

# Progetto tra integrazione e interazione: il caso di Stoccarda.

Marta BALDI

## RIASSUNTO

*Un nuovo edificio come requisito basilare, al pari della sua coerenza statica e funzionale, dovrà avere la capacità intrinseca di minimizzare l'impatto che i materiali costituenti, la forma, la sua costruzione e il suo funzionamento, avranno sull'ambiente nel quale si inseriscono. Nasce l'esigenza di divulgare in forma architettonica il messaggio ambientalista introducendo un nuovo linguaggio della sostenibilità per l'architettura contemporanea.*

*Il risultato dell'integrazione tra i vari aspetti della progettazione, ha portato in questo esempio, ad una sintesi tra forma, struttura e materiali racchiusi in un edificio che vorrebbe essere armonico, flessibile e leggibile.*

*La scelta verso un'architettura funzionale, nuda, essenziale, che rinuncia ad un formalismo espressivo, lascia spazio ad un rigore strutturale quasi industriale, in una soluzione che ha previsto l'interazione tra sistemi costruttivi differenti: il cemento armato, tecnica principe del '900, i pannelli multistrato di legno massiccio, materiale antico con tecnologia moderna che fa valere le doti di leggerezza e il suo "appeal" ecosostenibile, le sezioni miste acciaio-calcestruzzo e la tecnologia del cemento armato precompresso.*

## ABSTRACT

*Along with its static and functional coherence, a new building as a basic requirement will have to hold the intrinsic capacity for minimize the impact that its constituent materials, its shape, its construction and its functioning will have on the environment where they are inserted. It comes the need to divulge the environmental message in an architectural form introducing a new sustainability language for the contemporary architecture.*

*The result of integrating the various aspects of design has led, in this case, to a synthesis between form, structure and materials enclosed in an harmonious, flexible and readable building.*

*The choice towards a functional, bare and essential architecture, which renounces an expressive formalism, allows a structural rigours almost industrial, in a solution that have planned the interaction between different building systems: the reinforced concrete, '900 main technique; the multilayer panels of solid wood, an ancient material with modern technology that relies on lightness and eco-friendly "appeal"; the mixed steel-concrete sections and the technology of prestressed reinforced concrete.*

## 1. INTRODUZIONE

Nel 2009 lo scrivente ha fatto parte del team di progettazione che ha partecipato al Concorso internazionale, "Realisierungswettbewerb Erweiterung Hochschule für Technik Stuttgart 2009", che prevedeva la realizzazione di un nuovo edificio per il Politecnico di Stoccarda.

Al Concorso è stato presentato un progetto che porta la firma, del Prof. Arch. Oswald Zoeggeler, Arch. Alexander Zoeggeler, Ing. Jurgen Paech, oltre che dello scrivente.



Figura 1: Studio dell'area di intervento.

L'area interessata è situata a est rispetto al centro storico della città, comunque molto vicino ad esso: attualmente adibita a parcheggio, la zona è circondata da altri edifici del Politecnico, il teatro *Liederhalle* e alcune sale cinematografiche e altri. L'intervento chiedeva la realizzazione di nuovi spazi per le attività di laboratorio, uffici e aule.

L'edificio progettato è un esempio di integrazione spinta dall'esigenza ormai imprescindibile di valutare contemporaneamente tutti gli aspetti della progettazione, non sommandoli ma compenetrandoli.

Questa filosofia ha portato a una soluzione strutturale particolare: l'esigenza di condurre parallelamente analisi e successive scelte hanno fatto sì che nessun aspetto prevalessesse sull'altro ma tutti tendessero ad armonizzarsi.

Un esempio di vero progetto edile della nostra epoca, in cui sia gli aspetti d'innovazione e di eco sostenibilità, che quelli appartenenti al progetto strutturale e architettonico integrato, si congiungono insieme in maniera efficace.

## 2. LA PIASTRA COME FORMA, STRUTTURA E PROTEZIONE

La scelta della tipologia edilizia è stata suggerita dall'esigenza di creare un edificio che legasse l'esistente e anche riuscisse a legare con esso. Per questo motivo il team si è indirizzato verso la tipologia edilizia a piastra: un edificio in cui la dimensione predominante è la sua estensione, noto per le sue caratteristiche di trasparenza, fluidità e la sua propensione al *green*.

La progettazione richiedeva non solo aspetti funzionali specifici ma anche una risposta concreta a richieste di sostenibilità e di risparmio energetico. I criteri di sostenibilità adottati per la valutazione del Concorso, hanno spinto verso una progettazione sempre più integrata: la compattezza, il controllo dell'energetica dell'edificio, dell'illuminazione, dell'aereazione, una copertura verde e attrezzata con pannelli fotovoltaici, un parcheggio coperto per biciclette e altre scelte impiantistiche e di materiali incentivanti l'utilizzo di fonti energetiche alternative.

L'integrazione delle esigenze di *sostenibilità* è evidente in alcune delle scelte sviluppate per l'edificio e per gli spazi comuni: aggetti lungo i lati dell'edificio per garantire un ombreggiamento estivo, una distribuzione orizzontale e verticale degli impianti semplice e ragionata, una forte *green way* con un doppio ruolo di benessere climatico per l'edificio ma anche con ruolo urbano di collegamento tra parchi esistenti. La scelta architettonica abbraccia non solo una sostenibilità di tipo ambientale, ma anche economica, adottando scelte soluzioni strutturali di modularità, prefabbricazione.



Figura 2: Inquadramento del progetto

Nel complesso il progetto prevede un edificio esteso con una grande corte interna, composto di sei piani fuori terra oltre ad un piano copertura con ruolo di terrazza (fig2). La piastra ha la forma propria del lotto e l'idea è stata quella di ripeterla più volte per formare idealmente più "piani terra": la moltiplicazione ha il ruolo di enfatizzare l'idea generale di edificio a piastra adattandolo a un contesto con grosse capacità volumetriche. Le piastre, coprotagoniste del progetto, hanno assunto il ruolo di piano su cui distribuirvi, ogni volta diversamente, corpi scatolari di dimensioni piccole relativamente a quelle della piastra: questo contribuisce a dare un'organizzazione fluida e diversificata dell'interno caratterizzato dall'assenza di gerarchie, flessibile e divisibile. È possibile definirla un condensatore funzionale, infatti sotto la superficie unificante della sua copertura coabitano molteplici attività, potenzialmente rappresentative della *mixité* urbana. Strutturalmente le piastre sono sostenute da una maglia strutturale solitamente uniforme che definisce un sistema geometrico omogeneo, prevalentemente ad impianto ortogonale, con possibili complessità ed intersezioni con altri sistemi e di norma indifferente all'organizzazione spaziale interna.

L'idea di questa tipologia di edifici nasce con il Movimento Moderno e comprende nei suoi fondamenti concettuali i postulati formulati nel 1923 da Le Corbusier: presuppone uno spazio interno fluido, l'uso del *plan libre*, del *toit-jardin* e della *façade libre*, con una tendenza all'estremizzazione della *fenêtre en longueur*, fino alla sua riduzione a segno minimale o alla sua scomparsa. L'Architetto aveva già ideato nel 1920, ma realizzate sono nel 1927 a Stoccarda, le case dette *Citrohan*: esse non sono altro che il prodotto di una catena di montaggio, basate su piastra e *pilotis*, quasi in assonanza con l'industria automobilistica.

Lavorare sulla superficie orizzontale libera vuol dire riflettere sul tema del vuoto e dell'assenza. Il piano orizzontale può innescare un processo rigenerativo nella sua appropriazione. Come negli

scenari evocativi rappresentati da *Superstudio*, la superficie orizzontale astratta simboleggia un azzeramento rispetto al passato, una piattaforma libera e incontaminata per un'architettura e una vita futura rifondate.

Le declinazioni della piastra come:

- *Percorso generatore*. La grande estensione orizzontale dell'edificio a piastra può trasformare i percorsi interni ed esterni in elementi strutturanti e unificanti del progetto, configurando un piccolo brano di città con strade e volumi edificati: si tratta di strutture permeabili al vuoto e al pubblico accesso.

- *Spazio mediatore*. Sono comunemente definiti edifici a piastra anche quelli che svolgono un ruolo di conciliazione tra il suolo e uno o più corpi alti, così da coniugare l'articolazione volumetrica di un organismo architettonico complesso.

- *Attenzione verso le forme territoriali*. L'interesse, che fino a ieri era rivolto soprattutto al carattere urbano del progetto di architettura, oggi si sta orientando verso le forme del territorio, con un nuovo protagonismo delle strategie che attengono allo sviluppo sostenibile e alla qualità nelle trasformazioni territoriali. Questo progetto, infatti, permette un maggiore mimetismo e continuità con il contesto, che in questo caso è un ambiente di pregio per lo più pianeggiante.

- *Ruolo urbano della copertura, superficie sensibile*. Una delle evoluzioni dell'edificio a piastra sta nel ruolo svolto dalla sua copertura che diventa sempre più luogo urbano, di relazioni, ossia luogo vissuto. Una copertura che sembra avere un valore secondario se vista su scala urbana.

- *Volume tettonico*. Si tratta di volumi che si estendono su un grande piano orizzontale sospeso, sotto il quale, al livello del suolo, si sviluppa tutta la propensione pubblica e urbana dell'insieme con spazi prevalentemente aperti che spesso assolvono il ruolo di cerniera dei nodi infrastrutturali sottostanti.

- *Connettore di contesti storici*. Sebbene il tipo a piastra sembri incompatibile, con i tessuti storici consolidati, tanto per dimensioni e proporzioni che per nascita, esso è usato anche in tali contesti con un ruolo di completamento e ricucitura dei vuoti urbani.

Tra le declinazioni emerse del tipo a piastra, quella che sembra portatrice di maggiori istanze innovative è proprio l'attenzione verso le forme territoriali, ossia la sua valenza paesaggistica favorita dalla forte aderenza al suolo e la sua propensione alle relazioni con il contesto. In questo senso il futuro della piastra sembra tutto condensato nel ruolo, non più di superficie, ma di membrana, pelle adat-

tabile al suolo, ai margini e all'ambiente, un frammento di paesaggio o di città. L'edificio a piastra si comporta dunque come *landscaper*<sup>1</sup>, tende ad essere non visibile e possiede la capacità di rivelare una perfetta integrazione con il territorio e il suolo.

### 3. LA SOLUZIONE STRUTTURALE

Gli studi hanno riguardato non solo una soluzione architettonica e strutturale, affrontati in questo testo, ma anche gli aspetti energetici e di sostenibilità.



Figura 3: Vista esterna dell'edificio

La struttura è stata pensata formata da piastre in c.a. poste ogni due piani, ad eccezione del primo e della fondazione, sostenute da pilastri con un'altezza variabile di circa 4,5 m tra il piano terra e il primo impalcato, 8 m tra il primo e il terzo (prima e seconda piastra) e 7 m tra il terzo e l'ultimo (seconda e terza piastra).

Dall'immagine del progetto (fig.3) è possibile vedere che tra gli elementi piastra, s'inseriscono dei volumi che conterranno i vani necessari al progetto (fig.5), internamente arretrati rispetto al bordo esterno delle piastre di circa la 3 m, con una distribuzione decisamente irregolare.

Gli elementi strutturali costituenti l'edificio, oltre la piastra in c.a. in soluzione alleggerita, sono i pilastri in struttura mista acciaio-calcestruzzo di altezze differenti che sostengono le varie piastre, la passerella composta da travi in c.a.p. e la tecnologia dei pannelli in legno massiccio a strati incrociati che costituiscono l'involucro mono-bi piano tra le varie piastre.

Inoltre sono stati aggiunti a irrigidire la struttura elementi setto in corrispondenza dei tre blocchi scale, due dei quali scatolari posti nella parte est dell'edificio, e uno semplice nella parte nord-ovest.

L'idea di realizzazione e assemblaggio temporale dell'intero edificio è schematizzata nella sequenza di fotogrammi riportati (fig.4).

La sperimentazione di far coesistere e interagire più sistemi costruttivi assai differenti si è rivelato uno studio decisamente complesso e interessante.

1. *Landscaper* è un neologismo inglese, formato dalla parola *land* (terreno) e *skyscraper* (grattacielo). Si veda l'articolo: Fabrizio F., Loris Macchi con Andrea Giunti, *Landscaper: costruire con il paesaggio*, Costruire la natura, anno IX, n.182, Firenze Architettura.

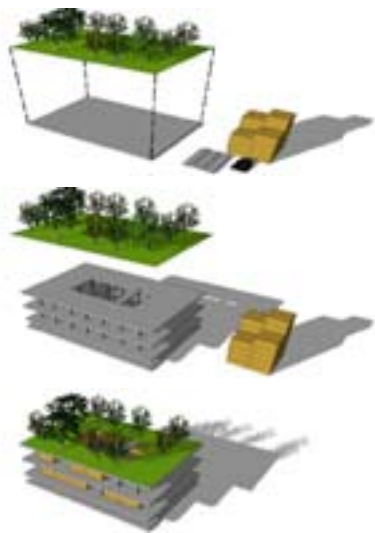


Figura 4: Sequenza di fotogrammi che rappresentano l'idea strutturale

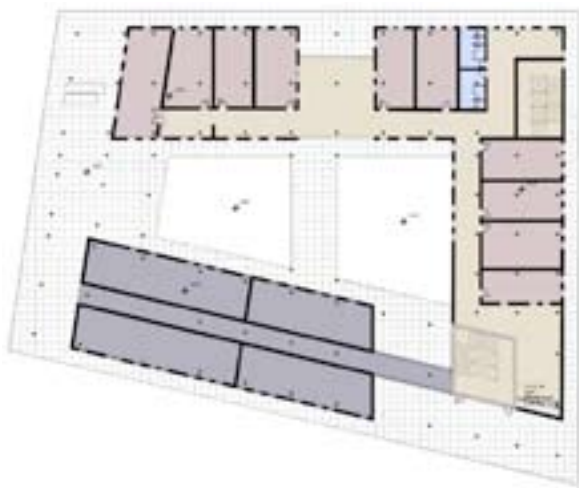


Figura 5: Pianta del primo piano

#### 4. LA MODELLAZIONE

La “modellazione della struttura” con il programma agli elementi finiti, come accurato processo di discretizzazione, è legato ad uno studio conoscitivo approfondito della realtà progettuale finalizzato a schematizzare l'intera struttura in un'unione ponderata di elementi, che vanno oltre l'immediatezza delle risultanze geometriche. La compresenza di sistemi strutturali differenti ha portato ad una modellazione complessa e singolare (fig.6), dove la difficoltà si è incentrata nella soluzione del comportamento sotto carico dell'edificio nel suo insieme.

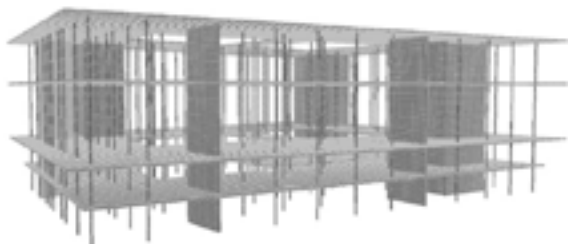


Figura 6: Immagine del modello numerico

La struttura è composta da n.5 piastre di dimensioni estese pari a 17500 m<sup>2</sup> (65 m di lato circa), rispettivamente alla quota di -4,5m, 0m, 4,5m, 12,5m e 19,5m. Essa dopo molte soluzioni è stata discretizzata nel modo apparentemente più appropriato con elementi *shell* di 0,50 m di lato di forma all'incirca quadrata, considerando la sezione alleggerita attraverso elementi vuoti. È stata elaborata una sola delle 4 piastre in altezza, per poi ripeterla, ma questo ha comportato al tempo stesso la valutazione e la risoluzione di alcuni problemi di modellazione di dettaglio.

La meshatura definitiva è stata il risultato di molte soluzioni necessarie per risolvere la non ortogonalità degli assi strutturali, cercando di minimizzare le zone di criticità, in cui è stato necessario l'inserimento di elementi trapezoidali o triangolari.

In virtù dell'ipotesi del piano infinitamente rigido della piastra, sono stati introdotti dei *constraints* di piano ai quali è stata assegnata la proprietà di *diaphragm*: in tal modo le distanze mutue degli elementi rimangono costanti omogenizzando così il comportamento dell'intero piano.

Al fine di evitare il movimento a unico blocco da parte dei solai, condizione ovviamente inaccettabile, è stata assegnata l'opzione “Assign a different diaphragm constrain to each different selected Z level”.

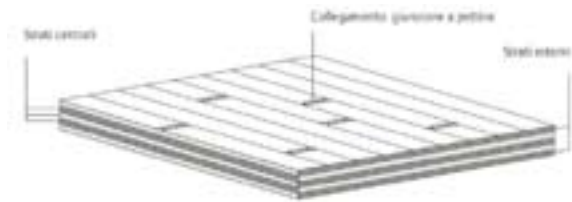
Gli elementi verticali del progetto comprendono non solo la parte in legno, ma anche pilastri e setti. I primi sono stati modellati come elementi *frame* discretizzati con una lunghezza pari a 1,5 m, in modo tale da leggere più precisamente le sollecitazioni, i secondi sono stati modellati con elementi *shell* di forma circa quadrata di dimensioni tali da connettersi con la piastra.

Gli elementi su cui è stata concentrata la progettazione strutturale di dettaglio sono: la piastra in cemento armato alleggerita alla quota +4,5m, il pilastro di luce 8 m in struttura mista acciaio-calcestruzzo in posizioni differenti e le passerelle in c.a.p..

La parte mono- bi piana in legno, strutturalmente indipendente, è stata modellata e calcolata separatamente come carico lineare gravante sulla piastra.

#### 5. MATERIALI: IL LEGNO

Il sistema a pannelli portanti è la novità tra i sistemi costruttivi per la realizzazione di edifici a struttura portante di legno, che da qualche tempo è entrato nelle costruzioni edili facendo valere le sue doti di leggerezza e il suo “appeal” ecosostenibile. Il nome deriva dal componente strutturale principale, ossia il pannello di legno massiccio a strati incrociati (fig.7), con il quale vengono realizzate le pareti e i solai degli edifici, i quali sono simili per robustezza a quelli costruiti in muratura.

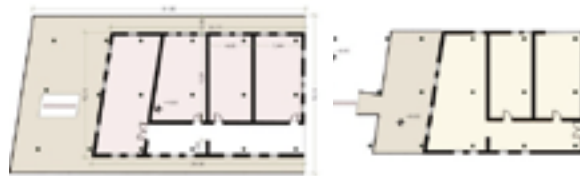


**Figura 7: Pannello di legno massiccio a strati incrociati**

Gli studi internazionali confermano un futuro grandioso per l'edilizia in legno: se di recente gli aspetti ecologici sono stati determinanti, attualmente le qualità antisismiche e soprattutto i solidi motivi economici entrano in gioco con un'importanza sempre crescente.

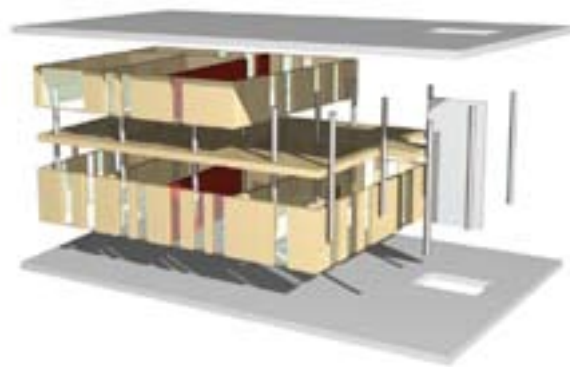
Ulteriori vantaggi sono: partendo da un più che ottimo rapporto peso/portanza, prefabbricazione, flessibilità, alta protezione termica e massa, traspirabilità, protezione dal rumore, durabilità, protezione dal fuoco e eco-compatibilità.

Una tecnica moderna che permette qualità, affidabilità, precisione e prestazioni tecniche, che non poteva che essere sperimentata. L'adozione nella mia progettazione di questa tecnologia, anche se limitandone le potenzialità a strutture mono-bipiano, ha determinato il calcolo strutturale degli stessi e dei carichi da applicare alla struttura modellata e successivamente quello energetico, qui omesso.



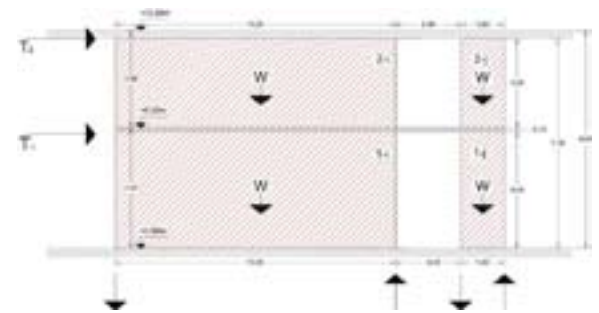
**Figura 8: Pianta della parte in pannelli di legno oggetto della progettazione**

Il calcolo dei pannelli massicci in legno è stato condotto per gli elementi strutturalmente significativi di una porzione tra la prima e la seconda piastra (fig.8-9): il pannello inferiore e superiore e il solaio<sup>2</sup>. Particolarmente interessante è stata la verifica da affrontare nei confronti delle azioni orizzontali, controllando la resistenza a sollevamento degli elementi angolari metallici di collegamento della parete ai loro bordi (holdown) e la resistenza allo scorrimento degli ancoraggi di collegamento (fig.10-11).

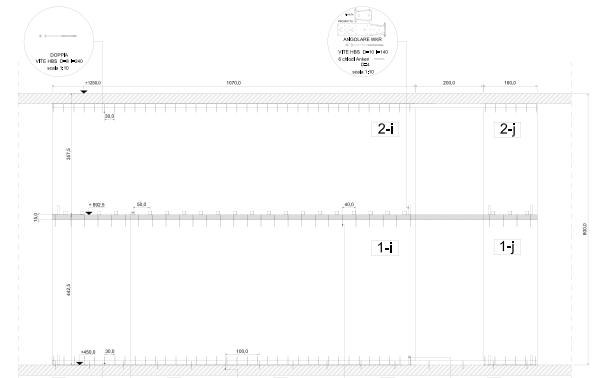


**Figura 9: Esploso di una porzione del progetto con individuazione del pannello interno**

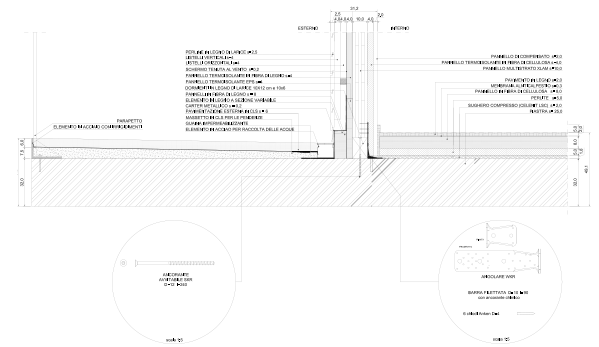
2. Per i calcoli strutturali dei pannelli in legno massiccio a strati incrociati è stato consultato il testo Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M., *Le strutture in legno in zona sismica. Criteri e regole di progettazione ed il restauro*, II edizione, CLUP, 2006.



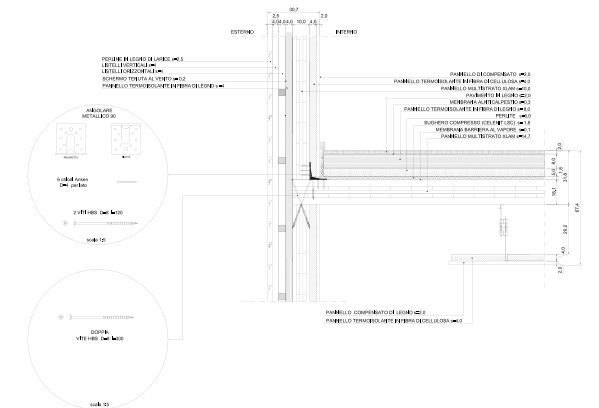
**Figura 10: Progetto-schema statico della parte interna**



**Figura 11: Soluzione esecutiva della parte interna**



**Figura 12: Disegno esecutivo del nodo tra piastra e parete in legno**



**Figura 13: Disegno esecutivo del nodo tra pannello e solaio in legno**

La progettazione delle strutture in legno è avvenuta precedentemente a quella delle strutture in cemento armato, in quanto esse saranno considerate come carichi lineari gravanti.

La soluzione in legno integra non ha solo caratteristiche di risparmio energetico, economico, basate sulla flessibilità e modularità, ma anche una soluzione strutturale basata sulla leggerezza e sulla completa indipendenza dalla parte “umida” della struttura portante. L'interazione strutturale tra gli stessi elementi in legno (fig.13) e tra piastra e scatolari in legno, avviene attraverso connessioni puntuali solo lungo il perimetro inferiore delle murature in legno (fig.14): superiormente non c'è contatto strutturale ma solo elementi di chiusura funzionali.

## 6. MATERIALI: LA PIASTRA IN CEMENTO ARMATO

Antecedentemente alla costruzione del modello di calcolo della piastra, lo studio si è incentrato sulla teoria classica delle piastre isotrope, o teoria di Poisson-Kirchoff delle piastre sottili, il quale è servito per confrontare i risultati ottenuti nel modello agli elementi finiti, con risultati ottenuti da calcoli empirici<sup>3</sup>.

Lo studi<sup>4</sup> e la contemporanea progettazione integrata ha guidato le scelte strutturali verso l'esigenza di una piastra sottile, apparente monolitica in quanto non nervata, che ha portato all'adozione obbligatoria di un sistema di alleggerimento interno allo spessore. Questo tipo di soluzione si è rilevata appropriata anche dal punto di vista tecnologico, in quanto la realizzazione della caseratura e del puntellamento ottimizzano i tempi di realizzazione e conseguentemente i costi, e il risultato di finitura va incontro alle esigenze architettoniche di un elemento strutturale a vista.

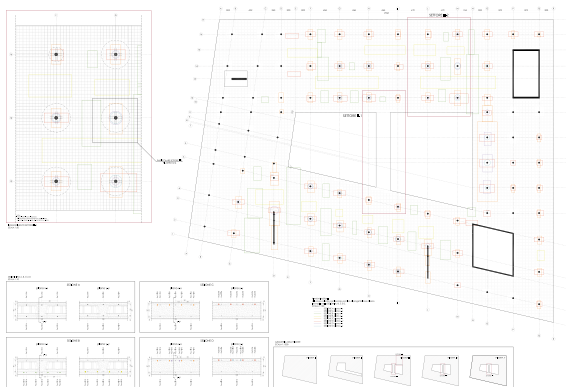


Figura 14: Pianta dell'intera piastra

La piastra è stata verificata con la UNI EN 1992-1-1 (EC2) ed è stato scelto un calcestruzzo classe C 45/55 e acciaio da armatura classe B450C.

Le verifiche a flessione e a punzonamento riguardano gli stati limite ultimi. Vista l'estensione della piastra, la verifica a flessione non è stata condotta

puntualmente ma attraverso la progettazione della piastra in quattro sezioni di armatura differenti, cercando con ognuno di coprire i valori di momento positivi e negativi, derivanti dall'analisi.

Contemporaneamente è stato trovato un disegno di armatura, superiore e inferiore, che corresse indipendentemente lungo tutta la piastra nelle due direzioni principali, scelte perpendicolari tra loro e parallele ai lati nord e est dell'edificio, che coprisse la maggior parte delle entità di momento medio piccole. La geometria dell'armatura è stata suggerita soprattutto dalla geometria dell'alleggerimento scelto.

La prima parte ha riguardato la progettazione della zona di piastra con momento compreso tra -40kNm e +40kNm, valori che identificavano l'estensione maggiore, come è possibile vedere dalle immagini (fig.15-16).

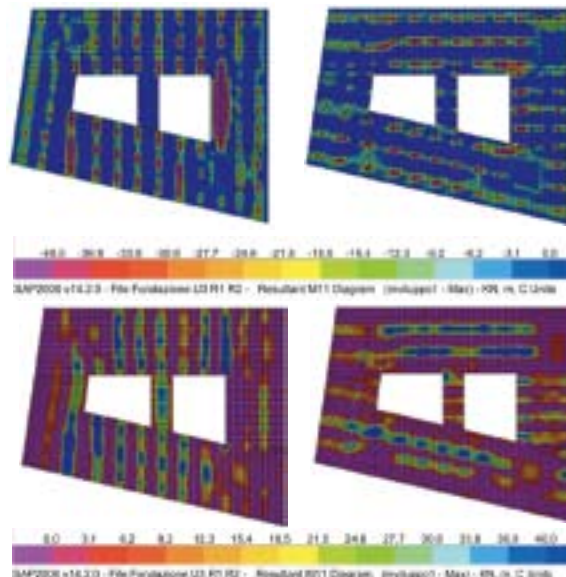


Figura 15: Risultati del modello numerico



Figura 16: Progetto della sezione A

Il momento positivo derivato dall'analisi, non supera mai il valore di +100 kNm. Per le zone con momento positivo compreso tra il valore di +40 kNm e +100kNm, con l'aiuto della rappresentazione grafica dei risultati dell'analisi, è stata progettata una sezione maggiormente armata nella parte tesa aggiungendo armatura alla sezione A descritta precedentemente (fig.17).

3. Per l'argomento sono stati consultati alcuni testi tra i quali l'ancor valido Belluzzi O., *Scienza delle costruzioni*, Vol. III, Zanichelli, 1990., Bares R., *Calcolo di lastre e piastre con la teoria elastica lineare*, CLUP, 1986.

4. È stato condotto uno studio sull'evoluzione dell'elemento strutturale della piastra in c.a. L'articolo è qui citato: Mannelli M., Mannelli P., Ada W., *Una nuova tecnica costruttiva per la realizzazione di piastre continue senza travi*, Giornale Aicap, 1998.

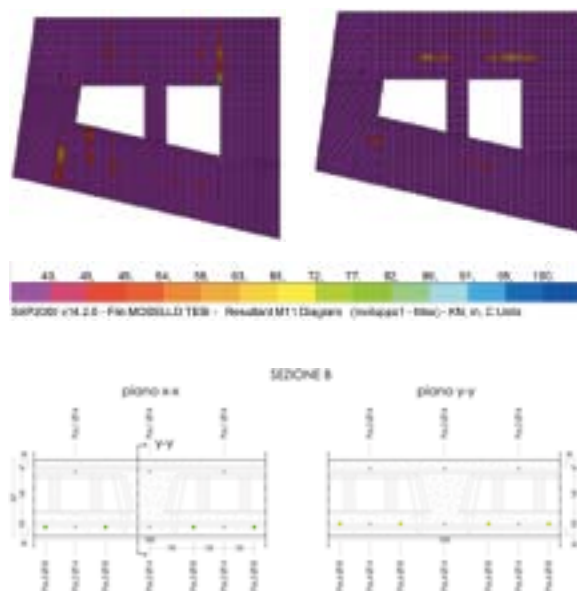


Figura 17: Progetto della sezione B

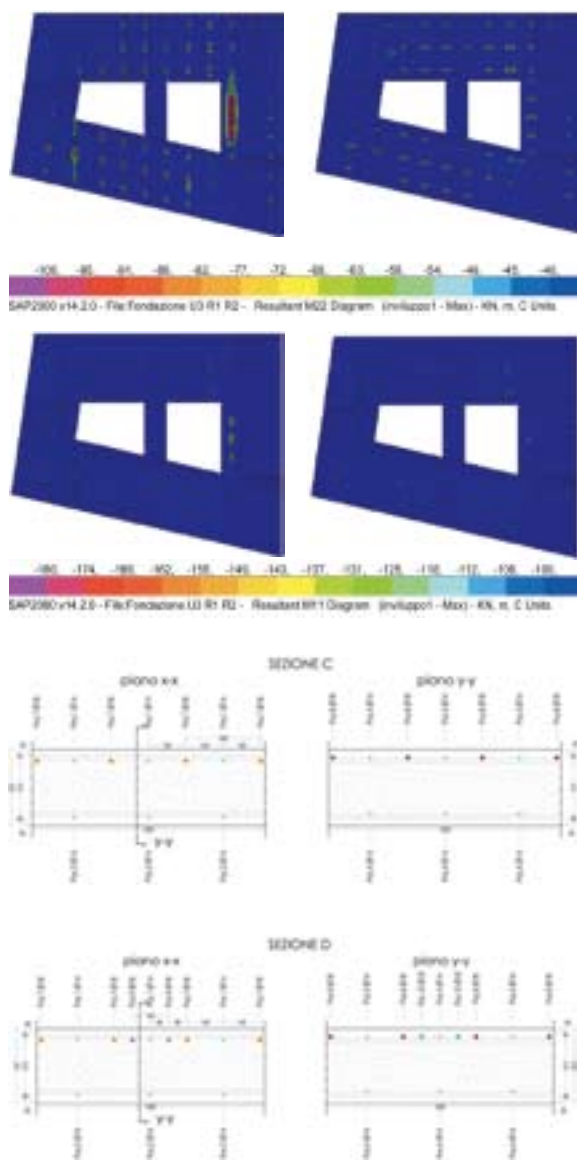


Figura 18: Progetto della sezione C e D

5. Si veda in particolare Angotti F., Orlando M., *Punching. Shear design rules of Eurocode 2: a model still in progress*, Studies and Researches, V.29, 2009, Graduate School in Concrete structures, Fratelli Pesenti, Politecnico di Milano.

I valori dei momenti negativi inferiori a -40 kNm hanno un range più ampio rispetto ai positivi, per cui è necessario dividere la progettazione in due parti. È stata progettata la sezione C per le zone con valori di momento negativi compresi tra -40kNm e -130 kNm e la sezione D per momenti compresi tra -130kNm e -180 kNm (fig.18). I momenti resistenti delle sezioni progettate sono:

- MRdA = 47,00 kNm
- MRdB = 108,00 kNm
- MRdC = 134,90 kNm
- MRdD = 183,30 kNm

L'identificazione delle zone caratterizzate dai valori precedentemente detti, è avvenuta per sovrapposizione degli output del programma di calcolo strutturale adottato SAP2000, direttamente con la pianta della piastra in esame: questo per ogni range e per ogni direzione del momento M11 e M22. Nella piastra, infatti, sono state identificate quindi 8 zone, di cui 2 in realtà sono la parte di piastra non evidenziate, che sta a identificare l'intera armatura corrente nella due direzioni principali.

A seguire è stata condotta la verifica a punzonamento<sup>5</sup> (EC2 6.4): esso è determinato da un carico concentrato o da una reazione agente su area relativamente piccola, denominata area caricata di una soletta. Gli output del programma SAP2000 circa il taglio sull'intera piastra V13 e V23 non saranno riportati in quanto poco significativi, poiché le sollecitazioni sono concentrate solo su un intorno piccolo dei pilastri. Un modello appropriato di verifica al punzonamento è indicato nella figura (fig.19).

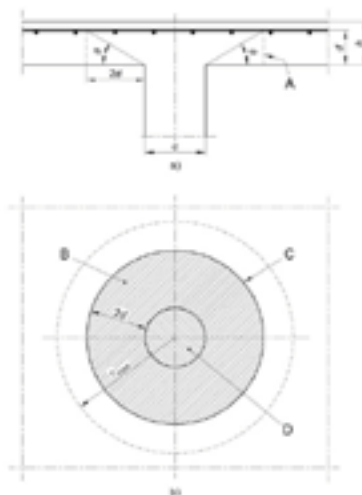


Figura 19: Modello di verifica a punzonamento

La norma raccomanda che la resistenza a taglio sia verificata lungo la faccia del pilastro e il primo perimetro di verifica; nel caso sia necessaria un'armatura a taglio, si raccomanda che un ulteriore perimetro di verifica sia trovato laddove l'armatura a taglio non è più richiesta.

Nella progettazione è stato deciso di considerare la piastra in acciaio in testa al pilastro come un

capitello, in modo tale da migliorare il comportamento a punzonamento (fig.20).

La sezione di verifica è quella definita dal perimetro di verifica e che si estende sull'altezza utile  $d$ : per piastre di spessore costante come nel caso in esame, la sezione di verifica è perpendicolare al piano medio della piastra.

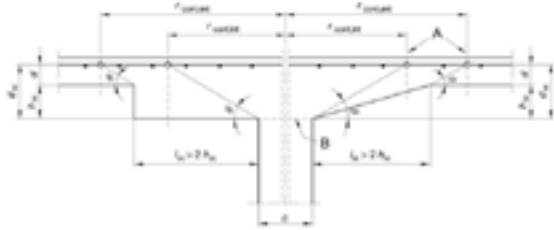


Figura 20: Schema della piastra con capitello allargato

La verifica a punzonamento non è risultata soddisfatta, quindi è stato opportuno progettare un'apposita armatura.

A questo punto la progettazione ha seguito le disposizioni del punto 9.4.3 EC2 e in contemporanea il punto 6.4.5 EC2, riguardante la resistenza a punzonamento di piastre munite di armature a taglio. Per definire il passo delle armature in direzione radiale è stato necessario fissare la posizione della prima e dell'ultima serie di armature, tenendo presenti le prescrizioni (fig.21).

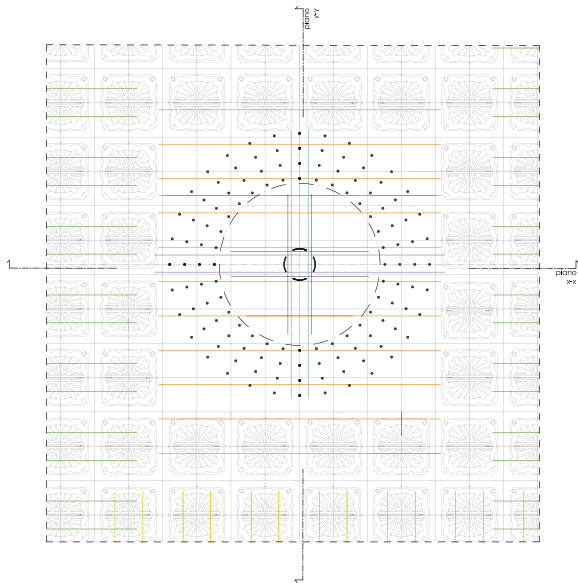


Figura 21: Pianta della disposizione delle armature a punzonamento

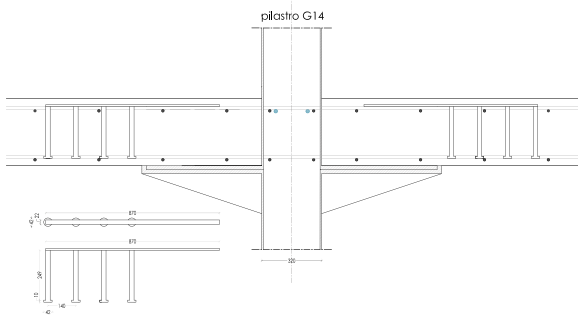


Figura 22: Pianta e sezioni dell'armatura tensionale a punzonamento

La progettazione ha avuto come risultato l'inserimento in cantiere di 32 piattini in acciaio di lunghezza 870 mm con n.4 pioli D.22 saldati ad una estremità di lunghezza 249 mm, da legare all'armatura superiore della piastra prima del getto (fig.22).

Le verifiche tensionali, controllando il limite dello stato di tensione, il controllo della fessurazione e della deformazione riguardano le verifiche agli stati limite di esercizio.

Lo stato di compressione nel calcestruzzo deve essere convenientemente limitato per evitare l'insorgenza di fessurazioni longitudinali, micro fessurazioni, nonché elevati valori delle deformazioni viscosse che possono ridurre la funzionalità della struttura. Nelle armature, lo sforzo di trazione deve essere limitato per evitare deformazioni anelastiche o intollerabili ampiezze di lesioni ed eccessive deformazioni. È stato possibile ammettere che per quanto concerne l'aspetto, fessurazioni o spostamenti non accettabili, siano evitabili quando, sotto la combinazioni di carico caratteristica, la tensione di trazione nell'armatura, non ecceda il valore raccomandato di  $0,8f_{yk}$ .

Visto la tipologia di progettazione "a zone" agli SLU, è stato opportuno condurre tali verifiche partendo dai limiti sia tensionali sia di fessurazione verificando quale fosse il momento massimo sopportabile affinché esse fossero verificate. Per ogni sezione progettata, dalla A alla D, è stato controllato quale fosse  $M_{Rd}$  allo SLE, e ho condotto una controprova sulla piastra sia per M11 che M22 nei corrispettivi range di sollecitazioni. Essi sono differenti rispetto a quelli dello SLU, e sono basati su il valore massimo sopportabile allo SLE rara.

Il controllo è avvenuto estraendo dal programma di calcolo i risultati tabellari dei momenti allo SLE (combinazione rara) e controllato che non superassero rispettivamente per ogni sezione il valore di  $M_{Rd}$  allo SLE rara. Per eccessivo onere computazionale, vista l'estensione della piastra, ho potuto controllare solo le parti maggiormente sollecitate (fig.23).

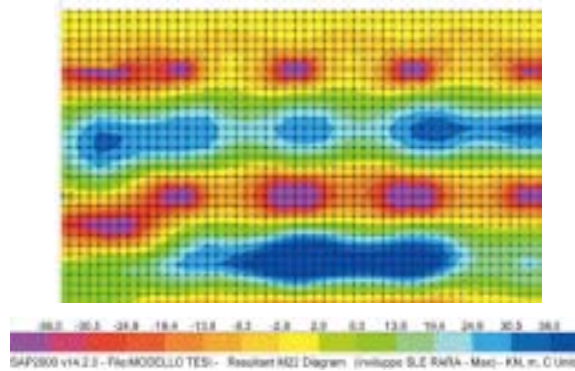


Figura 23: Individuazione delle aree da analizzare allo stato limite di esercizio



Nelle zone sollecitate a momento negativo, sezione D, il limite dell'ampiezza delle fessure è rispettato con un valore pressoché uguale al valore massimo ammissibile, ma questo è possibile poiché le zone dove raggiungo certi valori di sollecitazione a momento sono in realtà estese e "sostenute" dalla piastra a forma di settore circolare di raggio 600 mm saldata al pilastro, la cui progettazione è in seguito rammentata.

L'ultimo controllo ha riguardato l'*inflessione*, descritto nel paragrafo 7.4 EC2, che deve essere tale da non compromettere la funzionalità e l'aspetto estetico.

## 7. MATERIALI: IL PILASTRO IN ACCIAIO-CALCESTRUZZO

L'idea architettonica da tradurre in struttura punta a un diametro ridotto ma senza eccessi, per non creare un effetto non piacevole alla vista d'insieme pilastro-piastra. Dopo una fase di semplice predimensionamento, la progettazione si è poi spostata verso una tipologia costruttiva di colonna composta in acciaio-calcestruzzo. Questa metodologia ottimizza, oltre le esigenze strutturali, i tempi e la lavorazione cantieristica, assai complessa nel caso di un pilastro circolare semplicemente gettato. Il risultato doveva avere un'ottima finitura esterna, poiché l'idea è sempre quella di lasciare a vista gli elementi strutturali, cercando il meno possibile di nasconderli e farli diventare forma architettonica, con il risultato di una struttura con carattere concretamente più espressivo.

Nel mercato esistono vari elementi già parzialmente prefabbricati, che permettono una velocizzazione in cantiere, aspetto non sottovalutabile a causa del numero elevato di elementi (360 pezzi divisi in 4 altezze variabili). Una volta analizzati questi esistenti in commercio, è stato pensato di progettare interamente senza avvalersi di elementi già in uso. La norma da utilizzare per la progettazione è la UNI EN 1994-1-1:2005 (EC4). Il punto 6.7 si applica per il progetto di colonne composte con sezioni circolari riempite di calcestruzzo come in questo caso: è stato scelto di usare il metodo semplificato al punto 6.7.3 per membrature dotate di sezione trasversale doppiamente simmetrica ed uniforme per tutta la lunghezza della membratura. È stato possibile trascurare gli effetti dell'instabilità locale in quanto i valori geometrici non superavano certi valori-limite indicati nella normativa.

Nell' Eurocodice 4 al punto 6.7.3.4. viene esposto un metodo di calcolo degli effetti del secondo ordine, ma è stato deciso adottare il metodo esposto nell'Eurocodice 2 in quanto più dettagliato, anche se descritto per strutture in solo calcestruzzo armato.

L'analisi è stata fatta interamente per ogni pilastro studiato (tre tipologie significative) e per ogni

tratto di pilastro. Vista la filosofia di analisi strutturale adottata, derivata pure dalla complessità e dall'estensione dell'edificio in esame, è stato possibile l'utilizzo del metodo semplificato basato sulla stima della curvatura nominale. Il momento trovato con questo metodo sarà poi sommato ai momenti del primo ordine per ogni tratto di pilastro e saranno con esso condotte le verifiche agli stati limite ultimi.

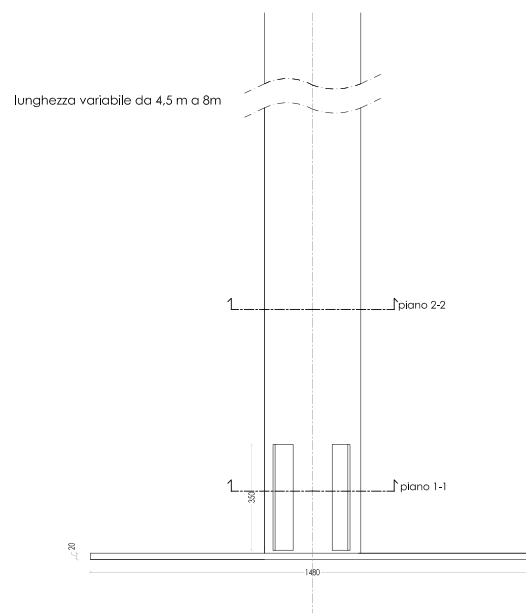


Figura 24: Prospetto della base del pilastro

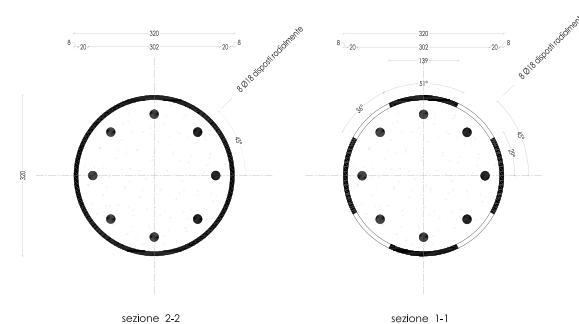


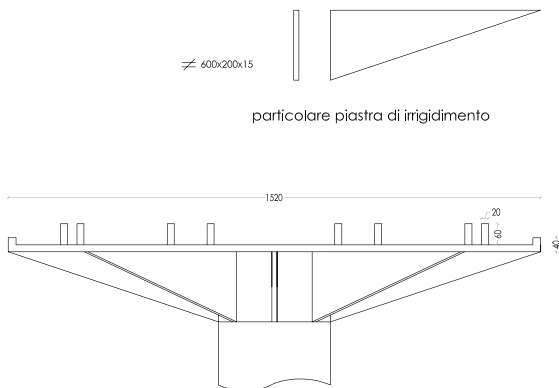
Figura 25: Sezione del pilastro

Gli elementi sono stati verificati allo stato limite ultimo per resistenza e stabilità. Circa le verifiche allo stato limite di esercizio, l'EC4 prescrive per le colonne composte negli edifici nessuna limitazione tensionale (7.2.2).

La norma raccomanda di calcolare le inflessioni dovute ai carichi applicati alla sola membratura di acciaio in conformità alla UNI EN 1993-1.1. In essa si legge che per gli spostamenti orizzontali un limite degli scostamenti assoluti e relativi. Per tubi riempiti di calcestruzzo di sezioni circolari, si può considerare l'incremento di resistenza del calcestruzzo provocato dal confinamento a patto che la snellezza adimensionale definita nel punto 6.7.3.3 non ecceda certi valori, come avviene per il caso esaminato.

Il risultato della progettazione, una sezione circo-

lare cava in acciaio di diametro esterno 320 mm e spessore dell'acciaio 8 mm (acciaio strutturale per i pilastri di sezione mista in profilati a caldo a sezione circolare cava S 460 NH/NLH), è visibile nelle immagini (fig. 24-25).



**Figura 26: Progetto della piastra in acciaio con irrigidimenti posta in testa al pilastro**

L'interazione tra questo elemento e la piastra in c.a. alleggerito, ha trovato una soluzione funzionale ed elegante attraverso la piastra-capitello a vista completamente esterna al getto (fig.26). Per la soluzione con pannelli massicci in legno è stata studiata una soluzione a secco per il completamento del solaio, sia nel caso mono piano sopra la piastra, che in quello bi piano dove il solaio portante è in legno. Nell'ultimo caso, i pannelli solai saranno pensati assemblati perfettamente sull'asse orizzontale proiettato dal pilastro: ad essi verrà precedentemente tagliata una forma semicircolare in corrispondenza del pilastro, leggermente più grande dell'effettivo raggio del pilastro per consentire movimenti indipendenti.

## 8. LA PASSERELLA IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

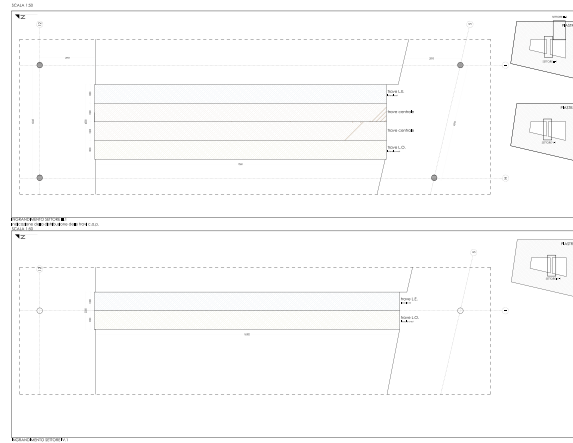
All'interno dell'edificio erano state progettate tre passerelle che attraversano la corte, collegando ai vari piani i ballatoi esterni costituiti dagli oggetti della piastra (fig 27). Le larghezze erano sempre differenti, per cui inizialmente è stato necessario rendere il sistema più omogeneo, venendo incontro a una necessaria modularità e ad conseguente sostenibilità economica.



**Figura 27: Immagine della corte interna e delle passerelle**

Le passerelle sono dunque state riprogettate assegnando una larghezza multipla di 1 m; la prima passerella sarà quindi realizzata accostando 4 travi di larghezza unitaria, e le altre 2 passerelle accostando 2 travi (fig.28).

La progettazione strutturale quindi prevede la realizzazione di 8 travi in precompresso gettate in stabilimento, di lunghezze variabili da 14 a 16 m. In questo modo le sezioni delle 8 travi precomprese saranno omogenee: le variabili saranno la loro lunghezza e la presenza di chiavi di taglio in un solo lato, destro o sinistro o in entrambi.



**Figura 28: Pianta delle passerelle tipo**

Il passo successivo è stato quello di trovare una soluzione che integrasse le esigenze architettoniche, e che interagisse con la piastra in c.a. alleggerito. Inizialmente la scelta si era orientata verso una soluzione a cavi post-tesi, ma è stata abbandonata a causa dell'impossibilità di attrezzare le testate con i cappucci dei cavi necessari.

Dunque la progettazione si è mossa verso la tipologia a cavi pre-tesi con sezione alleggerita con la quale è stato possibile arrivare al risultato sperato di somiglianza geometrica e estetica tra elemento piastra e elemento passerella. Lo schema statico adottato è stato quello di una trave appoggiata su entrambi gli estremi alla piastra, precisamente agli oggetti di questa. La sezione e lo sviluppo in lunghezza della trave sono stati gli obiettivi fissati che hanno guidato la progettazione: la passerella doveva avere lo stesso spessore della piastra e nessuna curvatura visibile in opera, in modo da assomigliare a un semplice prolungamento verso il vuoto della piastra. Lo spessore ridotto ha portato a scegliere strutturalmente una soluzione a cavi rettilinei. Le sezioni rappresentate sono: la sezione 1-1 di appoggio, la sezione 2-2 piena a una distanza di 1 m dall'appoggio, la sezione 3-3 e 4-4 alleggerite (fig 29).

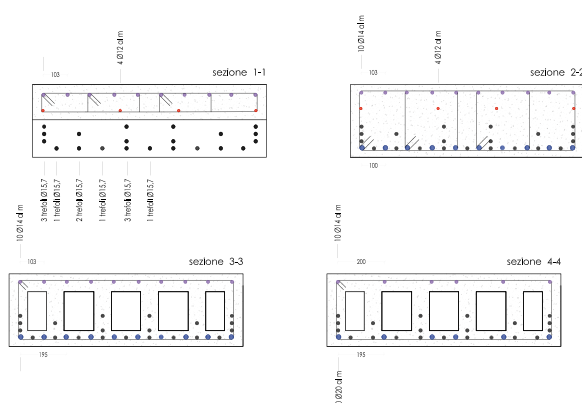


Figura 29: Progetto delle sezioni della passerella

I materiali usati per la progettazione sono calcestruzzo di classe di resistenza C 90/105, barre di acciaio tipo B500H e trefoli 6/10<sup>11</sup> (15,70 mm) con tensione a rottura  $f_{ptk} = 1860,00 \text{ N/mm}^2$ . Il calcolo è stato condotto per le varie fasi di esecuzione della trave (fig.30): dal getto, al tiro, alla messa in opera, considerando le perdite istantanee e differenze di viscosità, ritiro e rilassamento<sup>6</sup>.

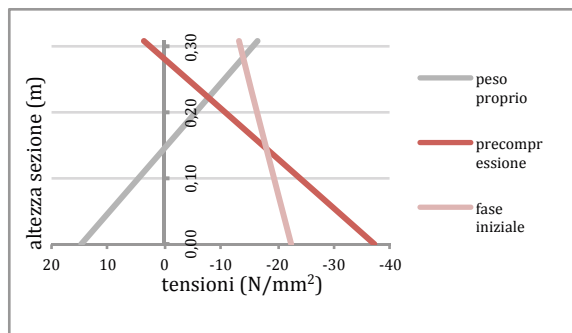


Figura 30: Stati sensionali della sezione nelle varie fasi

In riferimento alla sezione di mezzeria, è stata necessario verificare le tensioni in esercizio sia per combinazione rara che per quella quasi permanente. Poiché non si raggiunge la decompressione in alcuna delle combinazioni di carico, la verifica di fessurazione è positiva; inoltre è stata condotta la verifica a deformazione che risulta compatibile con la funzionalità dell'opera. Tra le verifiche allo stato limite ultimo, è stata eseguita la verifica per sforzo normale: nella sezione di mezzeria, al fine di determinare il momento resistente di calcolo, la precompressione è stata considerata come uno stato deformativo imposto e utilizzata la soluzione in forma chiusa. All'appoggio il taglio è stato verificato trascurando quello dovuto alla precompressione e sono state verificate le bielle compresse in calcestruzzo da cui è risultata necessaria una staffatura minima. Successivamente è stata calcolata la lunghezza di ancoraggio degli elementi pre-tesi per la trasmissione completa della forza di precompressione al calcestruzzo. Tenendo presente che per tale tratto la precompressione non è operante, questa andrebbe verificata alla stregua di cemento armato ordinario.

6. I calcoli strutturali sono stati eseguiti seguendo le indicazioni contenute del testo Pozzo E., *Teoria e tecnica delle strutture*. Vol. III: *Il cemento armato precompresso*, Pitagora edizioni, 1999.

La progettazione si integra ulteriormente dello studio di due elementi di dettaglio, le chiavi di taglio progettate nei prospetti laterali delle travi in c.a.p. affiancate e le selle di connessione tra queste e la piastra.

Per il progetto della “sella Geber”, necessaria per l'appoggio richiesto ad una stessa altezza per esigenze architettoniche, si posso considerare due diversi tralicci tirante-puntone, eventualmente combinabili tra loro. L'eurocodice lascia comunque la possibilità di usare uno solo dei due tralicci (fig.31), ma è possibile osservare che il secondo schema risulta essere carente in esercizio lasciando completamente privo di armatura il bordo inferiore della sella. Risulta pertanto opportuno integrare le due tipologie, o scegliere di progettare con il traliccio “a”, come nel mio studio.

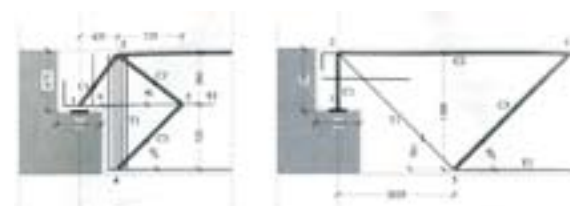


Figura 31: Tralicci per la sella Geber

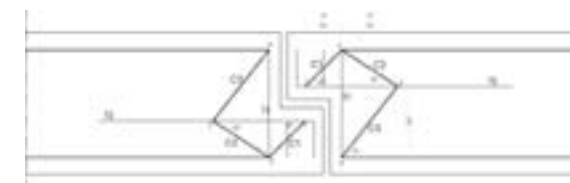


Figura 32: Schema di progetto della sella

La sella progettata (fig.32 e 33) ha una geometria dettata dalle esigenze architettoniche e dai minimi geometrico-strutturali: risulta un'altezza utile molto bassa di 95 mm. Definita la profondità delle aste del traliccio, e calcolato gli sforzi su di esse, vengono verificati i nodi, i tiranti e i puntone.

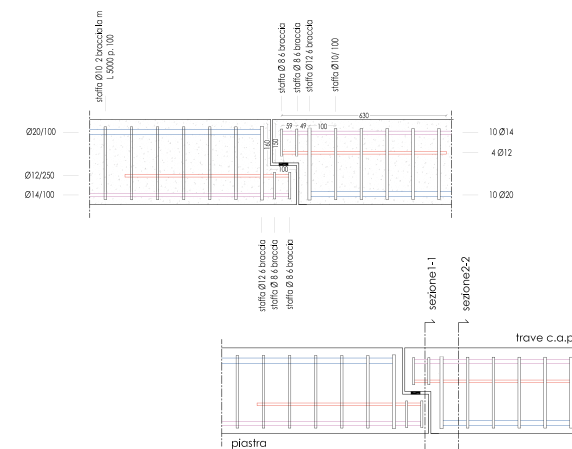


Figura 33: Il progetto della sella di appoggio

Come per gli altri elementi, anche per le passerelle, la chiave della progettazione è stata la leggibile integrazione progettuale: essi diventano forma

estetica, materiale espressivo. La progettazione strutturale è stata guidata, non solo dal messaggio estetico, ma anche dalla necessità di interagire con altri sistemi costruttivi, affrontando problematiche come l'appoggio della trave in c.a.p. nella piastra in c.a.. La soluzione così ottenuta è l'ultima di una lunga serie di sperimentazioni, ognuna della quali scartata per cercare una soluzione che sintetizzasse meglio tutte le necessità derivate dall'integrazione e dall'interazione.

## 9. CONCLUSIONI

Lo studio di un edificio di questa complessità abbraccia innumerevoli aspetti e di conseguenza è sembrato opportuno approfondire solo gli elementi strutturali qualificanti che ne garantiscono la fattibilità.

La progettazione di ognuno di questi elementi, nel rispetto dei relativi Eurocodici, è stata soddisfacente, in quanto le dimensioni, le soluzioni trovate per risolvere l'integrazione tra i vari aspetti progettuali e l'interazione tra le varie tecniche strutturali adottate, rispettano in pieno il progetto Architettonico redatto per il Concorso Internazionale.

Il lavoro è parte della Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Edile della scrivente, presso l'Università degli studi di Firenze, Facoltà di Ingegneria, dal titolo:

“Progettazione integrata e sostenibile di un edificio a piastra a Stoccarda”, Relatori Prof. Ing. Paolo Spinelli, Prof. Arch. Oswald Zoeggeler e Prof. Ing. Maurizio Orlando, Co-Relatori Ing. Marco Pio Lauriola e Ing. Carlo Guastini, data di Laurea 31 Marzo 2011.

*Marta BALDI, nata ad Arezzo il 23 settembre 1983, laureata in Ingegneria Edile presso la Facoltà di Ingegneria di Firenze nel 2011, attualmente dottoranda in Processes, Materials and Construction in Civil Environmental Engineering and for the Protection of the Historic Monumental Heritage - (International PhD Program).*

*Libero professionista dal 2008 si occupa di interventi di progettazione integrata, project management, riabilitazione energetica e ecosostenibilità.*