

I PANNELLI COIBENTATI IN ACCIAIO NELLA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI STRUTTURE E INVOLUCRO

secondo gli Eurocodici e le norme tecniche

Francesco Paolo De Martino

con la collaborazione di Marco Imperadori, Monica Antinori, Giuseppe Ruscica

Scheda sul sito >

Fondazione

Promozione Acciaio

 DARIO
FLACCOVIO
EDITORE



Collana Acciaio

serie Monografie

8

**I PANNELLI COIBENTATI
IN ACCIAIO NELLA PROGETTAZIONE
E REALIZZAZIONE
DI STRUTTURE E INVOLUCRO
secondo gli Eurocodici e le norme tecniche**

Francesco Paolo De Martino
con la collaborazione di
Marco Imperadori, Monica Antinori, Giuseppe Ruscica

Francesco Paolo De Martino

con la collaborazione di Marco Imperadori, Monica Antinori, Giuseppe Ruscica

I PANNELLI COIBENTATI IN ACCIAIO NELLA PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI STRUTTURE E INVOLUCRO
SECONDO GLI EUROCODICI E LE NORME TECNICHE

ISBN 978-88-579-0244-9

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: novembre 2013

De Martino, Francesco Paolo <1961->

I pannelli coibentati in acciaio nella progettazione e realizzazione di strutture e involucro secondo gli Eurocodici e le norme tecniche / Francesco Paolo De Martino ; con la collaborazione di Marco Imperadori, Monica Antinori, Giuseppe Ruscica. - Palermo : D. Flaccovio, 2013.

ISBN 978-88-579-0244-9

I. Pannelli in acciaio. I. Imperadori, Marco.
II. Antinori, Monica. III. Ruscica, Giuseppe.
624.1821 CDD-22 SBN PAL064068

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, novembre 2013

Una pubblicazione di:



Fondazione Promozione Acciaio

Via Vivaio, 11

20122 Milano – Italia

Tel. 02.86313020

info@promozioneacciaio.it

www.promozioneacciaio.it

In copertina

Foto principale: Nuovi uffici Flamar a Zingonia (BG) – © Atelier LC

Foto secondarie – da sinistra a destra

Concessionaria Vicentini, Verona – © Oskar Da Riz / Stahlbau Pichler srl

Magazzino automatizzato Lyto's, Lodi – © RW Panel spa

Stabilimento Alenia Aeronautica, Grottaglie-Monteiasi (TA) – © Lorenzo De Simone

Un particolare ringraziamento va a tutti i Soci di Fondazione Promozione Acciaio



Gli autori

Francesco Paolo De Martino, laureato con lode in Ingegneria Civile nel 1986, dal 1988 titolare dell'omonimo studio di ingegneria con sede in Genova, dove si occupa prevalentemente di progettazione, project & construction management, consulenze in ambito strutturale. Già professore a contratto nel corso "Strutture metalliche speciali" presso la Facoltà di Ancona dal 1990 al 1993, dal 1999 a oggi è professore a contratto del corso "Progetto di Strutture" presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Genova. Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca scientifica applicata in ambito universitario, in ambito E.C.S.C. e su incarico di gruppi industriali, specialmente nel campo dei sistemi edilizi innovativi a struttura in acciaio e di problematiche specifiche delle strutture metalliche, delle lamiere grecate e dei pannelli coibentati.

Marco Imperadori, professore associato presso il Politecnico di Milano, titolare della cattedra di Progettazione e Innovazione Tecnologica e responsabile del laboratorio di sintesi finale sui temi dell'innovazione presso la School di Ingegneria Edile-Architettura. È delegato del Rettore del Politecnico di Milano per tutti i rapporti di Ateneo con l'Estremo Oriente. Dal 1999 è titolare dello studio Atelier2 (Gallotti e Imperadori Associati) di Milano. Svolge attività di ricerca nell'ambito dell'innovazione edilizia mediante processi costruttivi basati sulla costruzione stratificata a secco e si occupa dell'applicazione di materiali innovativi per l'individuazione di soluzioni tecniche ad alta efficienza energetica e sostenibilità ambientale. Tali attività sono direttamente inserite nell'ambito di ricerche finanziate a livello nazionale ed europeo che interessano il Dipartimento ABC (Architecture Built Environment Construction Engineering) – Politecnico di Milano, di cui fa parte. È stato responsabile per l'unità coinvolta del Politecnico di Milano nell'ambito della ricerca europea Smart-Eco.

Monica Antinori, ingegnere civile laureata nel 1984, ha seguito progetti, in Italia e all'estero, nell'ambito civile e infrastrutturale legati alle strutture in c.a. (fondazioni speciali e opere di sostegno, ponti, viadotti stradali e ferroviari, opere idrauliche, ecc.) e in carpenteria metallica (edilizia, impianti tecnologici e industriali, piattaforme marittime, ecc.); oltre alla progettazione ha seguito la direzione dei lavori di opere infrastrutturali nel settore edile e nell'Oil and Gas. Dal 1996

inizia l'attività di libera professione nel proprio studio in provincia di Milano. Nell'A.A. 2005-06 ottiene il Master di secondo livello in "Sicurezza e Protezione" all'Università "La Sapienza" di Roma. Esperta in costruzioni metalliche, dal 2005 è responsabile dell'Ufficio Tecnico di Fondazione Promozione Acciaio.

Giuseppe Ruscica, ingegnere edile e ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Bergamo. È professore aggregato di Ergotecnica Edile e svolge, per conto dell'Università, attività di consulenza per Fondazione Promozione Acciaio, occupandosi di sostenibilità ambientale per il settore delle costruzioni in acciaio. I principali temi di ricerca riguardano le strutture tensegrali, in special modo la progettazione di sistemi complessi a cambiamento di forma per architetture responsive e strutture intelligenti.

INDICE GENERALE

<i>Prefazione a cura di Fondazione Promozione Acciaio</i>	» XIII
<i>Premessa</i>	» XVII

1. Considerazioni generali

1.1. Introduzione.....	» 1
Riferimenti bibliografici.....	» 3

2. Pannelli coibentati prefabbricati, requisiti funzionali e caratteristiche morfologiche

2.1. Pannelli coibentati per coperture.....	» 6
2.2. Pannelli coibentati per pareti.....	» 6
2.3. Impieghi particolari dei pannelli coibentati.....	» 8

3. Pannelli con geometrie particolari

3.1. Pannelli curvi.....	» 11
3.2. Pannelli sagomati a coppo.....	» 12
3.3. Pannelli di raccordo tra diverse superfici.....	» 12
3.4. Pannelli con particolari finiture esterne.....	» 14
3.5. Pannelli per tetti ventilati: sistemi integrati.....	» 15
3.6. Pannelli fotovoltaici.....	» 16

4. Cenni alle tecnologie per la produzione dei pannelli sandwich..... » 21

5. La messa in opera dei pannelli coibentati

5.1. I pannelli metallici coibentati: confezionamento, stoccaggio, trasporto e montaggio.....	» 25
5.1.1. Confezionamento.....	» 25
5.1.2. Trasporto e stoccaggio.....	» 26
5.1.3. Sollevamento e movimentazione.....	» 28
5.1.4. Montaggio.....	» 30
5.1.5. Operazioni preliminari al montaggio.....	» 30
5.1.6. Montaggio delle coperture.....	» 31

X

5.1.7. Montaggio delle pareti.....	»	34
5.1.8. Dispositivi di fissaggio.....	»	36
5.1.9. Elementi di completamento.....	»	38
5.1.10. Manutenzione.....	»	38
5.2. Le pareti coibentate eseguite in opera con paramenti in materiale non metallico.....	»	39
5.2.1. Le pareti coibentate con paramenti in gesso.....	»	39
5.2.2. Tracciamento e posa dell'orditura.....	»	41
5.2.3. Materiale isolante in intercapedine.....	»	41
5.2.4. Rivestimento.....	»	42
5.2.5. Vani e aperture.....	»	42
Riferimenti bibliografici.....	»	44
6. Particolari costruttivi.....	»	45
7. Involucro edilizio ed edilizia industrializzata.....	»	59
Riferimenti bibliografici.....	»	66
8. Le costruzioni “a secco” – approccio integrato alla progettazione.....	»	67
Riferimenti bibliografici.....	»	77
9. Esempi di realizzazione		
Palazzo dello Sport – PalaNet.....	»	79
Edificio ad uso agricolo – Zero Energy Fish-farming Research.....	»	80
Edificio residenziale.....	»	81
Uffici e stabilimento Atzwanger SpA.....	»	82
Abitazione monofamiliare.....	»	83
Istituto scolastico “L. Einaudi”.....	»	84
Stabilimento Sitma Machinery SpA.....	»	85
Abitazione monofamiliare “Hangar House”.....	»	86
10. Materiali e schemi statici interpretativi.....	»	87
Riferimenti bibliografici.....	»	90
11. Dimensionamento statico dei pannelli metallici coibentati		
11.1. Evoluzione della definizione analitica del comportamento statico.....	»	91

11.2. Modellazione del sistema “pannello sandwich”	»	92
11.3. Le equazioni differenziali risolutive del problema	»	94
11.4. Riferimenti sperimentali	»	99
Riferimenti bibliografici.....	»	108

12. Irrigidimento della struttura nei riguardi delle azioni orizzontali

12.1. Lo stressed skin design	»	111
12.2. Quantificazione per via sperimentale “dell’effetto pelle”	»	118
12.2.1. Campagna sperimentale	»	119
12.3. Sperimentazione al vero su edificio in c.a.: ruolo dei pannelli a taglio	»	123
12.4. Un’occasione di verifica del contributo dei diaframmi alla risposta sismica	»	129
12.5. Indagini sperimentali sui connettori	»	131
Riferimenti bibliografici.....	»	137

13. La EN 14509, riferimento normativo per il calcolo dei pannelli metallici coibentati

13.1. Introduzione.....	»	139
13.2. Prova di trazione	»	140
13.3. Prova di compressione	»	140
13.4. Prova di taglio sul materiale di riempimento.....	»	141
13.5. Prova di taglio sul pannello completo	»	142
13.6. Prova a momento flettente di un pannello semplicemente appoggiato.....	»	142
13.7. Prova per la determinazione del coefficiente di creep	»	144
13.8. Prova a momento flettente di un pannello su più campate	»	144
13.9. Prove di resistenza a carichi concentrati	»	145
13.10. Metodologia di calcolo e di verifica	»	146
Riferimenti bibliografici.....	»	153

14. La marcatura CE dei pannelli coibentati

14.1. Il CPR e la Dichiarazione di Prestazioni	»	155
14.2. Marcatura CE.....	»	158
Riferimenti bibliografici.....	»	167

15. Comportamento al fuoco

15.1. Introduzione.....	»	169
15.2. L’approccio ingegneristico sulla sicurezza antincendio	»	169
15.3. Reazione al fuoco: normativa e classificazione	»	171
15.3.1. Prova sperimentale SBI	»	177

15.4. Resistenza al fuoco	» 181
15.4.1. La norma di classificazione per la resistenza al fuoco degli elementi da costruzione	» 185
15.4.2. Campo di applicazione diretta ed estesa dei risultati di prova	» 188
15.4.3. Prove sperimentali di resistenza al fuoco su pannelli sandwich	» 189
Riferimenti bibliografici.....	» 192
16. Proprietà termo-acustiche dei pannelli	
16.1. Isolamento termico e risparmio energetico.....	» 195
16.2. Protezione acustica	» 197
17. Esempio pratico: edificio industriale ad uso uffici e attività produttiva..	» 199
Riferimenti bibliografici.....	» 223
Allegato A – Esempi di DoP (Dichiarazione di Prestazioni)	» 225
Riferimenti bibliografici.....	» 228
Credits e riferimenti fotografici	» 229

PREFAZIONE

A CURA DI FONDAZIONE PROMOZIONE ACCIAIO

Il volume *I pannelli coibentati in acciaio nella progettazione e realizzazione di strutture e involucro* arricchisce la collana di manuali dedicata alla progettazione e costruzione in acciaio, realizzata da Fondazione Promozione Acciaio a partire dall'anno 2008.

Attraverso la redazione di questi manuali la Fondazione intende fornire al professionista dei supporti tecnici utili e soprattutto pratici per l'approccio e l'approfondimento della progettazione in acciaio.

La collana "Acciaio" contribuirà ad una maggiore conoscenza delle opere in acciaio, capaci di distinguersi per gli elevati standard qualitativi offerti, la sostenibilità ambientale, la rispondenza ai requisiti di antisismicità, la funzionalità, le potenzialità architettoniche, la rapidità costruttiva e la semplicità di messa in opera che si traducono in realizzazioni competitive e ad alta redditività.

La conoscenza dei prodotti in acciaio da parte degli utilizzatori ha un'indiscussa importanza nel processo decisionale dei materiali costruttivi da impiegare. In Italia abbiamo delle quote di mercato delle costruzioni in acciaio che sono significativamente inferiori alla media europea, principalmente a causa della limitata conoscenza dell'acciaio da parte degli utilizzatori.

Questi presupposti sono alla base della missione della Fondazione di promuovere con un'azione costante la cultura dell'acciaio presso il proprio target di riferimento, costituito da studi di architettura e ingegneria, attori del Real Estate, grandi promotori immobiliari, investitori privati, imprese di costruzione e uffici tecnici delle Pubbliche Amministrazioni, senza dimenticare di rivolgere uno sguardo al futuro, dedicando molta attenzione all'insegnamento nelle università.

Il presente volume si propone di analizzare il ruolo che ha l'involucro edilizio in architettura, come risposta ad esigenze di carattere estetico, statico, funzionale e di risparmio energetico.

Un ruolo importante quello dei pannelli coibentati che, utilizzati da decenni in architettura, esprimono un potenziale di utilizzo quali elementi ideali di completamento per sistemi costruttivi a secco.

In questa pubblicazione ne vengono documentate le tecnologie di produzione, i sistemi di montaggio e i relativi particolari costruttivi.

Corredato da numerosi esempi di realizzazioni, il libro mostra anche le possibili integrazioni con moduli di pannelli fotovoltaici, per dimostrare i molteplici vantaggi di un involucro edilizio adeguatamente progettato.

I ringraziamenti da parte di Fondazione Promozione Acciaio per questo volume vanno agli autori: prof. Francesco Paolo De Martino, titolare dello studio di ingegneria STUDEMA Engineering e docente presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Genova, ing. Monica Antinori, Responsabile Ufficio Tecnico Fondazione Promozione Acciaio, ing. Giuseppe Ruscica, Università degli Studi di Bergamo; un particolare ringraziamento al prof. Marco Imperadori, Dipartimento ABC – *Architecture Built Environment Construction Engineering* – del Politecnico di Milano che ha curato la sezione inerente l'involucro edilizio e il dott. Pierpaolo Musolino di RW Panel Spa che ha approfondito il tema della reazione al fuoco dei pannelli.

Si ringraziano inoltre gli studi di progettazione che hanno fornito materiale relativo agli esempi pratici riportati all'interno del volume e le aziende che hanno fornito documentazione e contributi che hanno permesso di realizzare la presente monografia.

La Fondazione desidera inoltre ringraziare i propri Soci che hanno contribuito alla stesura del testo.

Simona Maura Martelli
Direttore Generale
Fondazione Promozione Acciaio



Fondazione Promozione Acciaio è oggi in Italia il soggetto di promozione e comunicazione più incisivo per l'acciaio nelle costruzioni.

Nasce nel 2005 quale ente no profit per comunicare il valore aggiunto che l'Architettura in acciaio sa dare, forte della convinzione che l'Acciaio sia strumento fondamentale al servizio delle costruzioni e delle infrastrutture.

FPA si propone una forte azione di rinnovamento culturale nel settore edile, promuovendo e valorizzando i prodotti e gli aspetti progettuali e tecnologico-costruttivi delle soluzioni in acciaio.

Le attività sono sostenute dai Soci tra i quali figurano acciaierie italiane e internazionali, aziende di trasformazione e distribuzione, costruttori metallici, associazioni di categoria, produttori di macchine a taglio laser e studi di progettazione.

FPA mette al servizio di progettisti, costruttori, investitori, studenti, tutte le competenze tecniche e scientifiche dei Soci nonché delle Commissioni Tecniche Fuoco, Sisma, Norme e Sostenibilità, grazie ad una costante azione di comunicazione e formazione sulle possibilità ed i vantaggi del costruire in acciaio. Tutta l'attività ha come base la conoscenza tecnica di esperti della progettazione, del mondo accademico, delle istituzioni e dei Ministeri.

FPA grazie al suo Ufficio Tecnico fornisce assistenza tecnica, scientifica e normativa a chi già sviluppa e progetta costruzioni metalliche o anche solo a chi desidera ampliare le proprie conoscenze professionali.

FPA è anche www.promozioneacciaio.it, il portale delle costruzioni in acciaio in Italia, punto di riferimento del mondo della professione e degli utilizzatori in generale che vanta più di 90.000 utenti/mese.

Sono già stati pubblicati nella collana "Acciaio":

- *Acciai strutturali, prodotti e sistemi di unione*
- *Analisi di una soluzione monopiano con il metodo plastico*
- *Edifici monopiano in acciaio ad uso industriale*
- *Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio – calcestruzzo in caso di incendio*
- *Progettazione di strutture in acciaio secondo le NTC e gli Eurocodici*
- *Progettazione di strutture composte acciaio – calcestruzzo secondo gli Eurocodici e le NTC*
- *Progettazione di giunzioni e strutture tubolari in acciaio secondo gli Eurocodici e le NTC*
- *Collegamenti in acciaio in edifici monopiano e multipiano – Eurocodice 3*

Tutti i testi sono consultabili alla sezione pubblicazioni di www.promozioneacciaio.it

PREMESSA

Le strutture a secco vengono sempre più apprezzate per la loro facilità di assemblaggio, la velocità costruttiva, il rispetto dei requisiti prestazionali previsti dal progetto e la presenza di cantieri molto contenuti. In questa tipologia costruttiva, i pannelli coibentati hanno riscontrato una significativa attenzione da parte dei committenti e dei progettisti che operano nel settore dell'edilizia civile, grazie alle intrinseche proprietà di resistenza meccanica, leggerezza, abbattimento termico e acustico, agevole installazione, sicurezza antincendio, a vantaggio dell'economia globale del cantiere.

I settori d'impiego dei pannelli coibentati spaziano dall'edilizia industriale alle applicazioni nell'edilizia residenziale, e si identificano quale soluzione ottimale per i costi contenuti in rapporto ai benefici prestazionali; i pannelli sono inoltre maneggevoli e concorrono alla funzione di schermo isolante.

Nell'edilizia industriale i pannelli coibentati vengono utilizzati per interventi diffusi e di ogni dimensione volumetrica, non soltanto per grandi edifici; ampio utilizzo viene anche fatto nell'edilizia residenziale come in quella sociale, nel terziario, della logistica, della grande distribuzione e dello sport. Negli interventi di recupero e adeguamento, l'utilizzo dei pannelli coibentati risulta particolarmente versatile per la sostituzione delle coperture in lastre di cemento-amianto, oggi non più permesse.

La presente pubblicazione offre al lettore un'ampia panoramica sull'uso dei pannelli coibentati, trattando in primis la produzione e l'installazione dei pannelli metallici prefabbricati (caratteristiche costruttive, applicative e prestazionali, nei riguardi dei differenti parametri di progetto quali il comportamento strutturale, il rendimento termoigrometrico, la reazione e la resistenza al fuoco, ecc.). Un accenno doveroso viene fatto ai pannelli realizzati in opera con paramenti diversi dall'acciaio su strutture in profili sottili piegati a freddo.

I paramenti di acciaio sono inoltre ecocompatibili e concorrono alla resistenza strutturale in caso di eventi sismici, grazie alle intrinseche caratteristiche meccaniche e alla duttilità, come si è potuto verificare nel corso di eventi tellurici e di prove di laboratorio in scala al vero; inoltre l'acciaio zincato e pre-verniciato, normalmente utilizzato per i paramenti dei pannelli, assicura valenza estetica e durabilità.

Il meccanismo resistenziale dei pannelli è peculiare ed è da ricondursi agli sche-

mi delle strutture miste: il nucleo in materiale coibente garantisce infatti la collaborazione dei due paramenti esterno ed interno, incrementando la resistenza flessionale d'insieme.

Il libro *I pannelli coibentati in acciaio nella progettazione e realizzazione di strutture e involucro* intende avere una valenza tecnico-scientifica a carattere divulgativo per il settore della professione del progettare e del costruire che ha così l'opportunità di approfondire le proprie conoscenze o avvicinarsi ex novo al materiale attraverso approfondimenti che trattano l'aspetto tecnologico (materiali, tipologie e prestazioni), il comportamento strutturale (modellazione statica, algoritmi risolutivi) e l'applicazione (normative tecniche di riferimento). La trattazione degli argomenti di natura tecnica è costantemente accompagnata da esempi architettonici, con abbondante supporto iconografico, che consentono un'efficace comprensione dell'integrazione del pannello nelle coperture, nell'involucro e nelle compartimentazioni.

Il volume riporta inoltre cenni relativi al tema dei pannelli fotovoltaici, illustrandone i vantaggi applicativi e le esigenze in fase di montaggio oltre ad esempi di realizzazioni a secco apprezzate per la bellezza architettonica e la pulizia strutturale.

Gli autori

1. CONSIDERAZIONI GENERALI

1.1. Introduzione

L'Italia è leader europeo nella produzione di pannelli metallici coibentati esportati anche nei mercati extra-europei. Risale agli anni Sessanta la prima linea, progettata e messa a punto sul piano industriale da un'azienda lombarda, che operava nel settore delle costruzioni metalliche. I pannelli coibentati costituiscono elementi costruttivi per pareti e coperture, composti da due paramenti portanti di cui almeno uno in acciaio (ma anche in alluminio o in rame) con interposto materiale isolante (schiuma poliuretanica, polistirene, lana minerale), sono disponibili anche in monolamiera per coperture.

La gamma dei pannelli metallici coibentati, grazie alla consistente domanda dei vari segmenti applicativi, si è notevolmente ampliata in questi anni. Mediamente, su scala nazionale, il consumo può essere attribuito per un terzo circa alle applicazioni in parete e per due terzi circa a quelle in copertura.

Oltre ai pannelli per coperture a greche (due, tre, quattro o più), a coppo e ai pannelli piani per pareti, è doveroso citare i pannelli di nuova generazione a sezione curva, i pannelli composti da una parte piana e una parte curva (ibridi) e i pannelli fonoassorbenti. Particolare attenzione meritano i pannelli fotovoltaici che, da elementi "sovrapposti" in copertura, divengono veri e propri elementi architettonici, trovando un progressivo utilizzo nel più ampio concetto evolutivo della sostenibilità e nella ricerca di fonti energetiche alternative.

In abbinamento alla carpenteria metallica e ad altre soluzioni costruttive, l'impiego delle lamiere grecate e dei pannelli, realizzati in opera o prodotti in fabbrica (pannelli monolitici coibentati e sandwich monolitico prefabbricato), rappresenta un riferimento essenziale per la costruzione a secco ancora simbolo di sostenibilità e di industrializzazione del cantiere edile. A differenza delle costruzioni "ad umido", per le quali è necessario ricorrere all'ausilio dei leganti, le costruzioni "a secco" costituiscono un sistema integrato di componenti strutturali e complementari prevalentemente prelaborati e/o preassemblati. In cantiere si può, pertanto, assemblare (o smontare) gli elementi edilizi provenienti dall'industria senza l'impiego di leganti e in tempi brevi, secondo modalità

semplici e pulite. Nelle costruzioni a secco tutti i componenti del sistema vengono prodotti secondo criteri industriali, presso ambienti protetti e tecnologicamente avanzati.



Figura 1.1. Esempi di utilizzo di pannelli metallici per coperture (a sinistra) e per pareti (a destra)

In quest'ottica avviene la produzione dei pannelli coibentati, con linea in continuo oppure in discontinuo, con controlli sistematici dei materiali utilizzati oltre che dei prodotti finiti. La normativa europea di riferimento, per i pannelli a doppio rivestimento, è la EN 14509:2006 *Pannelli isolanti autoportanti a doppio rivestimento con paramenti metallici*.

L'approccio al dimensionamento risulta differenziato a seconda della rigidità del paramento metallico; infatti, è possibile individuare pannelli a paramenti flessibili (realizzati con lamiera piane o microgrecate) e pannelli a paramenti rigidi (uno o entrambi i paramenti realizzati con lamiera grecate).

Per quanto concerne le azioni sismiche, l'adozione di strutture prevalentemente in acciaio in paesi ad elevata intensità sismica fornisce di per sé una testimonianza realistica delle capacità resistenziali al sisma delle strutture in acciaio. La valutazione del contributo delle lamiera grecate e dei pannelli metallici coibentati nella progettazione antisismica si inserisce nel più ampio argomento sul rapporto tra ossatura portante ed elementi complementari di un organismo edilizio sollecitato da azioni orizzontali.

Nell'edilizia industriale i pannelli coibentati vengono utilizzati per interventi diffusi, estesi a differenti casistiche applicative, per edifici di caratteristiche dimensionali più svariate; attualmente catturano l'attenzione dei committenti e dei progettisti anche nell'edilizia civile e infrastrutturale per le proprietà citate in precedenza: resistenza meccanica, leggerezza, abbattimento termico e acustico, agevole installazione, reazione e resistenza al fuoco ed economia globale del cantiere.

I pannelli, grazie alla loro polivalenza, vengono sovente utilizzati per lavori di

bonifica e sostituzione delle coperture in lastre di cemento-amianto, bandite in accordo alla L. 23/3/ n. 93 2001, *Censimento dell'amianto e interventi di bonifica*, sia nell'edilizia residenziale che in quella industriale; in questo caso si dimostrano vantaggiosi rispetto ad altre soluzioni, sia perché non producono aumento dei carichi agenti sulle strutture portanti della copertura da bonificare, sia per la rapidità costruttiva e per gli elevati standard di isolamento termico ed acustico offerti.

È importante soffermarsi sui pannelli con pellicole fotovoltaiche, portatori di una nuova tecnologia nata dalla ricerca e da rilevanti scelte strategiche, unite in campo dal mondo industriale. Il fotovoltaico infatti, attraverso la trasformazione in energia delle radiazioni solari, rappresenta una tecnologia molto vantaggiosa nello studio di soluzioni alternative non inquinanti per la produzione di energia elettrica.

Dato il sempre maggiore uso in edilizia delle realizzazioni a secco, il libro fa anche cenno ai pannelli realizzati in opera su supporti in acciaio sottile piegato a freddo, coibentati e con rivestimento in piastre di gesso.

Riferimenti bibliografici

EN 14509:2006, *Pannelli isolanti autoportanti a doppio rivestimento con paramenti metallici*.

La costruzione a secco per l'edilizia sostenibile e industrializzata, Relazioni presentate al Convegno AIPPEG, 5 febbraio 2010 – De Martino F.P., Francieri R.

Legge 23 marzo 2001, n. 93 – Disposizioni in campo ambientale *Censimento dell'amianto e interventi di bonifica*, pubblicata nella Gazzetta Ufficiale Italiana n. 79 del 4 aprile 2001.

2. PANNELLI COIBENTATI PREFABBRICATI, REQUISITI FUNZIONALI E CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE

I pannelli metallici coibentati vengono spesso denominati pannelli *sandwich*, in quanto costituiti da doppi paramenti metallici, generalmente acciaio zincato pre-verniciati detti *pelli* o *facce*, con interposto un componente isolante connettivo in materiale organico oppure inorganico che prende il nome di *core*, come schematizzato nella figura 2.1.

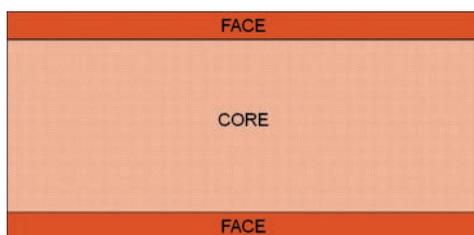


Figura 2.1. Schematizzazione di un pannello sandwich "tipo"

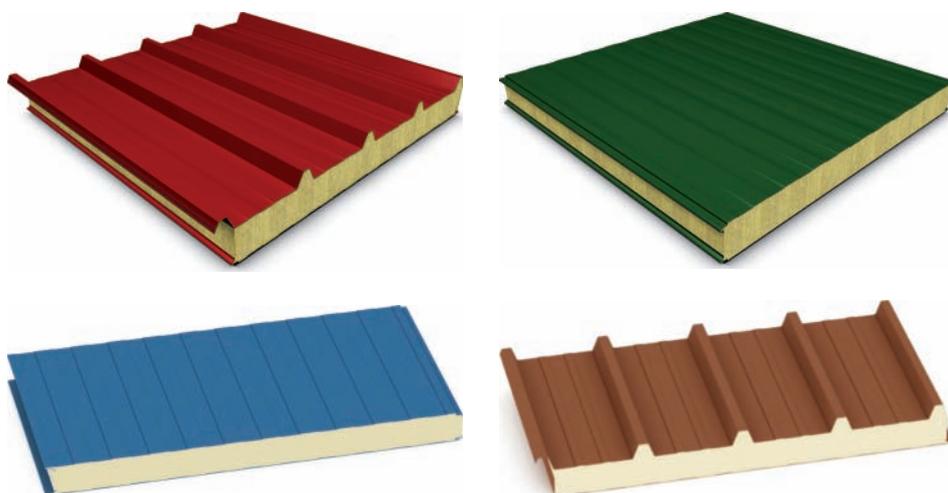


Figura 2.2. Esempi di pannelli sandwich tipo per copertura e parete

In generale è possibile individuare i seguenti principali settori di utilizzo dei pannelli metallici coibentati:

- coperture per edilizia civile e industriale
- pareti perimetrali per edilizia civile e industriale
- pareti interne per edilizia civile e industriale
- impieghi speciali per l'edilizia industriale: sistemi silenti e celle frigo.

2.1. Pannelli coibentati per coperture

Nel caso i pannelli coibentati vengano utilizzati come *elementi di copertura*, essi costituiscono elementi strutturali a tutti gli effetti e come tali devono essere trattati nelle fasi di progettazione, di selezione dei materiali e di controllo in cantiere.

I principali requisiti prestazionali dei pannelli risultano essere in generale:

- **requisiti strutturali:**
 - adeguata risposta alle azioni taglianti e flessionali
 - verifica dei limiti di deformabilità
 - resistenza delle connessioni alle azioni taglianti ed allo strappo.

Le facce di acciaio devono avere una resistenza allo snervamento minimo di 220 N/mm².

- **requisiti connessi alla funzionalità:**
 - reazione al fuoco
 - resistenza al fuoco
 - resistenza al fuoco proveniente dall'esterno
 - permeabilità all'aria e tenuta all'acqua e al vapore d'acqua
 - pedonabilità in fase di montaggio ed in esercizio
 - isolamento termico (trasmissione)
 - isolamento acustico.
- **requisiti connessi alla durabilità:**
 - resistenza alla corrosione
 - resistenza alle abrasioni
 - durabilità dei dispositivi di fissaggio.

Si riportano nelle figure 2.3 e 2.4 alcuni esempi di sezioni tipiche tratti dai cataloghi dei produttori.

2.2. Pannelli coibentati per pareti

Nel caso i pannelli coibentati vengano utilizzati come *elementi di parete*, ovviamente la valenza estetica rappresenta un requisito prestazionale fondamentale,

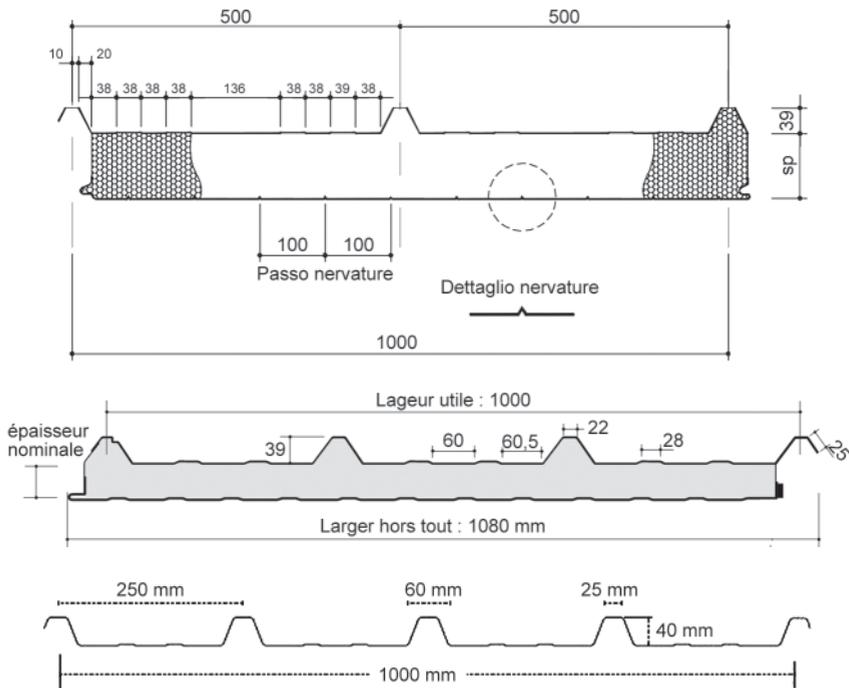


Figura 2.3. Sezioni tipiche esemplificative di pannelli per copertura

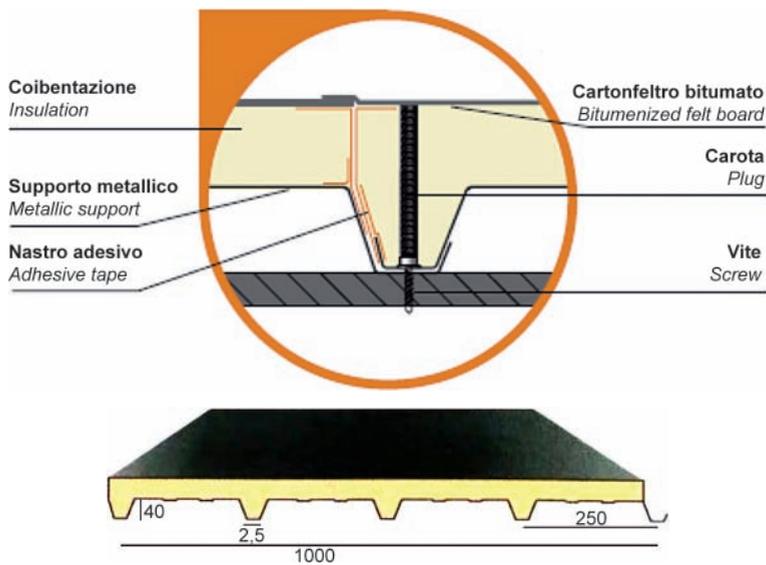


Figura 2.4. Sezioni tipiche esemplificative di pannelli "deck"

di importanza pari a quella tecnica (isolamento termoacustico, resistenza). In tal senso è da osservare la vastità della gamma disponibile sul mercato, in rela-



Figura 3.18. Esempio di fissaggio moduli fotovoltaici alle strutture di copertura



Figura 3.19. Esempio di coperture fotovoltaiche su stabilimento industriale



Figura 3.20. Prospetto edificio SIEEB (Pechino)



Figura 3.21. Prospetto edificio SIEEB (Pechino)



Figura 3.22. Dettaglio sui pannelli fotovoltaici dell'edificio SIEEB (Pechino)

4. CENNI ALLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DEI PANNELLI SANDWICH

Come già sottolineato in premessa, i pannelli metallici coibentati hanno avuto una larga diffusione negli ultimi decenni, diventando ormai elementi costruttivi di largo impiego in molteplici circostanze e in svariati settori del mercato delle costruzioni. Senza entrare nel dettaglio, che ovviamente esula dalle finalità della presente pubblicazione, si riportano alcuni principi e alcune immagini, relativamente al sistema di produzione meccanizzata dei pannelli, che nel tempo si è evoluta e perfezionata sempre di più, consentendo una produzione molto più rapida e con garanzie di qualità decisamente elevate.

Linee di produzione integrate garantiscono ormai in poco tempo, partendo dai coils di lamiera, la produzione di quantitativi di pannelli decisamente elevati. Le larghezze profilabili dipendono generalmente dallo specifico impianto considerato, così come gli spessori trattabili.

Per quanto riguarda i criteri generali, la produzione dei pannelli sandwich può avvenire sostanzialmente secondo due modalità differenti:

- *in discontinuo* (fuori linea), ossia producendo dapprima i profilati in lamiera ed accoppiando successivamente i profili all'isolante mediante l'impiego di una specifica pressa che consente di rendere solidale i componenti facenti parte del pacchetto del pannello. Visti i tempi necessari per l'esecuzione dell'intero processo, questo metodo è adatto in generale per piccoli volumi di produzione o per applicazioni particolari, come per esempio per realizzare pannelli curvi;
- *in continuo* (in linea): con una linea completamente automatica, composta da una serie di macchine e attrezzature organizzate secondo gruppi funzionali collegati fra loro da un unico sistema di controllo e gestione dei dati di processo e produzione, partendo dalle materie prime. In generale i gruppi funzionali (autonomi dal punto di vista della meccanica e dell'elettronica) possono essere suddivisi in:
 - gruppi di lavorazione della lamiera
 - isolante
 - gestione del pannello tagliato.

impiegati, è di importanza fondamentale, per gli operatori del settore edilizio interessati (committenze, stazioni appaltanti, imprese, posatori, utenti finali), poter contare su riferimenti precisi che limitino il campo alla libera interpretazione delle operazioni da effettuare e delle soluzioni da adottare.

Il sistema costruttivo a secco fa riferimento a materiali ad elevata standardizzazione che consentono una grande variabilità in fase di progettazione/montaggio, tale per cui si possono modulare le prestazioni delle pareti in funzione dei materiali scelti. Si realizzano pareti autoportanti e non portanti, ad elevato contenuto tecnologico e di semplice realizzazione, purché se ne curi il dettaglio sia in sede progettuale che costruttiva.

Le pareti coibentate montate in opera sono composte essenzialmente da una orditura metallica, da un coibente interno e dal paramento e/o rivestimento in gesso rivestito, gesso arricchito con fibre o altre materiali specifici che offrono alte prestazioni di resistenza, al fuoco, all'umidità, ecc.

Sono pareti leggere in quanto il peso specifico di un tramezzo a secco è 8-10 volte inferiore a quello di un tramezzo in muratura. Uno dei vantaggi del sistema a secco consiste nel poter variare le stratigrafie di pareti, contropareti e controsoffitti fino a soddisfare, ogni volta, i requisiti di progetto. La struttura portante della parete è costituita dall'orditura metallica in profili in lamiera di acciaio sottile profilato a freddo e protetto dalla corrosione mediante zincato a caldo, con rivestimento di zinco.

L'orditura metallica viene collegata agli elementi portanti adiacenti e può variare a seconda delle esigenze progettuali (i profili possono essere affiancati schiena contro schiena o inscatolati) incrementando così l'autoportanza, l'altezza della parete e la possibilità di una parete che permetta la appensione di carichi di vario peso e distribuzione (quadri, pensile da cucina, scaffalature, ecc.).

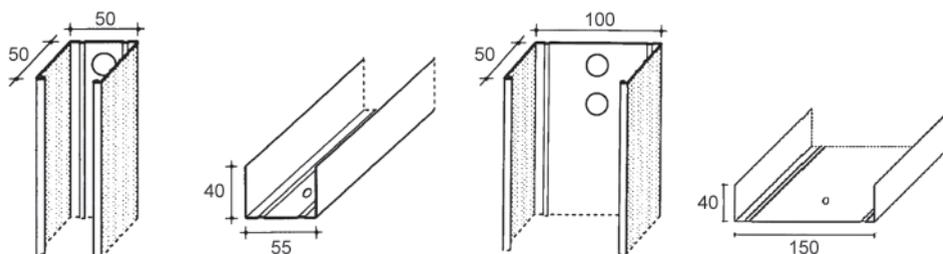


Figura 5.10. Esempi di orditure

Scegliendo adeguatamente le orditure metalliche (sezione, interassi), il materiale isolante (tipologia, spessore, densità) e le lastre di rivestimento (numero, spessore e tipo di lastra), si ottengono pareti altamente performanti.

Il rivestimento in lastre può essere formato da più strati. Il tipo e il numero delle lastre di rivestimento sono scelti in funzione delle prestazioni della parete in relazione alla statica, alla protezione al fuoco, l'acustica e l'isolamento termico, ecc.

Per una corretta posa delle pareti si deve fare riferimento alla UNI 9154/1.

5.2.2. Tracciamento e posa dell'orditura

Come per i pannelli metallici coibentati anche i produttori delle pareti eseguiti in opera mettono a disposizione degli utenti manuali per la posa delle pareti:

1. la costruzione di una parete in gesso rivestito comincia dal tracciamento della posizione delle guide a pavimento;
2. determinato lo spessore finale della parete, tracciare la posizione della guida a pavimento e poi riportarla, con filo a piombo o laser, sul soffitto per posizionare la guida superiore;
3. riportare da subito anche la posizione di aperture, porte e sanitari in modo da posizionare correttamente i montanti nelle guide. Applicare il nastro mono/biadesivo di guarnizione isolante in polietilene espanso sull'anima della guida, per contenere le trasmissioni acustiche laterali;
4. fissare la guida inferiore con fissaggi ad interasse definito del produttore;
5. riportare anche la posizione di aperture, porte e sanitari in modo da posizionare correttamente i montanti nelle guide;
6. applicare il nastro mono/biadesivo di guarnizione isolante in polietilene espanso sull'anima della guida, per contenere le trasmissioni acustiche laterali;
7. fissare la guida inferiore (se si fissa la guida su soletta in calcestruzzo grezza o finita, utilizzare tasselli ad espansione o pistola sparachiodi);
8. una volta fissate le guide, si passa al posizionamento dei montanti. Tagliare i profili montanti della lunghezza pari alla distanza tra le guide, diminuita di 15 mm per facilitarne l'inserimento nelle guide. Se la parete è alta e si rende necessario giuntare i profili, i profili giuntati devono essere solidarizzati con viti.

5.2.3. Materiale isolante in intercapedine

Dopo la posa delle orditure metalliche, vengono inseriti le reti impiantistiche e i materassini isolanti tra i montanti. Le intercapedini delle pareti in gesso rivestito possono essere utilizzate per interporre materiale isolante di diverso tipo (lana di vetro, lana di roccia, ecc.) di vario spessore e densità per arrivare alla prestazione richiesta a livello di isolamento termico e/o acustico.

È importante fare riferimento alle certificazioni di laboratorio e alle indicazioni dei produttori per scegliere e dimensionare in modo corretto il materiale isolante apposte in intercapedine.

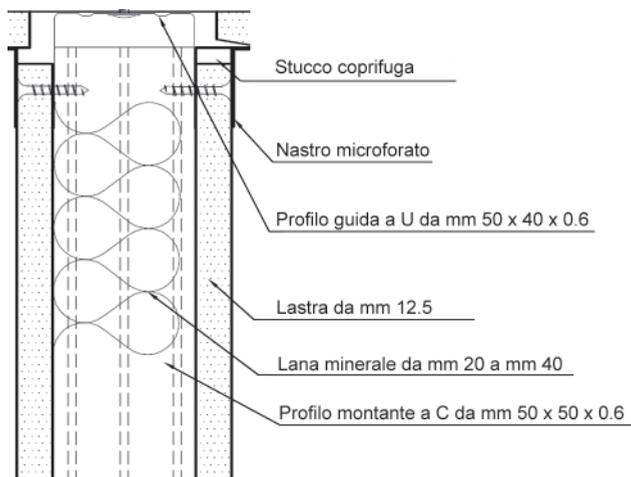


Figura 5.11. Esempio sandwich eseguito in opera

5.2.4. Rivestimento

Le orditure metalliche possono essere rivestite con uno o più strati di lastre. La parete più semplice, con una singola lastra per lato, è adatta per locali non suscettibili di affollamento e come semplice tramezzatura, con funzione di separazione di ambienti. Le lastre di rivestimento per pareti hanno spessore minimo intorno ai 12,0 mm.

I produttori mettono a disposizione delle schede tecniche dove ricavare i valori di isolamento termico e acustico e della resistenza al fuoco delle varie tipologie di parete.

Sulle pareti in lastre di gesso rivestito, si devono realizzare giunti di dilatazione ogni 15 m di lunghezza della parete e in corrispondenza dei giunti strutturali dell'edificio.

I produttori mettono a disposizione altre tipologie di giunti per realizzare in modo estetico e funzionale i giunti di dilatazione necessari su pareti. È possibile, infine, la stuccatura dei giunti e le finiture delle superfici.

5.2.5. Vani e aperture

Per realizzare aperture su cui possono essere installate delle porte, si devono disporre i profili e le lastre come illustrato di seguito.

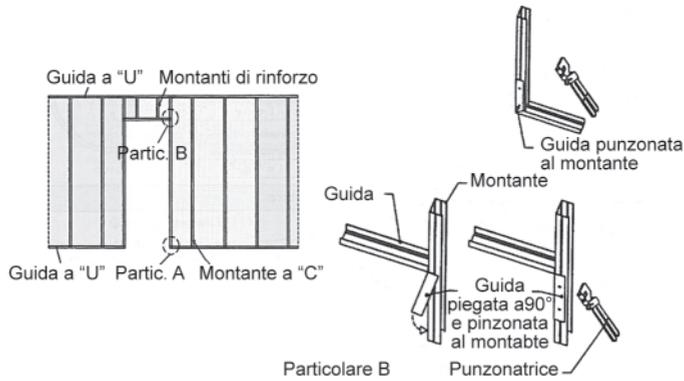


Figura 5.12. Esempio disposizione profili e lastre per la realizzazione di aperture

Per realizzare il giunto a squadra al piede del vano di apertura, si lascia la guida più lunga di 20 cm, per poi tagliarla, piegarla ad angolo e punzonarla al montante come in figura 5.12. La guida a pavimento dovrà essere fissata a non più di 15 cm dal montante della porta. Le lastre di rivestimento devono essere montate come indicato in figura 5.13, con giunto “a bandiera”, ovvero sfalsando le lastre non facendo coincidere i giunti con la linea del montante del vano porta.

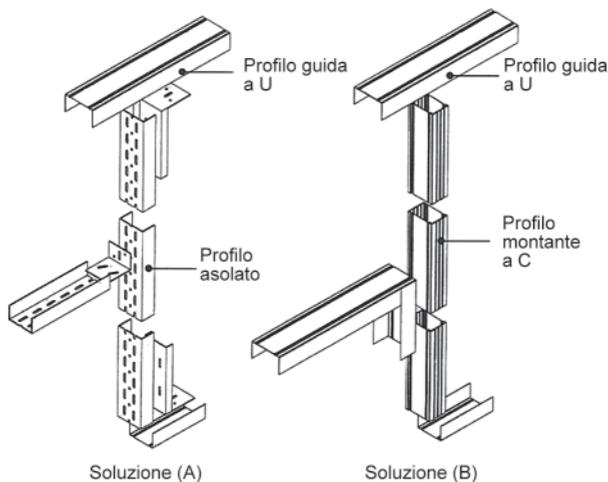


Figura 5.13. Esempi di giunti-porta tipo

In seguito è possibile posizionare delle vetrate e/o delle botole.

Tabella 8.1. Limitazioni degli elementi da trasportare su gomma art. 61 C.d.S. (sagoma limite)

Mezzo di trasporto su gomma	Sagome e pesi limite trasporti (non eccezionali)			
	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>l</i> (mm)	<i>P</i> (ton)
Motrice	2.500	4.000	12.000	18 (2 assi) 24 (3 assi)
Autoarticolato	2.500	4.000	15.500	43,2
Autotreno a bilico	2.500	4.000	18.000	44

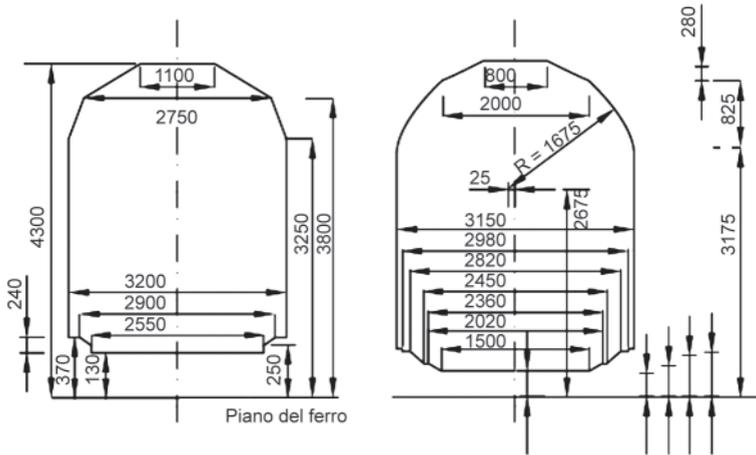


Figura 8.9. Limitazioni degli elementi da trasportare su rotaia

Ovviamente sia il mezzo di trasporto che l'apparecchiatura di montaggio vengono scelti in funzione delle specifiche condizioni caratterizzanti ciascun caso.



Figura 8.10. Esempi di montaggi dei conci strutturali

Ripercorrendo sinteticamente lo sviluppo nel tempo dell'architettura a secco, si ricorda che le prime costruzioni interamente a secco in materiale litoide basavano la loro stabilità sulle forze di attrito sviluppate sulle superfici di contatto tra i conci, o talvolta mediante dispositivi di ingranamento meccanico tra i conci stessi.

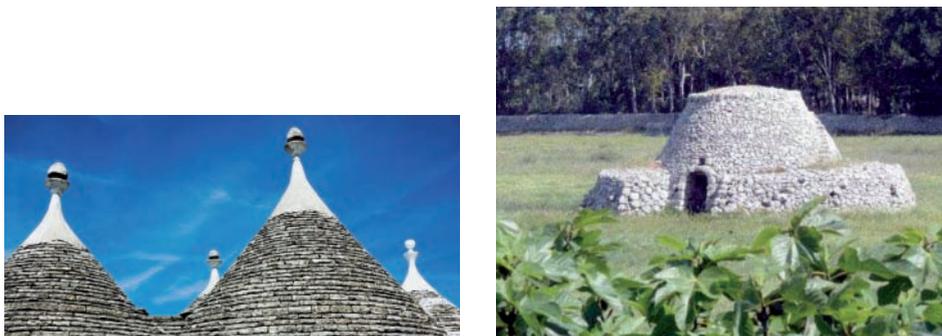


Figura 8.11. Trulli e Pajare, Puglia

Le successive strutture murarie stratificate composite (sviluppate per lo più nell'Europa centrale e settentrionale) erano invece caratterizzate da una tessitura lignea a vista, che costituiva una maglia di travature reticolari di irrigidimento d'assieme del pannello murario.



Figura 8.12. Vista edificio di esempio

Il *Balloon Frame*, tuttora applicato, è un sistema strutturale, storicamente diffuso nei paesi anglosassoni, con comportamento pseudoscotolare, composto da pannelli realizzati mediante listelli lignei, affiancati secondo moduli coordinati con le aperture e con gli elementi di completamento, con l'aggiunta di listelli diagonali di controventamento. A partire dal sistema tradizionale caratterizzato dalla presenza di elementi lignei, si sono nel tempo diffusi numerosi sistemi di analoga concezione strutturale, ma con l'utilizzo di profili scatolari e altri profili leggeri in acciaio e alluminio, di scarsa diffusione nell'Europa meridionale.



Figura 8.13. Vista dello “scheletro strutturale” di un edificio realizzato mediante la tecnica del Baloon Frame

Si ricorda inoltre che negli anni '80 è stato sviluppato in Italia un *sistema integrato per l'edilizia residenziale industrializzata* (denominato BASIS), che si basava sulla progettazione di elementi strutturali (ossatura) e di componenti di completamento (involucro edilizio) secondo accentuati criteri di modularità compositiva e tipizzazione di tutti i componenti strutturali.

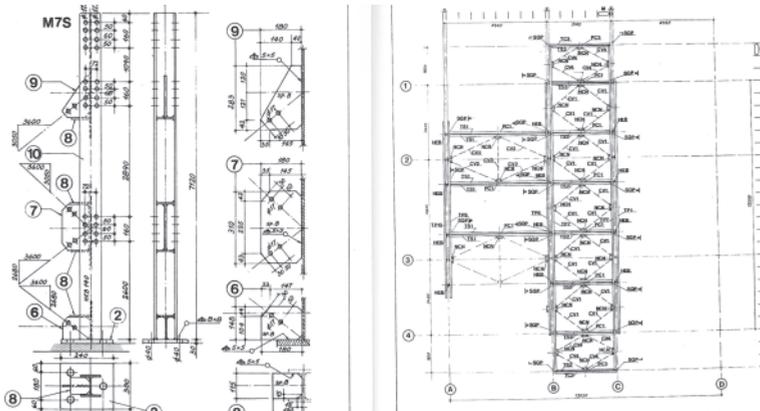


Figura 8.14. Esempio di definizione strutturale “modulare” secondo il sistema BASIS

La catalogazione prevista dal sistema interessava praticamente tutti i componenti della struttura, sia principali (travi, colonne, controventi, ecc.) che di completamento (diaframmi orizzontali e verticali) che di dettaglio (componenti delle singole connessioni).

Mediante tecniche costruttive interamente a secco sono stati realizzati complessi edilizi anche notevolmente articolati, come quelli mostrati in figura 8.16 e successive.

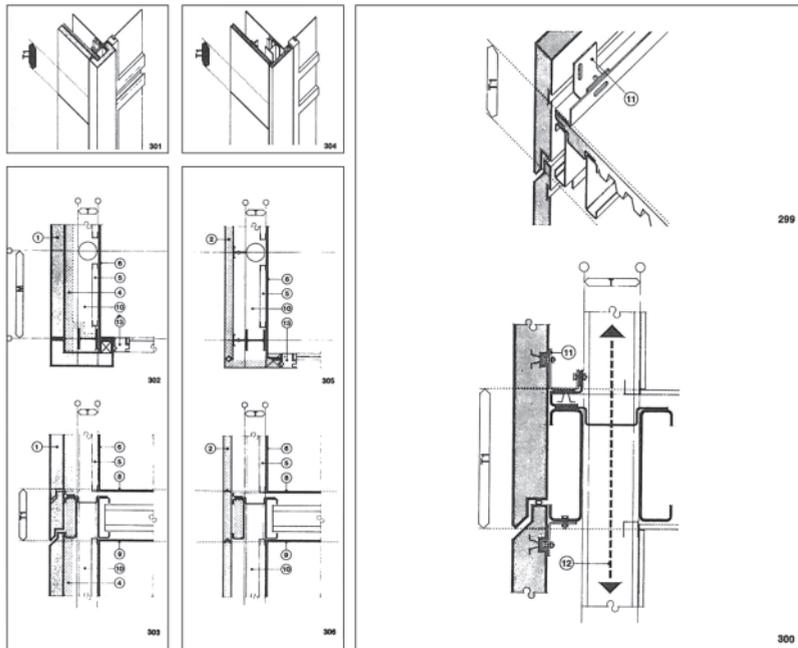


Figura 8.15. Esempio di definizione strutturale “modulare” secondo il sistema BASIS

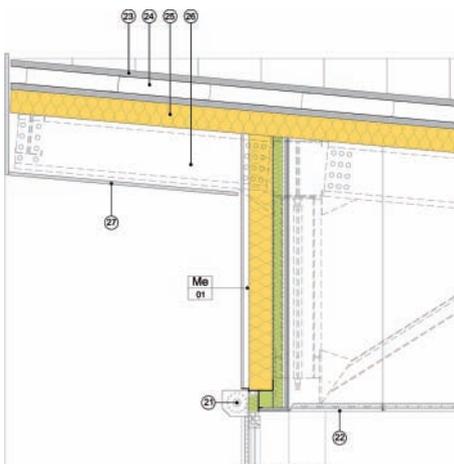


Figura 8.16
Scuola primaria “E. De Amicis” a Fabbrico (RE), viste di cantiere e del pacchetto di tamponamento e copertura

dove w_p e e_p sono integrali particolari che dipendono dal carico e da altre condizioni al contorno. Poiché tali soluzioni devono anche verificare la (11.3), si può facilmente ottenere:

$$D_1 = (1 - \alpha) \frac{\lambda}{L} C_2; \quad D_2 = (1 - \alpha) \frac{\lambda}{L} C_1 \quad (11.8)$$

Pertanto il numero delle costanti di integrazione si riduce a quattro; queste possono essere determinate in funzione delle condizioni al contorno del problema. Stamm e Witte propongono tre soluzioni delle suddette equazioni, con riferimento a pannelli semplicemente appoggiati, soggetti a:

- caso a) carico uniformemente distribuito;
- caso b) carico concentrato in posizione qualsivoglia;
- caso c) differenza di temperatura uniforme tra le facce del pannello.

È evidente che, combinando tali casi, risulta possibile risolvere un elevato numero di condizioni di carico più articolate. In particolare la disponibilità della soluzione per carico concentrato in posizione libera rende possibile l'utilizzo dell'algoritmo anche per pannelli pluricampata, mediante la trasformazione in carichi concentrati applicati delle reazioni vincolari intermedie, secondo le indicazioni riportate in figura 11.4.

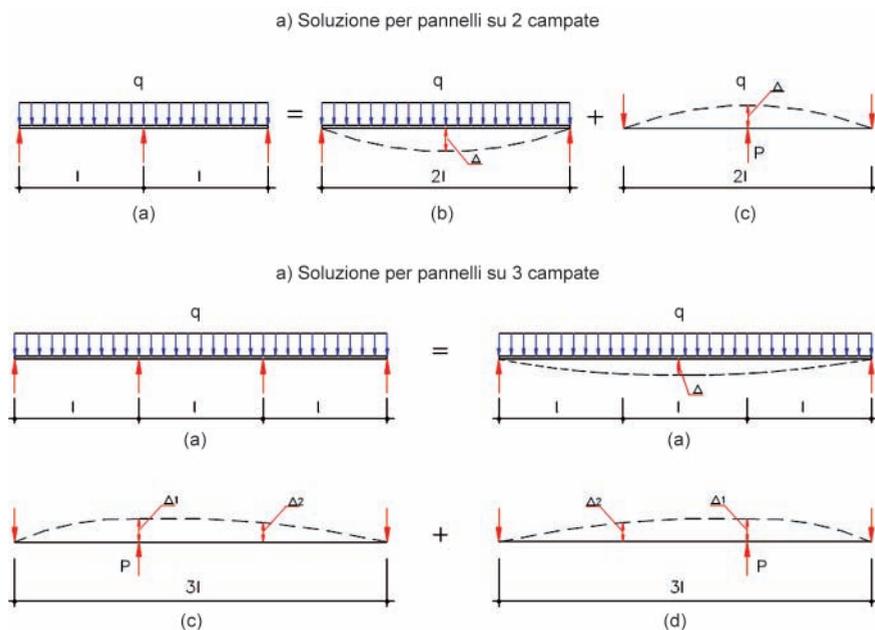


Figura 11.4. Applicabilità dell'algoritmo di Stamm, Witte e Davies a pannelli multicampata

Con procedimenti analoghi può essere risolto il problema del pannello disposto su una o due campate. Definendo $\xi = x/l$, parametro indicativo della posizione della sezione considerata, è possibile riportare le soluzioni in forma esplicita del problema per i tre casi suddetti.

CASO A. PANNELLO SEMPLICEMENTE APPOGGIATO CON CARICO UNIFORMEMENTE DISTRIBUITO q

Le sollecitazioni risultano:

$$M = \frac{q}{L}(Lx - x^2); \quad Q = \frac{q}{2}(L - 2x) \quad (11.9)$$

È possibile quindi determinare gli integrali particolari di cui all'espressione (11.7), e quindi poi anche le soluzioni del problema, in termini di $w, \gamma, M_S, M_D, Q_S, Q_D$.

CASO B. PANNELLO SEMPLICEMENTE APPOGGIATO CON CARICO CONCENTRATO P

Per un carico concentrato P applicato nella posizione definita dalla coordinata $x = e$, definito $= e/l$, parametro indicativo della posizione del carico stesso, si possono scrivere le seguenti espressioni risolutive del problema.

Le sollecitazioni risultano:

$$M = \frac{P}{L}(L - e)x - P\{x - e\}; \quad Q = \frac{P}{L}(L - e) - P\{x - e\}^0 \quad (11.10)$$

dove, secondo la notazione di Macauley, le quantità tra parentesi graffa sono poste = 0 se negative.

È possibile quindi determinare gli integrali particolari di cui all'espressione (11.7) e quindi anche le soluzioni del problema, sempre in termini di $w, \gamma, M_S, M_D, Q_S, Q_D$ (distinguendo il caso in cui $\varepsilon \geq \xi \geq 0$, dal caso in cui $1 \geq \xi \geq \varepsilon$).

CASO C. PANNELLO SEMPLICEMENTE APPOGGIATO CON GRADIENTE TERMICO TRA LE FACCE

Nel caso le due superfici del pannello, con coefficienti di dilatazione lineare α_1 e α_2 , siano caratterizzate dalle temperature T_1 e T_2 , la curvatura del pannello, in assenza di rigidità flessionale dello stesso, risulterebbe:

$$\theta = \frac{\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1}{D_G} \quad (11.11)$$

In questo caso è conveniente utilizzare θ come parametro nella soluzione delle equazioni risolutive (11.4) e (11.6). È possibile quindi determinare gli integrali

particolari di cui all'espressione (11.7) e quindi anche le soluzioni del problema, in termini di w , γ , M_S , M_D , Q_S , Q_D .

11.4. Riferimenti sperimentali

Nel settore dei pannelli sandwich, la verifica sperimentale, estesa anche alle connessioni e ai dispositivi accessori, riveste una particolare importanza, in quanto ha sovente sopperito alla carenza di standard normativi e di metodologie semplici di calcolo.

Vengono definite, in differenti corpi normativi, varie prescrizioni per metodologie di prova standardizzate e valide per il comportamento statico globale o per quello dei vari sottocomponenti.

Così si ricordano le seguenti norme americane ASTM, utilizzate a tal proposito:

- ASTM C 273, *Shear test in Flatwise Plane of Flat Sandwich Constructions*, per la determinazione del modulo e della resistenza a taglio del nucleo in materiale schiumoso;
- ASTM C 393, *Flexure test of Flat Sandwich Constructions*, per la determinazione delle stesse caratteristiche a taglio, ma attraverso prove a flessione su travi di piccole dimensioni;
- ASTM E 72, *Conducting Strength tests of Panels for Building Construction*, per la determinazione delle caratteristiche di resistenza a sforzi assiali, trasversali, complanari e impulsivi su pannelli interi.

Le analoghe norme tedesche, valide per la determinazione dei moduli e dei valori di resistenza a compressione, trazione e taglio sono:

- DIN 53292, *Testing of sandwiches; tensile test perpendicular to the faces*;
- DIN 53421, *Testing of rigid cellular plastics; compression test*;
- DIN 53427, *Determination of shear strength of rigid cellular materials sandwiched between metal plates*.

Un importante passo nella standardizzazione a livello europeo delle procedure di prova e di calcolo è stato compiuto anzitutto, con la predisposizione nel 1991, della prima edizione ufficiale delle Raccomandazioni edite dalla European Convention for Constructional Steelwork: il documento fornisce indicazioni operative per l'esecuzione e l'interpretazione delle seguenti prove sperimentali:

- prova di resistenza a taglio su un pannello completo;
- prova per la determinazione del fattore di scorrimento (*creep*);
- prova per la determinazione della resistenza e della rigidezza a flessione di un pannello semplicemente appoggiato;
- prova su pannelli continui su due campate;
- prova di *walkability*;
- prova sotto gradiente termico.

Oltre a tali prove basilari sul comportamento statico del pannello completo, sono riportate prescrizioni per la determinazione delle caratteristiche dei materiali costituenti il nucleo e i paramenti:

- prove per determinare le seguenti caratteristiche elementari del nucleo:
 - densità
 - resistenza a trazione
 - resistenza a compressione
 - resistenza a taglio.
- prove per determinare la resistenza a trazione dei vari materiali costituenti i paramenti del pannello;
- prove sui collegamenti dei pannelli alla struttura portante.

Lo standard UNI EN 12211 (che sostituisce il precedente UNI EN 77) consente di determinare sperimentalmente la resistenza al vento di tamponamenti e infissi: sinteticamente la procedura si articola in quattro fasi: prova di assestamento, prova di deformazione, prova di pressione ripetuta (con carichi pulsanti) e infine prova di sicurezza (per carichi limite).

La normativa europea di riferimento, per il calcolo e la verifica dei pannelli metallici coibentati, è la EN 14509 *Pannelli isolanti autoportanti a doppio rivestimento con paramenti metallici – Prodotti industriali – Specifiche*, approvata nel 2006, pubblicata nella G.U.CE il 1° gennaio 2009 e soggetta a successive revisioni. Dal 1° ottobre 2010 la marcatura CE dei pannelli è divenuta obbligatoria.

Essa si riferisce ai pannelli sandwich con paramenti in acciaio (compreso l'innox), alluminio e rame, mentre i materiali costituenti l'anima isolante devono essere conformi ai requisiti di cui alle norme da UNI EN 13162 a UNI EN 13167, comprendendo in particolare poliuretano espanso, polistirene e lana minerale. Tale norma, in questo capitolo solamente citata, verrà trattata ampiamente nei capitoli successivi.

Dal punto di vista delle apparecchiature per la determinazione sperimentale del comportamento statico, la procedura classica consiste nell'applicare i carichi, sul pannello disposto secondo lo schema statico considerato, lungo linee trasversali all'orditura del pannello stesso, tipicamente localizzate a cavallo della sezione di campata. In tal caso il comportamento per carichi uniformemente distribuiti, di gran lunga più interessante ai fini progettuali, viene estrapolato dalle risultanze delle prove per carichi concentrati o lineari.

Un'interessante apparecchiatura di prova, che riproduce effettivamente il carico uniformemente distribuito, è la *vacuum chamber*, utilizzata per esempio per la conduzione dell'indagine sperimentale presentata nel Convegno CTA di Napoli del 1999, con la memoria *Il calcolo dei pannelli metallici coibentati: teoria e sperimentazione* di M. Cassinari, F.P. De Martino, E. Nusiner e L. Nusiner.

Essa consente di simulare l'applicazione di un carico uniformemente ripartito, instaurando una differenza di pressione fra le due facce del pannello in prova, disposto su campata singola o più campate.

Come illustrato nello schema in figura 11.5, la depressione viene creata da una pompa a vuoto che estrae aria da un cassone in lamiera, chiuso nella parte superiore dal pannello di prova, sigillato tramite un foglio di politene trasparente, che copre tutta la vasca e aderisce al pavimento del laboratorio stesso. Non risulta necessaria una tenuta stagna all'aria, in quanto si crea un equilibrio dinamico fra aria aspirata dalle pompe e perdite dell'elemento di tenuta.

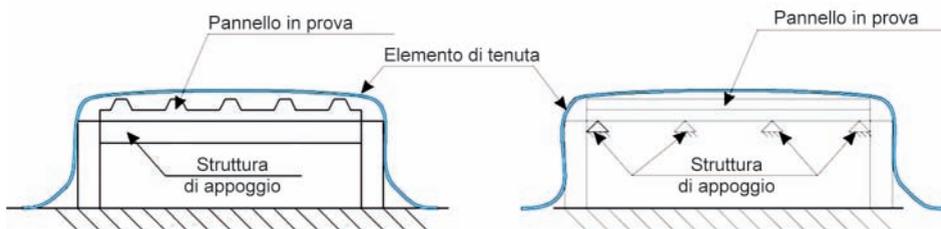


Figura 11.5. Schema di funzionamento della vacuum chamber

La regolazione del carico è compiuta da una valvola a due vie motorizzata, che parzializza l'adduzione dell'aria dal circuito di by-pass presente in prossimità della pompa, come illustrato schematicamente in figura 11.6.

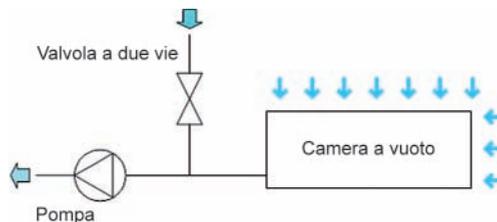


Figura 11.6. Andamento dei flussi d'aria durante l'esecuzione della prova

Il sistema di acquisizione dati, utilizzato per le prove di caratterizzazione dei pannelli e di taratura del modello numerico in oggetto, è costituito da:

- n. 1 trasduttore di pressione;
- n. 12 trasduttori di posizione di tipo resistivo;
- n. 12 estensimetri resistivi (*strain gages*) a ponte di Weastone per la misura dello stato deformativo e tensionale delle lamiere.

Le letture degli strumenti vengono rilevate da una centralina di acquisizione, convertite in forma digitale e lette da un personal computer dedicato all'operazione. Il software di acquisizione è stato sviluppato espressamente per la gestione del sistema.

Per combinazioni frequenti, adoperate per controllare le inflessioni in condizioni di servizio, vale la formulazione riportata di seguito:

$$S_d = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \psi_{1i} Q_{ki}$$

dove

ψ_{0i} = coefficiente di combinazione dell'azione variabile i

ψ_{11} = coefficiente di combinazione dell'azione variabile dominante Q_{k1} nelle combinazioni frequenti

ψ_{1i} = coefficiente di combinazione dell' i -esima azione variabile Q_{ki} nelle combinazioni frequenti.

La norma propone due possibilità nella scelta dei coefficienti di combinazione, da adoperarsi nel caso in cui non siano presenti indicazioni a tal proposito nei regolamenti nazionali; in tabella 13.1 si riporta uno dei due possibili gruppi di coefficienti.

Tabella 13.1. Coefficienti di combinazione

Coefficienti di combinazione	Fattori		
	Neve	Vento	Temperatura
ψ_0	0,6	0,6	0,6 / 1,0 ⁽¹⁾
ψ_i	0,75 / 1,0 ⁽²⁾	0,75 / 1,0 ⁽²⁾	1,0

⁽¹⁾ Il coefficiente 1,0 è usato quando la temperatura invernale $T = 0$ °C è combinata con la neve.

⁽²⁾ Il coefficiente 0,75 è usato per neve e vento quando la combinazione comprende gli effetti di due o più azioni variabili, mentre il coefficiente 1,0 per neve e vento è usato se, nella combinazione, è presente un singolo effetto rappresentante le azioni variabili ed è causato dalla neve o dal vento, agente singolarmente.

In tabella 13.2 si mostrano invece i valori dei coefficienti parziali di sicurezza per le diverse categorie di azioni, con riferimento ad entrambi gli stati limite sopra descritti; nuovamente, tali fattori sono da adoperarsi nel caso in cui non siano presenti ulteriori prescrizioni a livello nazionale.

Tabella 13.2. Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni

Azioni	Stati limite	
	SLU	SLE
Azioni permanenti	1,35 (1,00) ⁽¹⁾	1,00
Azioni variabili	1,50	1,00
Azioni della temperatura ⁽²⁾	1,50	1,00
Effetti del creep	1,00	1,00

⁽¹⁾ Il coefficiente 1,00 è usato quando l'effetto dell'azione permanente risulta essere a favore di sicurezza.

⁽²⁾ Le azioni della temperatura non possono essere trascurate se la normativa nazionale non fornisce differenti indicazioni.

Per quanto concerne i coefficienti parziali di sicurezza γ_M , riferiti ai materiali, la norma propone alcune formule di carattere statistico per la determinazione degli

stessi a partire dalla varianza dei risultati dei test di laboratorio, effettuati per ricavare i valori caratteristici di resistenza; in particolare, maggiore è la varianza, ovvero la “dispersione” dei dati sperimentali a disposizione, maggiore risulta il relativo coefficiente γ_{Mp} posto quale divisore della resistenza caratteristica per determinare la resistenza di progetto. Vengono inoltre proposti alcuni valori indicativi di tali coefficienti parziali di sicurezza, riferiti a varie proprietà dei pannelli, imponendo ad ogni modo una limitazione della suddetta varianza; tali valori sono mostrati nella tabella 13.3.

Tabella 13.3. Coefficienti parziali di sicurezza per i materiali

Proprietà a cui è applicato γ_M	Stati limite	
	SLU	SLE
Tensione di snervamento di una faccia metallica	1,1	1,0
Tensione di corrugamento di una faccia metallica in campata	1,25	1,1
Tensione di corrugamento di una faccia metallica su un sostegno intermedio	1,25	1,1
Resistenza a taglio del nucleo	1,5	1,1
Resistenza a taglio di una faccia profilata	1,1	1,0
Resistenza allo schiacciamento del nucleo	1,4	1,1
Resistenza di una faccia profilata in corrispondenza di un appoggio	1,1	1,0
Resistenza di un aggancio	1,33	1,0
Resistenza di un elemento in corrispondenza di un punto di connessione	1,33	1,0

Passando alle modalità di determinazione dello stato tensionale agente nei pannelli, la norma prescrive di non trascurare la deformabilità del nucleo; a tale scopo, deve essere considerato un valore costante del modulo di taglio del nucleo, corrispondente ad un valore medio riferito a normali temperature interne. I possibili metodi di analisi previsti sono i seguenti:

- analisi elastica;
- analisi plastica.

La prima viene usata per lo stato limite di esercizio e può essere adoperata anche per lo stato limite ultimo, mentre la seconda può essere usata solo a SLU. Per quanto riguarda l’analisi elastica, gli effetti delle azioni, derivati dalla combinazioni di carico presentate in precedenza, devono essere ricavati adoperando la teoria dell’elasticità, tenendo in considerazione anche il contributo dovuto alla deformabilità a taglio del nucleo; a tal proposito, alcune soluzioni esplicite dei casi più comuni sono riportate nella norma.

Passando all’analisi plastica, la distribuzione del momento flettente allo stato limite ultimo in un pannello con schema statico di trave continua su più appoggi può essere scelta arbitrariamente, a condizione che sia rispettato l’equilibrio nei confronti delle azioni esterne, maggiori o uguali a quelle derivate dalla combinazione maggiormente punitiva, e che in nessuna sezione venga superata la capacità plastica del pannello stesso.

Per quanto riguarda i principi generali, si deve assumere che i materiali del nucleo e delle facce esterne rimangano elastici lineari; ciò, naturalmente, non vale nel caso in cui siano previste “cerniere plastiche” all’interno dell’analisi plastica. Si considera inoltre che, a causa della ridotta rigidità estensionale del materiale di riempimento in confronto a quella delle facce in lamiera, il contributo fornito dalle tensioni normali nel nucleo può essere trascurato.

Quale conseguenza di tali assunzioni, la capacità portante di un pannello metallico coibentato deve essere divisa nelle seguenti componenti:

- *a momento flettente*: in una componente di momento M_F nelle facce metalliche e in una componente di momento M_S , riferita all’intero pannello sandwich, che dà luogo ad una coppia di forze normali N_{F1} ed N_{F2} agenti nelle facce esterne e aventi dunque un braccio di leva pari alla distanza e tra i baricentri delle lamiere superiore e inferiore, tali per cui $M_S = N_{F1} \cdot e = N_{F2} \cdot e$;
- *a taglio*: in una componente di taglio V_F nelle facce metalliche e in una componente di taglio V_S riferita al riempimento del pannello.

Se le facce esterne di un pannello sono sottili e piane o scarsamente profilate, la relativa rigidità flessionale può essere trascurata in quanto contribuisce in minima parte alla distribuzione delle tensioni e alla deformazione del pannello; in questo caso, di conseguenza, il modello di calcolo può basarsi esclusivamente sul contributo fornito dal momento M_S (scomposto nella coppia di forze normali N_{F1} ed N_{F2} agenti nelle facce metalliche) e dal taglio V_S agente nel nucleo.

Con riferimento alle figure 13.9-13.12, si evidenzia che le forze normali N_{F1} ed N_{F2} creano una distribuzione uniforme di tensioni normali di compressione o di trazione nelle facce metalliche, mentre i momenti flettenti M_{F1} ed M_{F2} danno luogo a una distribuzione lineare di tensioni normali nelle facce stesse. Per quanto riguarda il taglio, il contributo V_S dà origine a una distribuzione costante di tensioni tangenziali τ_C nello spessore del nucleo, trascurando le rigidità a compressione e a taglio del riempimento nella direzione longitudinale del pannello; qualora le facce metalliche presentino rigidità flessionale non trascurabile (lamiere profilate), le forze di taglio V_{F1} e V_{F2} non possono essere trascurate e danno origine a tensioni tangenziali τ_{F1} e τ_{F2} nelle facce stesse.

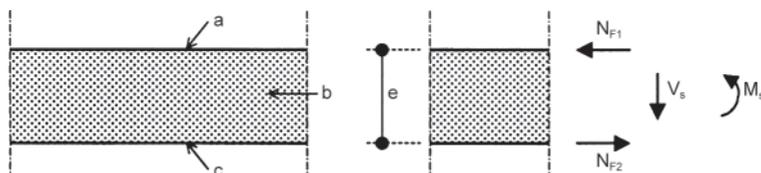


Figura 13.9. Scomposizione delle sollecitazioni per un pannello sandwich con facce sottili piane o poco profilate

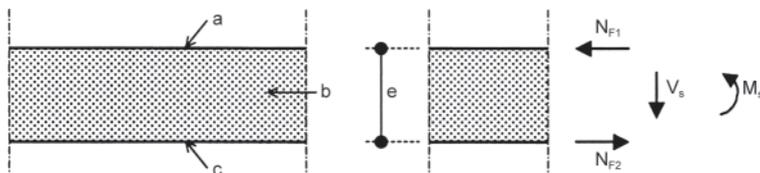


Figura 13.10. Distribuzione delle tensioni per un pannello sandwich con facce sottili piane o poco profilate

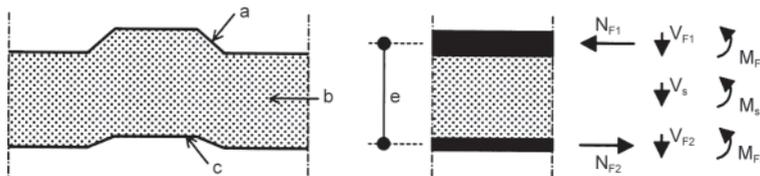


Figura 13.11. Scomposizione delle sollecitazioni per un pannello sandwich con facce profilate

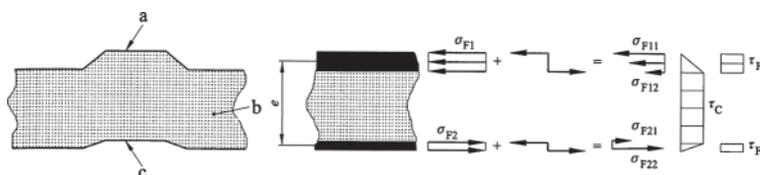


Figura 13.12. Distribuzione delle tensioni per un pannello sandwich con facce profilate

Le tensioni dovute alla flessione nelle facce sono fornite dalla norma UNI EN 14509 – Allegato E, e valgono:

$$\sigma_{F1} = -\frac{N_{F1}}{A_{F1}} = -\frac{M_S}{eA_{F1}}, \quad \sigma_{F2} = -\frac{N_{F2}}{A_{F2}} = -\frac{M_S}{eA_{F2}}$$

$$\sigma_{F11} = \sigma_{F1} - \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{11}, \quad \sigma_{F12} = \sigma_{F1} + \frac{M_{F1}}{I_{F1}} d_{12}$$

$$\sigma_{F21} = \sigma_{F2} - \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{21}, \quad \sigma_{F22} = \sigma_{F2} + \frac{M_{F2}}{I_{F2}} d_{22}$$

dove

A_{F1} e A_{F2} sono le aree trasversali alla sezione delle facce
 I_{F1} e I_{F2} sono i momenti di inerzia delle aree delle facce.

Le tensioni di taglio nell'anima e nelle facce sono anch'esse fornite dalla medesima norma:

$$\tau_C = \frac{V_S}{eB}$$

$$\tau_{F1} = \frac{V_{F1}}{n_1 s_{w1} t_1}, \quad \tau_{F2} = \frac{V_{F2}}{n_2 s_{w2} t_2}$$

dove

B è la larghezza del pannello

s_{w1} e s_{w2} sono le dimensioni degli irrigidimenti delle facce profilate

n_1 e n_2 sono il numero di anime delle facce profilate del pannello

t_1 e t_2 sono gli spessori delle facce profilate del pannello.

Lo schema statico da adoperarsi nel calcolo dei pannelli deve essere coerente con il numero e la disposizione dei supporti presenti nella realtà; quale lunghezza convenzionale delle campate, si assume la distanza tra le mezzerie dei vincoli stessi. Generalmente, a meno che non venga verificato il contrario, i pannelli sandwich sono considerati liberi di ruotare e di muoversi in direzione assiale in corrispondenza dei supporti; di conseguenza, questi ultimi possono essere schematizzati quali semplici appoggi.

Sempre ai fini del calcolo, la norma prescrive di tenere in considerazione anche il fenomeno del *creep*. Quest'ultimo, dovuto al fatto che i materiali costituenti il nucleo sono solitamente visco-elastici, si manifesta in un aumento delle deformazioni a taglio nel tempo, pur mantenendo il carico costante. Per valutare il contributo di tale fenomeno sullo stato tensionale e deformativo complessivo del pannello, è necessario condurre un calcolo separato, in accordo ai principi esposti precedentemente, andando a ridurre opportunamente il modulo di taglio del nucleo. In particolare, il valore ridotto di tale modulo di taglio deve essere determinato relativamente ad un periodo di tempo pari a 2000 ore per i carichi da neve e a 100.000 ore per le azioni permanenti ed è fornito dalla seguente equazione:

$$G_{Cr} = \frac{G_c}{1 + \varphi_t}$$

dove

G_{Cr} = modulo di taglio del nucleo al tempo t

G_c = modulo di taglio del nucleo al tempo zero

φ_t = coefficiente di creep al tempo t .

Valori indicativi per il coefficiente di creep sono forniti dalla norma, e in particolare:

- per schiume rigido-plastiche:
 - $\varphi_t = 2,4$ per $t = 2000$ h
 - $\varphi_t = 7,0$ per $t = 100.000$ h.

- per lana minerale:
 - $\varphi_t = 1,5$ per $t = 2000$ h
 - $\varphi_t = 4,0$ per $t = 100.000$ h.

Il creep riferito al carico da neve deve essere trascurato in regioni ove nevica solamente per pochi giorni all'anno.

Riferimenti bibliografici

Davies J.M. (ed.), *Lightweight Sandwich Construction*, Oxford, Blackwell Science, 2001.

UNI EN 14509:2007, *Pannelli isolanti autoportanti a doppio rivestimento con paramenti metallici – Prodotti industriali – Specifiche*.

UNI EN 13162:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di lana minerale (MW) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.

UNI EN 13163:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di polistirene espanso (EPS) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.

UNI EN 13164:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di polistirene espanso estruso (XPS) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.

UNI EN 13165:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di poliuretano espanso rigido (PU) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.

UNI EN 13166:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di resine fenoliche espanse (PF) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.

UNI EN 13167:2013, *Isolanti termici per edilizia – Prodotti di vetro cellulare (CG) ottenuti in fabbrica – Specificazione*.