%]
Symmetrical slab with moulded grating and 9 mm plywood panels both at the intrados and at the extrados			
	62 mm	$4,030 \times 10^{10}$	29%
Asymmetrical slab with moulded grating and 9 mm plywood panels only at the extrados			
	53 mm	$2,150 \times 10^{10}$	69%
Asymmetrical slab with moulded grating and 18 mm plywood panels only at the extrados			
	62 mm	$3,075 \times 10^{10}$	63%
Asymmetrical slab with moulded grating and 21 mm plywood panels only at the extrados			
	65 mm	$3,609 \times 10^{10}$	63%

Table 1. Comparison between symmetrical and asymmetrical configurations.

In view of the poor use of the grating in the initial configuration, the possibility of replacing it with a material with lower mechanical characteristics, such as polystyrene, was also investigated.

Various configurations have been hypothesized introducing XPS replacing the GFRP grating. The analytical results are reported in terms of stiffness, in order to be compared with that of the sandwich panel, object of the experimentation first phase. In analytical terms only the XPS of 60 mm thickness, if interposed between the wooden panels, would be able to guarantee a stiffness comparable to the one of sandwich panel containing the grating. (Tab. 2)

*progettuali, studiate analiticamente in termini di rigidità totale e contributo percentuale del grigliato, prevedono una diversa distribuzione degli elementi. In prima istanza si è ipotizzato di eliminare il pannello ligneo sottostante; tale soluzione manifesta un incremento del contributo del grigliato accompagnato da una netta diminuzione della rigidità totale. (Tab. 1)
Successivamente si è ipotizzato di raddoppiare lo spessore del multistrato superiore lasciando comunque libero l'intradosso; in questo caso i risultati sono stati più soddisfacenti in quanto pur mantenendo un contributo del grigliato elevato si sono raggiunti valori di rigidità prossimi a quelli*

Cross section configuration	Total height [mm]	Total stiffness EJ [N/mm ²]
Symmetrical slab with moulded grating and 9 mm plywood panels both at the intrados and at the extrados	62 mm	$4,030 \times 10^{10}$
Symmetrical slab with 40 mm XPS panel and 9 mm plywood panels both at the intrados and at the extrados.	58 mm	$2,440 \times 10^{10}$
Symmetrical slab with 60 mm XPS panel and 9 mm plywood panels both at the intrados and at the extrados.	78 mm	$4,816 \times 10^{10}$

Table 2. New symmetrical configurations with different core material.

7. SECOND TESTING PHASE

Following these considerations, a second phase of experimentation was carried out to prove theoretical expectations. These tests evaluate the insertion of extruded polystyrene (XPS) in place of the grating. Specimens were set up with different configurations characterized by different XPS thicknesses in order to determine whether stiffness and maximum loads were comparable to those of the sandwich slab containing the moulded grating. Because of better results obtained with epoxy resin during the first experimental phase, only this bonding system was used while excluding the IPN adhesive.

The testing machine has the same configuration as the first experimentation in order to obtain comparable results. Only the displacement transducers were used to determine bending in tested specimens because, basing on previous tests results, the acquisition with the DIC camera was considered redundant.

Even at this stage, the cracking of the upper plywood panel has been considered as crisis of the entire sandwich slab. Once reached the crisis, it was decided to unload the specimen, although it can be assumed that the lower plywood would have reached failure for tensile stress with higher loads.

7.1. COMPARISON BETWEEN THE RESULTS OF THE SECOND PHASE AND THE FIRST PHASE OF EXPERIMENTATION

The main purpose of this experimental phase is to determine the real need to use expensive and high performance material, such as GFRP gratings, inserted between two plywood panels. In the graph is shown the comparison between the load-displacement curve obtained for the sandwich panel consisting of 9 mm thick plywood panels coupled to the grating and those obtained for new experimentation specimens, where the grating is replaced by XPS panels of different thickness.

The graph shows that stiffness and strength of the slab containing polystyrene panels are considerably lower than the ones of the original design hypothesis. Furthermore, stiffness does not reach theoretically calculated values. This second experimental phase, unlike how analytically defined, has demonstrated the ineffectiveness of using a less performing material in the sandwich setup. Thus follows the need to keep GFRP grating as an interposition element between plywood panels.

From the comparison between the load-displacement curves of the specimens with XPS and the one with GFRP grating, there is a lack of correspondence

dell'impalcato tipo sandwich. La soluzione ottimale teorica prevedrebbe il grigliato accoppiato all'estradosso con un pannello multistrato in legno di spessore 21 mm, in grado di generare un'ottimizzazione della sezione resistente ottenendo un impalcato con caratteristiche meccaniche massimizzate sia in termini di efficacia sia di efficienza.

Alla luce dello scarso utilizzo del grigliato nella configurazione iniziale, ci si è interrogati anche in merito alla possibilità di sostituirlo con una materiale con caratteristiche meccaniche inferiori, ad esempio il polistirene.

Si sono ipotizzate varie configurazioni con l'introduzione di XPS in sostituzione del grigliato di cui si riportano i risultati analitici in termini di rigidità, da confrontare con quella dell'impalcato oggetto della sperimentazione iniziale. Esclusivamente in termini analitici l'XPS di spessore 60 mm, se interposto ai pannelli lignei, risulterebbe in grado di garantire rigidità paragonabili a quelle dell'impalcato contenente il grigliato. (Tab. 2)

7. SECONDA FASE DI SPERIMENTAZIONE

Facendo seguito alle considerazioni maturate, è stata portata avanti una seconda fase di sperimentazione volta a comprovare quanto affermato in via teorica. Le prove in questione prevedono l'introduzione del polistirene estruso (XPS) in sostituzione del grigliato. I provini presentano diverse configurazioni caratterizzate da differenti spessori di XPS al fine di determinare se le rigidità e i carichi massimi sono comparabili con quelli dell'impalcato contenente il grigliato stampato. Avendo ottenuto risultati migliori con la resina epossidica durante la prima campagna sperimentale, si è utilizzato solo questo sistema di incollaggio escludendo l'IPN.

La macchina di prova presenta la medesima configurazione della prima sperimentazione in modo da ottenere dei risultati comparabili. Per determinare gli abbassamenti dell'elemento di prova sono stati utilizzati soltanto dei trasduttori di spostamento in quanto in base ai risultati delle prove precedenti si è ritenuta l'acquisizione con la DIC ridondante.

Anche in questa fase, la rottura del pannello di legno superiore è stata considerata come crisi dell'impalcato. Ottenuta la stessa si è infatti deciso di scaricare il provino benché si possa ipotizzare che il multistrato inferiore avrebbe raggiunto la rottura per trazione con carichi superiori.

7.1. CONFRONTO TRA I RISULTATI DELLA SECONDA FASE DI SPERIMENTAZIONE E DELLA PRIMA FASE

Scopo principale di questa fase sperimentale è determinare l'effettiva necessità di utilizzare un materiale costoso e performante, quale il grigliato in PRFV, interposto ai due pannelli multistrato di legno. Si riporta pertanto il confronto tra la curva carico-spostamento ottenuta dall'impalcato composto da pannelli lignei di spessore 9 mm accoppiati

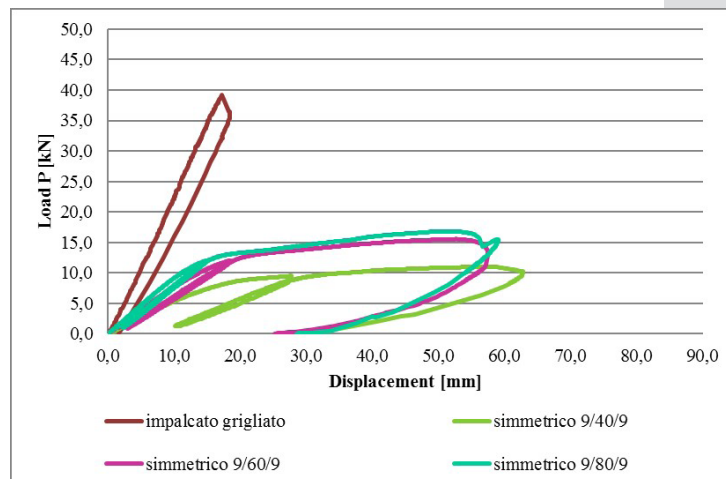


Figure 8. Load-displacement graph comparison between moulded panel GFRP sandwich and different XPS thicknesses.

between theoretical and practical stiffness values of the second experimental phase configurations.

The first ones would have shown a stiffness close to that obtainable with fibre-reinforced material. This hypothesis has been refuted by results of the experimentation, in which polystyrene and grating curves do not exhibit similar slopes.

In the previous analytical phase, the flexural stiffness of the symmetrical configurations with 9 mm thick plywood panels and variable XPS thicknesses were calculated.

To determine the stiffness obtained experimentally, we rely on the formulation of the deflection generated by the load pattern given by the testing machine.

$$EJ = \frac{Fa}{24f_{max}} (3l^2 - 4a^2)$$

From this formulation, it is possible to determine stiffness, known the maximum load and the maximum displacement, using the following formula:

As the load increases, the cross section modifies its shape, since the XPS is a compressible material, so stiffness is continuously changing. Stiffness, being equal to the product between elastic module and moment of inertia, directly depends on the cross section geometry.

The graph shows a maximum point corresponding to no load applied; while loads keep increasing, there is a drastic decrease in EJ. (Fig. 9) The specimen reaches expected stiffness only when the cross section is not subject to loads and then the maximum value reached in the graph corresponds, in order of magnitude, with that determined analytically. This is due to the fact that polystyrene, being a compressible material, allows the cross section to modify its geometry as the load increases because of local punching effects. At the

al grigliato e il nuovo oggetto di sperimentazione, dove il grigliato viene sostituito da pannelli di XPS di diverso spessore.

Il grafico evidenzia che la rigidità e la resistenza dell'impalcato contenente pannelli di polistirene sono nettamente inferiori a quelle dell'ipotesi progettuale originaria. Le rigidità inoltre non raggiungono i valori calcolati teoricamente. Questa seconda fase sperimentale, al contrario di quanto definito per via analitica, ha dimostrato l'inefficacia dell'utilizzo di un materiale meno performante nella realizzazione del sandwich. Ne segue la necessità di mantenere il grigliato in PRFV quale elemento di interposizione tra i pannelli di legno multistrato.

Dal confronto tra le curve carico-spostamento dei provini con l'XPS con quello contenente il grigliato si nota una mancanza di corrispondenza tra i valori di rigidità teorici e quelli pratici relativi alle configurazioni oggetto della seconda fase sperimentale. I primi avevano evidenziato una rigidità prossima a quella ottenibile con il materiale fibrorinforzato, ipotesi confutata dai risultati della sperimentazione in cui le curve di polistirene e grigliato non presentano pendenze simili.

Nella precedente fase analitica si erano calcolate le rigidità flessionali delle configurazioni simmetriche con pannelli multistrato lignei di spessore 9 mm e XPS di spessore variabile.

Per determinare la rigidità ottenuta sperimentalmente ci si basa sulla formulazione della freccia generata dallo schema di carico impartito dalla macchina di prova.

Da questa formula è possibile determinare la rigidità, noti il carico massimo e lo spostamento massimo, attraverso la seguente formulazione.

All'aumento del carico la sezione modifica la sua conformazione, essendo l'XPS un materiale comprimibile, per tanto la rigidità subisce delle modifiche. Questa essendo pari al prodotto tra il modulo elastico e il momento di inerzia dipende direttamente dalla geometria della sezione.

Il grafico presenta un punto di massimo in corrispondenza del carico nullo, con l'applicazione della forza

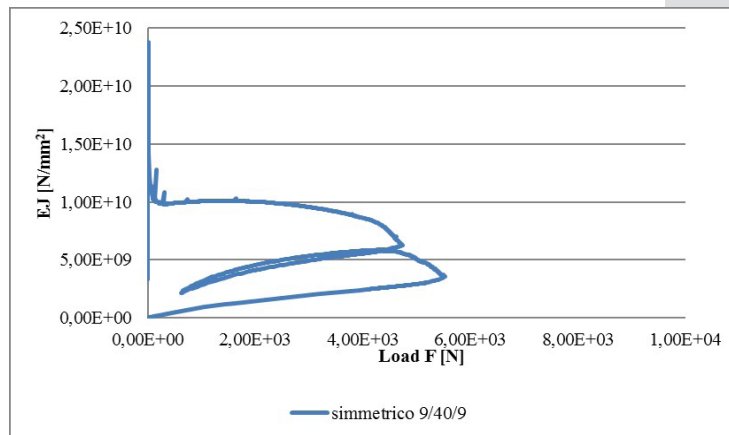


Figure 9. Load-stiffness graph of sandwich panel with 9 mm XPS core.

same time, there is a decrease in the moment of inertia, which causes a parallel decrease in total stiffness to values that strongly diverge from theoretical ones.

8. BENDING RESISTANCE VERIFICATION OF THE SANDWICH PANEL SLAB

Experimentally determined the effectiveness of using the grating as structural core of the entire sandwich panel, the goal became how to use collected data in order to generalize the considerations carried out so far. The objective is to set up a basic calculation and verification method that allows the designed sandwich panel to be used in real situations that may widely differ from the geometric configuration of the testing machine.

In order to make considerations regarding future use of the sandwich panel slab it is necessary to define the loads weighing on the analysed structure and the floor deflection limits imposed in residential buildings by Italian regulations (D.M. January the 14th, 2008).

With this aim, for the mere purpose of calculations, a traditional completion (screed, soundproofing, subflooring and flooring) has been hypothesized in order to provide higher security standards in terms of non-structural permanent loads. Once known the loads weighing on the structure, it is then possible to determine the maximum load corresponding to normal operating conditions and thus determine the maximum deflection reached by the slab. The theoretically calculated deflection is confirmed by experimental data and is always significantly lower than the maximum deflection allowed by regulations.

The load displayed on the diagram with a red line is equal to 1.621 kN and is applied by the piston under testing conditions. It corresponds to the load that

si ha una drastica diminuzione di EJ. (Fig. 9)

Il provino raggiunge le rigidezze attese solo nel momento in cui la sezione non è soggetta a carichi in quanto il valore massimo raggiunto nel grafico corrisponde in ordine di grandezza con quello determinato analiticamente. Questo è dovuto al fatto che il polistirene, essendo un materiale comprimibile, consente alla sezione di modificare la propria geometria all'aumentare del carico a causa di effetti locali di punzonamento. Contestualmente si osserva una diminuzione del momento di inerzia che causa un contemporaneo abbassamento della rigidezza totale a valori che si allontanano fortemente da quelli teorici.

8. VERIFICA A FLESSIONE DELL'IMPALCATO

Determinata sperimentalmente l'efficacia dell'utilizzo del grigliato quale core strutturale dell'intero pannello ci si è posti il problema su come utilizzare i dati raccolti al fine di generalizzare le considerazioni fin qui svolte. L'obiettivo è quello di impostare un metodo base di calcolo e verifica che consenta di utilizzare l'impalcato proposto in situazioni reali che possono differire sostanzialmente dalla configurazione geometrica della macchina di prova.

Per poter fare considerazioni in merito ad un futuro utilizzo dell'impalcato è necessario definire i carichi gravanti sulla struttura in esame ed i limiti di deformazione imposti ai solai di civile abitazione dal D.M. del 14 gennaio 2008. [4] A questo proposito è stato ipotizzato, ai soli fini dei calcoli, un completamento tradizionale (massetto, fonoisolante, sottofondo e pavimentazione) in modo da porsi a favore di sicurezza in termini di carichi permanenti non strutturali. Noti i carichi agenti sulla struttura è possibile determinare il carico corrispondente a condizioni di normale utilizzo e determinare quindi la deformazione massima che l'impalcato raggiunge. Questa, calcolata teoricamente, trova conferma nei dati sperimentali e risulta sempre nettamente inferiore alla freccia massima concessa da normativa.

Il carico riportato sul grafico in

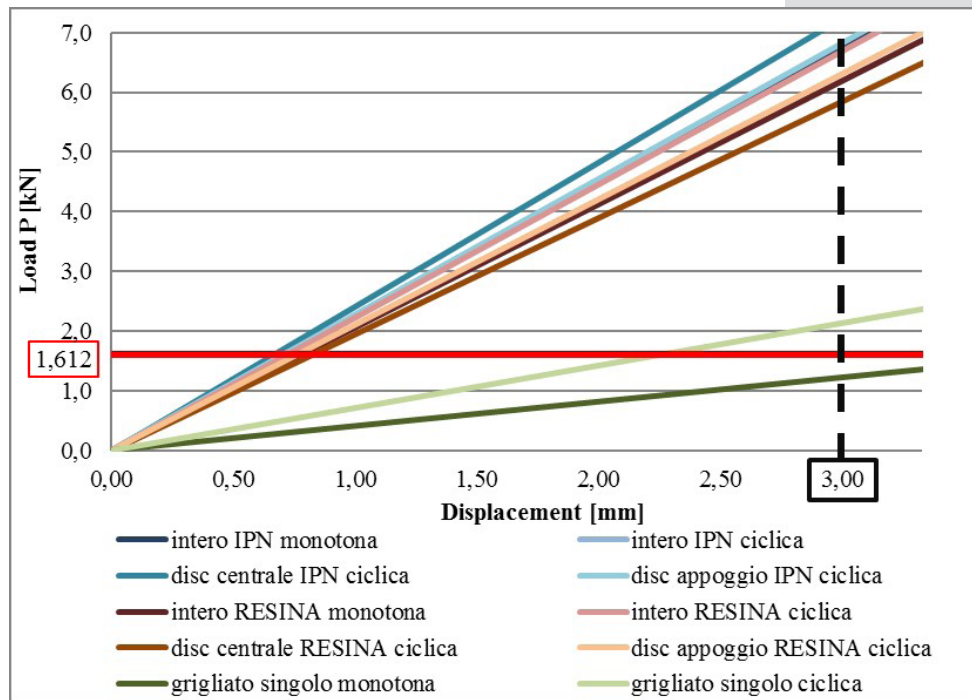


Figure 10. Load-stiffness graph of all specimens near f_{max}

the slab must withstand under normal conditions of use. The vertical dotted line indicates the maximum vertical deflection allowed by Italian regulations $f_{max} = l/300$. (Fig. 10)

Once defined the external stresses, maximum stresses on individual materials were examined: plywood panel and GFRP moulded grating. These data have been extrapolated from bending tests that represent an indirect way to determine a material's tensile strength. The trend of bending moment curve generated by the four points test has the particular feature of being constant between the two central loading pins. Assuming linear elastic behaviour, tensile strength can be determined by Navier's formula [15]:

$$\sigma_{Fl} = \frac{M}{W}$$

where W is the elastic section modulus depending on its inertia (J) and on the distance from the neutral axis (y) to the most stressed fibres:

$$W = \frac{J}{Y}$$

From tests performed on standalone plywood panel, it was possible to determine its maximum stress in the outermost fibres. With regard to the moulded grating, while determining the maximum value achieved by internal stresses, only those acting in the horizontal closures were considered, which are placed at the intrados and at the extrados, ignoring the contribution of vertical stiffening. Starting from experimental data, the bending moment of

corrispondenza della linea rossa è pari a 1,621 kN ed è quello esercitato dal pistone in condizioni di prova. Questo corrisponde al carico che l'impalcato deve sopportare in normali condizioni di utilizzo. La linea tratteggiata verticale indica la deformazione verticale massima ammessa da normativa $f_{max} = l/300$. (Fig. 10)

Definite le sollecitazioni esterne sono state prese in esame le tensioni massime agenti sui singoli materiali: pannello in legno e grigliato stampato in PRFV. Tali dati sono stati estrapolati dalle prove a trazione per flessione che rappresentano una prova indiretta per la determinazione della resistenza a trazione di un materiale. L'andamento del momento flettente generato dalla prova a quattro punti ha la particolare caratteristica di mantenersi costante tra i due coltelli. Ipotizzando un comportamento elastico lineare a farfalla la resistenza a trazione può essere determinata attraverso la formula di Navier [15]: $\sigma_{Fl} = M/W$

Con W modulo di resistenza della sezione che dipende dall'inerzia (J) della stessa e dalla distanza (y) delle fibre più sollecitate dall'asse neutro: $W = J/Y$

Dalla prova relativa al singolo pannello ligneo è stato possibile determinare la tensione massima agente nel multistrato in corrispondenza delle fibre più esterne. Per quanto riguarda il grigliato, nel determinare il valore massimo raggiunto dalle sollecitazioni interne, sono state considerate solo quelle agenti nelle chiusure orizzontali, disposte all'intradosso e all'estradosso, trascurando il contributo degli irrigidimenti verticali. A partire dai dati sperimentali è stato impostato il calcolo del momento resistente della sezione mista in fase

the mixed cross section in elastic phase was calculated. The strain distribution in this case will depend on the presence of two different materials and in particular on the relationship between the two elastic modules.

Having witnessed during the experimental test the failure of the lower plywood panel due to tensile stress, the outermost fibre has then to bear a stress equal to the ultimate tensile strength previously calculated. [6-12] Until reaching the interface with the grating stresses follow the typical stress distribution of a homogeneous cross section. Since no ungluing have ever appeared during the tests and given the intrinsic stiffness of the epoxy resin, the two materials can be considered free of horizontal mutual sliding. Such hypotheses ensure the plane sections remain plane and constant curvature. These conditions ensure that plywood and moulded grating have the same strain at their interface. By knowing this strain, value is possible to determine stresses inside the grating, according to the ratio between the two elastic modules.

Once defined stresses on the cross section, it is possible to determine internal stresses that generate the maximum bending moment (M_{Rd}) that the cross section can withstand during the elastic phase. The internal moment is generated by two contributions, given by both different materials. The bending resistance verification method can be set once determined the highest bending moments the cross section can bear. For a variable-size slab, the verification must be carried out for both the most stressed and the less resistant cross sections. The first ones coincide with those exposed to maximum moment; usually in such positions, following a suitable arrangement of the panels, there will be no discontinuities in sandwich slab layers and the ultimate moment of resistance is the sum of the contributions of both materials. (Fig. 11)

elastica. L'andamento delle tensioni in questo caso dipenderà dalla presenza di due materiali differenti e in particolare dal rapporto tra i due moduli elastici.

Avendo assistito nel corso della prova sperimentale alla rottura del pannello in legno inferiore per trazione, si impone che la fibra più esterna sia soggetta a una tensione pari alla resistenza ultima a trazione per flessione calcolata precedentemente. [6-12] Fino all'interfaccia con il grigliato le tensioni seguono l'andamento a farfalla tipico di una sezione omogenea. Poiché non si sono mai manifestati scollamenti durante le prove e data la rigidità intrinseca della resina epossidica, si possono considerare i due materiali privi di scorrimenti orizzontali reciproci. Tali ipotesi garantisce la conservazione delle sezioni piane e una curvatura costante. Queste condizioni assicurano che all'interfaccia il legno e il grigliato presentino la medesima deformazione, da cui è possibile determinare, in base al rapporto tra i moduli elastici, anche la tensione agente nel grigliato.

Definite le tensioni sulla sezione è possibile determinare le sollecitazioni interne che generano il momento flettente massimo che la sezione è in grado di sopportare nella fase elastica M_{Rd} . Il momento interno prevede due contributi, dati dai diversi materiali. Determinati i momenti flettenti che la sezione è in grado di riprendere si può impostare il metodo di verifica a flessione. Per un solaio di dimensioni variabili la verifica dovrà essere effettuata sia per le sezioni più sollecitate sia per quelle meno resistenti. Le prime coincidono con quelle sottoposte a momento massimo; di norma in tali posizioni, seguendo un'opportuna disposizione dei pannelli, non sono presenti discontinuità negli strati componenti l'impalcato e il momento resistente è somma dei contributi dei due materiali. (Fig. 11)

Si calcolano quindi i due contributi distinti per il legno ML e per il

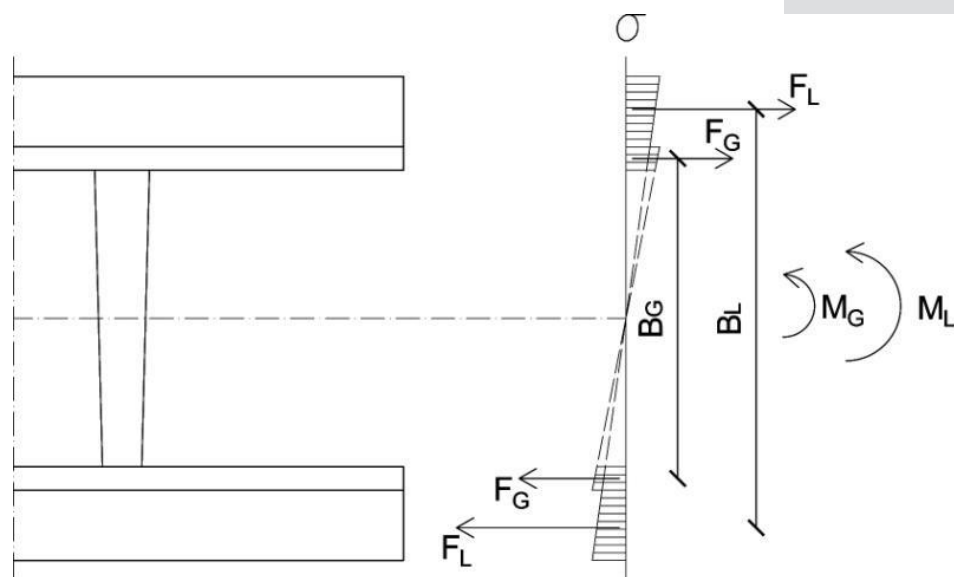


Figure 11. Stress distribution diagram in sandwich panel's cross section.

The two different contributions are calculated for plywood (M_L) and moulded grating (M_G):

$$M_L = F_L \cdot B_L = 99731 \cdot [2 \cdot (31 - 4,25)] = 5337 \text{ kNmm}$$

$$M_G = F_G \cdot B_G = 36073 \cdot [2 \cdot (22 - 1,46)] = 1482 \text{ kNmm}$$

both values contribute at the ultimate bending moment:

$$M_R = M_L + M_G = 5337 + 1482 = 6818 \text{ kNmm}$$

For bending resistance, verification to be satisfied the moment acting on the cross section (MS) must be lower than the ultimate bending moment.

- Complete, non-discontinuous cross section (plywood + grating)

$$M_S \leq M_{R(L+G)}$$

- Incomplete, discontinuous cross section (plywood)

$$M_S \leq M_{R(L)}$$

In light of the obtained results in terms of moment of resistance of the mixed cross section and comparing it with service loads normally used in residential buildings, it is possible to determine the maximum allowable span under these two extreme conditions: achieving maximum deflection according to regulations and obtaining a stressing bending moment equivalent to the ultimate bending one.

In case of maximum deflection the formula is:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q l^4}{EJ}$$

To maximize allowable span, the maximum deflection (f_{max}) reachable according to regulations must be taken into account:

$$f_{max} = \frac{l}{300}$$

Substituting this formula in the previous one, the equation becomes:

$$\frac{l_{max}}{300} = \frac{5}{384} \frac{q l_{max}^4}{EJ}$$

From which the maximum span can be calculated:

$$l_{max}^3 = \frac{384}{5 \cdot 300} \frac{EJ}{q}$$

$$l_{max} = \sqrt[3]{\frac{384}{5 \cdot 300} \frac{4,03 \cdot 10^{10}}{2,266}} = 1657 \text{ mm} = 1,66 \text{ m}$$

In case of maximum stress instead the formula is:

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

By equating the calculated moment to the ultimate one, maximum allowable

grigliato stampato M_G :

$$M_L = F_L \cdot B_L = 99731 \cdot [2 \cdot (31 - 4,25)] = 5337 \text{ kNmm}$$

$$M_G = F_G \cdot B_G = 36073 \cdot [2 \cdot (22 - 1,46)] = 1482 \text{ kNmm}$$

Che concorrono al momento resistente complessivo:

$$M_R = M_L + M_G = 5337 + 1482 = 6818 \text{ kNmm}$$

Affinché la verifica a flessione sia soddisfatta il momento agente sulla sezione MS deve essere minore di quello resistente.

- Sezione resistente completa senza discontinuità (legno+grigliato)
 $M_S \leq M_{R(L+G)}$
- Sezione resistente parziale con discontinuità grigliato (legno)
 $M_S \leq M_{R(L)}$

Alla luce dei risultati ottenuti in termini di momento resistente della sezione mista e confrontandosi con i carichi di servizio utilizzati abitualmente in caso di civile abitazione, è possibile determinare la luce massima ammissibile nelle due condizioni limite: raggiungimento della deformazione massima secondo normativa e ottenimento di un momento agente pari a quello resistente.

Nel caso di deformazione massima si ha:

$$f = 5 q l^4 / 384 EJ$$

Per massimizzare la luce ammissibile si deve tener conto della freccia massima ammissibile da normativa:
 $f_{max} = l/300$

Sostituendo questa formulazione in quella precedente si ottiene:
 $l_{max}/300 = 5 q l_{max}^4 / 384 EJ$

da cui si calcola la luce massima:
 $l_{max} = 1657 \text{ mm} = 1,66 \text{ m}$

Nel caso invece di sollecitazione massima:
 $M = q l^2 / 8$

Eguagliando tale momento a quello resistente si ottiene la luce massima ammissibile:
 $l_{max} = 4,9 \text{ m}$

Come era lecito attendersi la condizione più gravosa è quella in termini di deformazione massima ammissibile. Le ottime proprietà meccaniche del grigliato da sole non sono sufficienti per garantirne l'utilizzo come impalcato. L'accoppiamento con i pannelli multistrato in legno, seppur ancora perfezionabile, risulta efficace a garantire una forte diminuzione della deformabilità dell'impalcato.

9. SVILUPPI FUTURI

Alla luce dei risultati incoraggianti, ottenuti sperimentalmente, e per dare seguito alle considerazioni teoriche sviluppate analiticamente si possono ipotizzare due sviluppi differenti. In primo luogo una sperimentazione che abbia come oggetto le configurazioni dell'impalcato che sono state studiate solo attraverso un'analisi teorica e che presentino una sezione ottimizzata

span becomes:

$$l_{max}^2 = \frac{M_R \cdot 8}{q}$$
$$l_{max} = \sqrt{\frac{6818 \cdot 10^3 \cdot 8}{2,266}} = 4,9 \text{ m}$$

As expected, the most demanding condition is the one in terms of maximum admissible deflection. The excellent mechanical properties of the moulded GFRP grating are not enough to ensure its use as a slab for residential buildings. The coupling with plywood panels, though still improvable, is thus effective in ensuring a sharp decrease in the deformability of the entire sandwich slab.

9. FUTURE DEVELOPMENTS

In the light of the encouraging results obtained experimentally, and in order to follow up the analytically developed theoretical considerations two different developments can be hypothesized. First, an experimental campaign, which tests the sandwich slab configurations that have been studied only through a theoretical analysis and which have an optimized cross section in terms of resistance. However, it is considered mandatory, once the optimal configuration has been established, to study the behaviour of the grating under horizontal stresses and to test its bi-directional warping also for loads acting in the plane, parallel to the element.

10. REFERENCES

- [1] Antonucci Rodolfo, *Restauro e recupero degli edifici a struttura muraria*, Maggioli Editore, 2012.
- [2] Ascione F., Feo L., Maceri F., *Primi risultati sperimentali sul comportamento di collegamenti bullonati in strutture composite laminate*, in “XXXVI Convegno nazionale dell’associazione italiana per l’analisi delle sollecitazioni (AIAS), Ischia 4-8 settembre 2007, pag.1-10.
- [3] Ascione F., Feo L., Maceri F., *Sulla rottura per rifollamento di laminati compositi pluristrato*, in “Giornata di Studio sul Tema: Strutture in materiali compositi: problematiche e prospettive”, AIAS Cittadella del Capo (CS) 16 maggio 2008, pag 1-11.
- [4] Calabrese Maurizio, Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 “Istruzioni per l’applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni»”, Roma 2009.
- [5] Doglioni Francesco, *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico. Integrazioni alla luce delle esperienze nella Regione Marche*, Ancona 2007.
- [6] Faresin Anna, *Architettura in calcestruzzo. Soluzioni innovative e sostenibilità*, UTET Scienze Tecniche, Torino 2012.
- [7] Giordano Guglielmo, *Tecnica delle costruzioni in legno*, HOEPLI EDITORE, Milano 1999.
- [8] Giovannetti Francesco, *Manuale del recupero del comune di Città di Castello*, Tipografia del Genio Civile, Roma 1992.
- [9] Giovannetti Francesco, *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*, Flaccovio Editore, Palermo 1997.
- [10] Gottfried Arie, *Le strutture*, HOEPLI EDITORE, 2003.
- [11] Gulli Riccardo, *Struttura e costruzione - Structure and construction*, Firenze University Press, Firenze 2007.
- [12] Gulli Riccardo, *Recupero sostenibile del patrimonio costruito in ambito sismico*,

in termini di resistenza.

Si ritiene comunque indispensabile, una volta stabilita la configurazione ottimale, studiare il comportamento del grigliato sottoposto a sollecitazioni orizzontali e testare la sua orditura bidirezionale anche per carichi agenti nel piano, parallelamente all'elemento.

EdicomEdizioni, Roma 2014.

- [13] Piazza M., Tomasi R., Modena R., *Strutture in legno. Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*, HOEPLI EDITORE, Milano 2005.
- [14] Pozzati P., Ceccoli C., *Teoria e tecnica delle strutture*, UTET, Torino 1990.
- [15] Sutton M. A., Orteu J. J., Schreier H. W., *Image correlation for shape, motion and deformation measurements, Basic concepts, theory and applications*, Springer, 2009.
- [16] Viola Erasmo, *Scienza delle costruzioni*, Pitagora, Bologna 1992.
- [17] Nespolo Enrico, *I solai collaboranti nella progettazione antisismica*, <http://www.ingenio-web.it>, 23 luglio 2014. [Consultato: 11/02/2016]
- [18] Correlated solutions, www.correlatedsolutions.com. [Consultato: 13/11/2015]
- [19] Descrizione sintetica dei vantaggi del “Solaio Ultraleggero”, <http://www.solaiultraleggeri.it>. [Consultato: 31/12/2015].
- [20] Documentazione Solaio Soleco di Picasistemi, <http://picasistemi.pica.it>. [Consultato: 31/12/2015].
- [21] ECTSYSTEM Composites Integrated Solution, [http://www.ectsystem.eu/ita/solai-alleggeriti-\(emmafloor\)/esempi-di-applicazione/emmafloor-a-secco](http://www.ectsystem.eu/ita/solai-alleggeriti-(emmafloor)/esempi-di-applicazione/emmafloor-a-secco). [Consultato: 10/01/2016]
- [22] EMMAfloor®, solaio alleggerito in materiali compositi della ECT System, <http://www.professionearchitetto.it>. [Consultato: 29/12/2015].
- [23] Ferracin Group-scheda tecnica Solaio Svelto, <http://www.ferracingroup.it>. [Consultato: 31/12/2015].
- [24] GRC, pannelli resistenti e sottili con le virtù dei pezzi unici, <http://www.storemat.com>. [Consultato: 31/12/2015].
- [25] GRC: quando il cemento si unisce alle fibre di vetro, <http://www.infobuild.it>. [Consultato: 16/01/2016].
- [26] Isolante termico Isosandwich-TOP, <http://www.termoisolanti.com>. [Consultato: 27/12/2015].
- [27] Pannelli e manufatti strutturali alleggeriti, INFOBUILD, <http://www.infobuild.it>. [Consultato: 18/01/2016].
- [28] Pannelli sandwich, pannelli compositi, pannelli honeycomb, CEL COMPONENTS, <http://www.cel.eu>. [Consultato: 29/12/2015].
- [29] PERI S.p.A. - Solai in opera - Casseforme, Impalcature, Ingegneria, <http://www.peri.it>. [Consultato: 29/12/2015].
- [30] Polistirolo espanso estruso, eps, xps, poliuretano espanso, resine fenoliche espanse, polivinilcloruro pvc espanso, costo prezzi pannelli per isolamento termico a cappotto di edifici, <http://www.consulente-energia.com> [Consultato: 07/01/2016].
- [31] Prestazioni Statiche Plastbau Metal - Poliespanso Srl, <http://www.poliespanso.it>. [Consultato: 18/01/2016].
- [32] Sistema Costruttivo Plastbau® -De.com-Trasformazione e riciclo EPS, <http://www.decom.it>. [Consultato: 29/12/2015].
- [33] Solaio Armorapido, <http://www.ecosism.com>. [Consultato: 31/12/2015]
- [34] Solaio Compound: progettazione, produzione e vendita solaio dissipativo antisismico, solaio misto legno calcestruzzo antisismico, <http://www.solaiocompound.it>. [Consultato: 29/12/2015]
- [35] Solaio Integrato Latercompound: Misto legno latero cementizio, <http://www.latercompound.it>. [Consultato: 08/01/2016].
- [36] STEP® - Solaio a travetti tralicciati prefabbricati e blocchi di alleggerimento in polistirene espanso sinterizzato-FERRAMATI, <http://www.ferramati.it>. [Consultato: 31/12/2015].