

# A historical archive for Nervi's masterpieces

## Un archivio storico per i capolavori di Nervi

L. Radice<sup>1</sup>, M. Marchetti<sup>1</sup>, V. Meroni<sup>1</sup>, E. Margiotta Nervi<sup>2</sup>, M. di Prisco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

<sup>2</sup> *Associazione Pier Luigi Nervi Project, Bruxelles, Belgium*

**ABSTRACT:** The Pirelli tower, one of the most representative buildings in the city of Milan, is now at the end of its service life, as many other iconic pieces of modern architecture. Today, commitment in the research of new solutions in the construction field has to be dedicated, to the same extent, to the knowledge and conservation of the existing architectural heritage. In order to keep the historical memory of the Pirelli building, the purpose of this work is to connect it to the present situation and, in particular, to the current codes, which are more restrictive than those applied in the past, both for verification methods and loading conditions acting on the structure. For these reasons, a linear-elastic structural check was carried out for the main structural elements of the tower and this showed that some of them are not fulfilling the current requirements. Therefore, a non-linear analysis was also performed, in order to evaluate the redundancy of the structure and, if possible, to exclude the need of any strengthening measure. / Il grattaciolo Pirelli, simbolo della Milano del Novecento, è ormai giunto al termine della sua vita utile, come molti altri edifici simbolo della storia dell'architettura moderna. In questo contesto, oggi, con lo stesso impegno dedicato alla ricerca di soluzioni innovative nell'ambito delle nuove costruzioni, è necessario guardare al patrimonio esistente per conoscerlo e preservarlo. Proprio al fine di conservare la memoria storica del grattaciolo, questo lavoro si propone di metterlo in relazione con la realtà presente ed, in particolare, con le norme attuali, che risultano assai più restrittive rispetto a quelle relative agli anni della sua costruzione, sia per quanto riguarda i metodi di verifica, sia in relazione ai carichi agenti sulla struttura. Per questo motivo, è stata svolta una verifica strutturale in campo lineare sui principali elementi del grattaciolo, da cui è emerso che alcune porzioni della struttura non soddisfano le richieste delle norme attuali. Per questi elementi l'analisi è stata approfondita, svolgendo una verifica strutturale in campo non lineare, al fine di valutare una eventuale capacità redistributiva della struttura ed escludere la necessità di interventi di consolidamento.

**KEYWORDS:** skyscraper; tower; tall buildings; Pirelli; structural verification; limit states; redundancy; robustness; redistribution analysis; aircraft impact / grattaciolo; Pirelli; verifiche strutturali; stati limite; capacità redistributiva; robustezza strutturale; analisi di redistribuzione; impatto aereo

## 1 INQUADRAMENTO GENERALE

### 1.1 *Il grattaciolo Pirelli tra passato e presente*

Il grattaciolo Pirelli, progettato e costruito a Milano tra il 1956 e il 1960 per conto dell'omonima famiglia, si pone fin da subito come uno degli edifici più rappresentativi della città. Esso assume infatti un ruolo fondamentale nell'Italia della ricostruzione, in quanto si propone come manifesto programmatico dell'industria lombarda e come baluardo della civiltà industriale, della quale incarna e celebra i principi fondamentali, come il progresso tecnologico, la fiducia nel futuro, la modernità e l'efficienza del committente. Oggi, il grattaciolo è uno degli edifici più noti di Milano e simbolo della storia, delle istituzioni e del carattere dinamico e moderno della città.

### 1.2 *Il progetto architettonico*

Nel 1960, a lavori ultimati, il Pirelli è uno dei primi grattacieli europei: alto 31 piani, per un totale di 127,10 m, si staglia come una figura isolata nel cuore della zona destinata a ospitare il Centro Direzionale di Milano, in un lotto pentagonale compreso tra le attuali via Galvani, via Filzi e piazza Duca d'Aosta, su cui si affaccia anche la stazione Centrale.

La poetica del progettista architettonico del Pirelli, Gio Ponti, si traduce in una pianta simmetrica ma irregolare, sfaccettata, con due valve accostate e socchiuse ai lati. Il disegno della facciata ricalca in modo preciso la struttura portante, interponendo ai setti centrali e alle punte laterali porzioni vetrate

alternate ad altre opache. I materiali che costituiscono la facciata sono l'alluminio per montanti e traversi ed il vetro. Le parti opache sono invece pannelli sandwich in lamiera. Gli elementi strutturali, evidenti in facciata, sono rivestiti a mosaico con tessere di ceramica che smaterializzano le superfici, conferendo alle parti cieche lo stesso effetto che trasmettono quelle vetrate.

Il grattacielo ha l'aspetto di un prisma, di un cristallo piantato nel terreno e proteso verso il cielo, al centro di un piazzale rialzato (la collina) dalle linee irregolari. A completamento del lotto e a servizio dell'edificio principale, verso via Filzi è presente anche il cosiddetto corpo basso posteriore, un insieme di fabbricati a 3 o 4 piani fuori terra progettati dallo stesso Gio Ponti.

### 1.3 Il progetto strutturale

La soluzione strutturale elaborata per il Pirelli da Pier Luigi Nervi, con la collaborazione di Arturo Danusso, è notevolmente influenzata dalle scelte architettoniche di Gio Ponti, che richiedono la presenza di pochi elementi strutturali verticali, al fine di realizzare grandi luci. Da ciò deriva una concentrazione dei carichi dei solai sul minor numero possibile di strutture portanti verticali.

Oltre alle fondazioni, perciò, gli elementi strutturali principali del grattacielo sono: quattro nuclei centrali "a farfalla", evidenti in facciata, che si biforcano gradualmente a partire dal solaio del primo piano fuori terra e si rastremano verso l'alto, partendo da una larghezza alla base di 2 m fino a raggiungere i 50 cm in sommità; due nuclei laterali (o punte) alle estremità, a sezione triangolare variabile con l'altezza, che racchiudono i vani scala, gli ascensori di servizio e alcuni locali tecnici; due nuclei ascensore, di forma parallelepipedica, collocati in posizione centrale, dietro i setti "a farfalla". In questo modo, la pianta tipo risulta suddivisa in tre grandi campate, le due laterali di circa 14 m di luce e quella centrale di circa 24 m. I solai delle tre campate sfruttano un sistema a graticcio costituito da cinque travi a sezione variabile di altezza pari a 67 cm, sormontate da una soletta collaborante di 8 cm e irrigidite trasversalmente da traversi. Questo sistema strutturale è particolarmente adatto a resistere alla spinta data dall'azione del vento, opponendosi alle sollecitazioni orizzontali in senso trasversale. Infine, l'elemento di copertura è costituito da una struttura "a cavalletti" che sostiene una sottile vela che si rastrema dal centro verso il perimetro, conferendo al coronamento dell'edificio un carattere aereo e leggero.

## 2 LA VERIFICA DEL GRATTACIELO: PERCHÉ E COME

### 2.1 Il concetto di vita utile

Il grattacielo Pirelli, ultimato nel 1960, risulta oggi giunto al termine della sua vita utile.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 definiscono la vita utile (o vita nominale)  $V_N$  di un'opera strutturale come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Per la categoria "*Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale*",  $V_N$  viene considerata in genere pari a 50 anni. In quest'ottica, il grattacielo Pirelli, pur rientrando nell'ordinarietà in termini di dimensioni e di carattere non infrastrutturale della opera, si allontana dalla categoria sopra definita per la sua rilevanza come monumento e come simbolo di una città e della sua storia, analogamente a numerosi altri edifici a Milano e in Italia, per i quali non si pone il dubbio della conservazione (Nervi, E. M., Chiorino, C., Romeo, F., Salvatore, M., Baglioni, L., & Fallavollita, F. 2011. *Le geometrie strutturali di Pier Luigi Nervi: letture attraverso modelli*. L'industria del costruito, 417: 79-90). Essi, infatti, rappresentano opere talmente significative che, al termine della loro vita utile, anche nei casi in cui la soluzione meno onerosa dovesse risultare la demolizione, la rappresentatività ed il significato storico-artistico dell'edificio risultano tali da sceglierne senza alcun dubbio un'opera di conservazione, al pari di monumenti celebri di età precedenti, ma con l'ulteriore criticità di avere armature deteriorabili e di essere stato progettato in assenza di una piena consapevolezza sulla sua durata. Per questa ragione occorre procedere al più presto nell'intento di conoscere lo stato di conservazione e monitorarlo, al fine di favorirne l'estensione della vita utile. Per questi motivi, per gli edifici della modernità che hanno già assunto una notevole rilevanza all'interno del patrimonio storico-culturale, si può parlare di "archeologia del calcestruzzo armato".

Questo lavoro che è il risultato di una tesi di laurea in Ingegneria Edile-Architettura al Politecnico di Milano, si pone come obiettivo lo studio approfondito degli elementi strutturali del grattacielo Pirelli e la loro verifica all'interno di questa particolare prospettiva.

### 2.2 Ricerca, catalogazione e digitalizzazione del materiale in archivio

Una fase preliminare fondamentale per svolgere correttamente il processo di verifica, è rappresentata dalla ricerca e dalla digitalizzazione di tutto il materiale accessibile esistente sul grattacielo Pirelli. Tutti gli elaborati disponibili sono stati reperiti in diversi archivi, quali:

- Archivio della Regione Lombardia, Direzione Generale Culture, Identità e Autonomie della Lombardia, Milano;
- Archivio di Stato, Milano;
- Archivio Storico Pirelli, Milano;
- Cittadella degli Archivi, Milano;

- CSAC, Centro Studi e Archivio della Comunicazione, Parma.

Nei diversi archivi è stato possibile consultare e fare copia degli elaborati grafici originali di progetto redatti da Gio Ponti e dallo studio di progettazione di Pier Luigi Nervi e Arturo Danusso e le varie relazioni prodotte dall'impresa Bonomi, che ha eseguito i lavori di costruzione.

L'operazione successiva è stata la catalogazione e la digitalizzazione di tutto il materiale reperito, costituito da più di 100 tavole disegnate a mano. Tutti gli elementi strutturali sono stati ricostruiti digitalmente e, laddove le informazioni risultavano mancanti, sono state avanzate alcune ipotesi plausibili e coerenti con il materiale a disposizione. Dagli elaborati grafici di progetto, perciò, è stato possibile desumere tutte le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali (ad esclusione della copertura) e i particolari costruttivi, tra cui la geometria e la posizione dei ferri di armatura. Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche dei materiali, le informazioni sono derivate dalla consultazione delle varie relazioni prodotte dall'impresa costruttrice in merito alle prove eseguite sui materiali e alle prove di collaudo finali.

### 2.3 La verifica strutturale e la normativa

Una volta terminate le fasi di ricerca e di ricostruzione dettagliata degli elementi strutturali, si è proceduto ad una verifica del grattacielo Pirelli sulla base della normativa attuale, con la quale l'edificio deve poter essere confrontato nell'ottica della sua salvaguardia futura e di una piena funzionalità.

La normativa vigente in materia di verifica strutturale, il DM 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*, risulta molto più restrittiva rispetto al Regio Decreto Legge 16 novembre 1939, n°2229, *Norme per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato* e alla Circolare 23 maggio 1957 n°1472, *Armature delle strutture in cemento armato*, su cui Pier Luigi Nervi ha basato la progettazione strutturale del grattacielo negli anni Cinquanta.

L'unico criterio di verifica prescritto dalla normativa vigente negli anni di costruzione del Pirelli, infatti, è il metodo delle tensioni ammissibili, che non richiede alcuna distinzione tra carichi permanenti (strutturali e non strutturali) e carichi variabili, in quanto ciascuno di essi è moltiplicato per un coefficiente unitario. Il Regio Decreto, inoltre, non definisce alcun coefficiente di sicurezza sui materiali, ma impone semplicemente di considerare, ad esempio, per il calcestruzzo, un valore della resistenza a compressione pari a  $\sigma_{adm} = (\sigma_{r,28} / 3)$ , dove  $\sigma_{r,28}$  è la resistenza cubica del materiale a 28 giorni. Per quanto riguarda l'acciaio, invece, in base alle prescrizioni della Circolare 23 maggio 1957 n°1472, la tensione

ammissibile che si adotta per le armature ( $\sigma_{s,adm}$ ) non deve superare il 50% del valore di snervamento  $f_y$ .

La normativa attualmente vigente, invece, impone l'uso del metodo semiprobabilistico agli stati limite e i relativi coefficienti parziali di sicurezza, che operano, come noto, sulla resistenza caratteristica dei materiali e sull'intensità dei carichi.

## 3 LA VERIFICA STRUTTURALE IN CAMPO LINEARE: LE IPOTESI DI VERIFICA

### 3.1 Il modello e i carichi agenti

In primo luogo, viene svolta un'analisi strutturale in campo lineare, trascurando, solo in sede di verifica sezionale, la resistenza a trazione del conglomerato, di tutti i principali elementi del grattacielo, al fine di verificare la rispondenza ai criteri prescritti dalla normativa attualmente in vigore.

Per questo motivo, ogni elemento strutturale del grattacielo è stato modellato all'interno di un software a elementi finiti (Midas Gen 2015), assegnando le proprietà meccaniche ed elastiche dei materiali e i carichi verticali e orizzontali che gravano sulla struttura.

Le stratigrafie considerate per la stima dei carichi, sono il frutto di una ricostruzione condotta a partire da un'approfondita ricerca bibliografica e dagli elaborati grafici relativi al progetto originario del grattacielo Pirelli. Per quanto riguarda le informazioni non disponibili in questi documenti, sono state avanzate alcune ipotesi, con il criterio di rimanere, in tutti i casi, a favore di sicurezza.

### 3.2 I fattori di confidenza

Nel caso degli edifici esistenti, la conoscenza della struttura e dei materiali che la costituiscono è un aspetto cruciale, in quanto spesso affetti da un certo grado di incertezza. Per questa ragione, la normativa impone l'impiego di metodi di verifica basati sulla completezza e l'affidabilità dell'informazione disponibile e l'uso, nelle verifiche di sicurezza, di adeguati fattori di confidenza, che modificano i parametri di capacità in funzione del livello di conoscenza, relativo a geometria, dettagli costruttivi e materiali.

Nel caso del grattacielo Pirelli, il materiale a disposizione consiste principalmente nei disegni originali di progetto, dai quali è possibile ricavare la geometria e le caratteristiche dei dettagli costruttivi di quasi tutti gli elementi strutturali dell'edificio. Tutte queste informazioni risultano però affette da un certo grado di incertezza, relativo soprattutto alle proprietà meccaniche dei materiali. Per questo motivo, il livello di conoscenza che è stato assunto è il livello LC2, per il quale si adotta un valore del fattore di confidenza FC pari a 1,2.

Table 1. Knowledge level achieved and confidence factor applied / Livello di conoscenza raggiunto e fattore di confidenza utilizzato

Lc2	<b>Geometria:</b> da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione.	1.2
	<b>Dettagli costruttivi:</b> disegni costruttivi incompleti con limitate verifiche in situ.	
	<b>Proprietà dei materiali:</b> dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con limitate prove in situ.	
	<b>Metodo di analisi:</b> tutti	

### 3.3 Le proprietà meccaniche dei materiali

Alcune informazioni in merito alle proprietà meccaniche dei materiali (calcestruzzo e acciaio) sono state ricavate dal *Verbale di collaudo delle opere in conglomerato cementizio armato del Grattacielo Pirelli di Piazza Duca d'Aosta in Milano*, redatto dal prof. ing. Guido Oberti in data 15/11/1958 e da alcune prove ultrasoniche e di pull-out eseguite negli anni 2000 sotto la supervisione del prof. M. Acito, in seguito all'incidente aereo avvenuto nel 2002. Nelle tabelle 2 e 3 sono riportati i valori delle resistenze di progetto utilizzati in fase di verifica, sia per l'acciaio, sia per il calcestruzzo dei nuclei centrali, dei nuclei laterali e dei solai.

Table 2. Mechanical properties of steel and concrete in beams and slabs / Proprietà meccaniche di acciaio e calcestruzzo per le travi e solai

CALCESTRUZZO	
$R_{cm}$ [MPa]*	26,89
$f_{cm}$ [MPa]**	27,20
$f_{cd}$ [MPa]	10,78
ACCIAIO	
$f_{ym}$ [MPa]*	443,01
$f_{um}$ [MPa]*	658,80
$f_{yd}$ [MPa]	318,84
$f_{ud}$ [MPa]	435

Table 3. Mechanical properties of steel and concrete in central and lateral cores / Proprietà meccaniche di acciaio e calcestruzzo per le i nuclei centrali e laterali

CALCESTRUZZO	
$R_{cm}$ [MPa]*	38,09
$f_{cd}$ [MPa]	18,30
ACCIAIO	
$f_{ym}$ [MPa]*	398,24
$f_{um}$ [MPa]*	563,33
$f_{yd}$ [MPa]	240,99
$f_{ud}$ [MPa]	362,66

\* il valore di  $R_{cm}$  deriva dal *Verbale di collaudo delle opere in conglomerato cementizio armato del grattacielo pirelli di piazza duca d'aosta in milano*, redatto dal prof. Ing. Guido oberti in data 15/11/1958.

\*\* il valore di  $f_{cm}$  da prove ultrasoniche e di pull-out eseguite negli anni 2000 sotto la supervisione del prof. M. Acito.

## 4 LA VERIFICA STRUTTURALE IN CAMPO LINEARE: NUCLEI CENTRALI, NUCLEI LATERALI E FONDAZIONI

### 4.1 Verifica dei nuclei centrali o setti

La verifica di sicurezza di tutti gli elementi strutturali è stata eseguita allo S.L.U. (che risulta essere la condizione più critica per gli elementi strutturali studiati), considerando le azioni in campo lineare, amplificandoli con i coefficienti di sicurezza, andando poi a confrontare il momento e il taglio agenti così calcolati ed il momento ed il taglio resistenti nelle sezioni più sollecitate, avvalendosi dei modelli conosciuti che esprimono le non linearità meccaniche dei materiali tenendo conto dei coefficienti di sicurezza e dei fattori di confidenza. Questo tipo di approccio consente di sfruttare l'iperstaticità sezionale e quella strutturale in campo elastico, ma non considera il contributo dovuto alla capacità redistributiva dell'intera struttura, che si attiva in campo plastico.

Tra gli elementi portanti verticali, sono presenti due setti a farfalla, visibili anche in facciata, che rimangono pieni fino a quota + 3,65 m, svuotandosi poi progressivamente per creare un passaggio ad ogni piano; dunque ciascun setto risulta diviso in due porzioni, una anteriore e una posteriore.

I due nuclei centrali, inoltre, si rastremano, partendo da una larghezza di 2 m a quota - 7,55 m, fino ad arrivare allo spessore di 50 cm in sommità, a quota + 116,50 m.

Il calcolo delle azioni agenti è stato eseguito con l'utilizzo del software Midas Gen 2015, attraverso cui è stato costruito un modello tridimensionale dell'intero edificio con elementi bidimensionali e monodimensionali, a cui sono stati applicati i carichi verticali e orizzontali (vento) agenti sullo stesso.

Per svolgere le verifiche, viene selezionata una serie di sezioni a quote differenti e per ciascuna vengono confrontate le azioni agenti e le capacità resistenti: in particolare, trattandosi di sezioni pressoinflesse, per valutare il valore del momento resistente si è fatto uso dei consueti diagrammi di interazione M-N. Questi ultimi vengono calcolati per ciascuna sezione con il medesimo software.

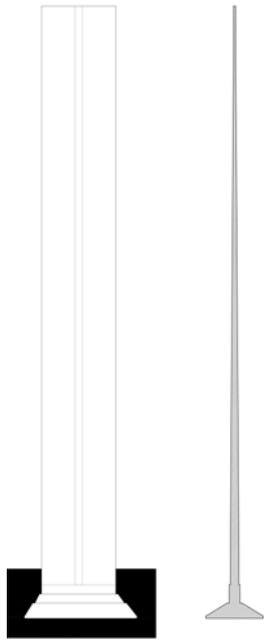


Figure 1. Central cores: front view and longitudinal section / Pilastrì centrali: vista frontale e sezione longitudinale

Per tutte le sezioni considerate, la verifica strutturale in campo elastico risulta soddisfatta.

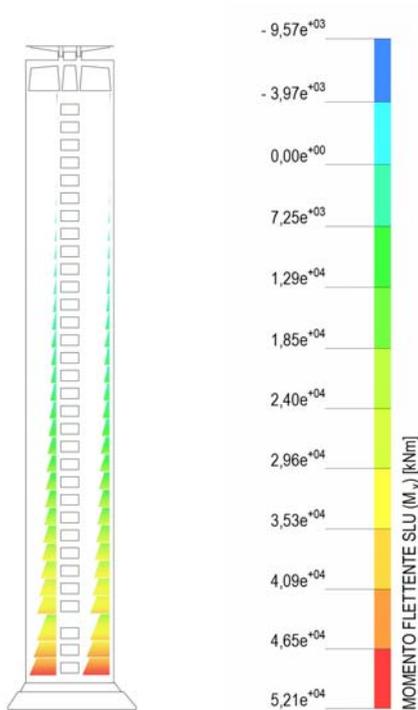


Figure 2. Diagrams of axial force (left) and bending moment (right) on central cores / Diagrammi delle sollecitazioni dovute all'azione assiale (sinistra) e al momento flettente (destra) sui nuclei centrali

#### 4.2 Verifica dei nuclei laterali o punte

Per i nuclei laterali si è utilizzato lo stesso procedimento usato per i setti centrali, e, anche per essi, tutte le verifiche strutturali allo S.L.U. risultano soddisfatte.

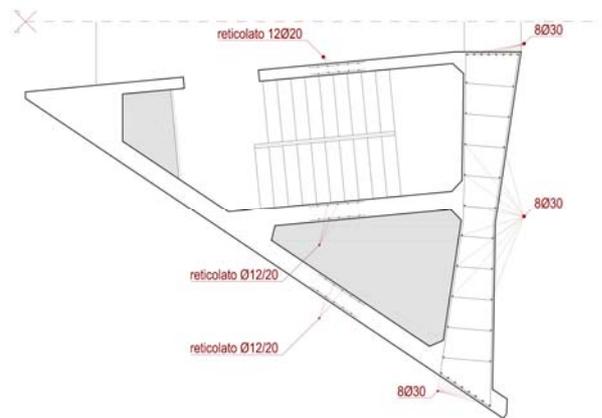


Figure 3. Section on lateral core (+ 19,60 m) / Sezione del nucleo laterale a quota +19,60 m

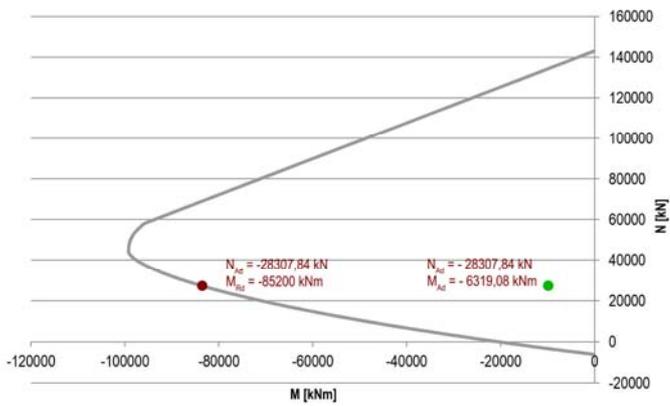


Figure 4. M-N interaction diagram (section +19,60 m) / Diagramma di interazione M-N per la sezione a quota +19,60 m

### 4.3 Verifica delle fondazioni

Il disegno delle fondazioni del grattacielo Pirelli è stato ricostruito grazie alle diverse tavole originali di progetto reperite nei vari archivi consultati.

Dai disegni emerge chiaramente che le fondazioni del grattacielo sono costituite da due piastre uguali per i nuclei laterali (o punte), una piastra centrale simmetrica per i nuclei centrali (o setti) e i blocchi ascensori e da diversi plinti isolati per i pilastri che sorreggono la piazza o collina antistante il grattacielo. Le fondazioni, inoltre, si trovano ad una quota di -11,20 m dal piano campagna. Le tavole originali reperite non riportano i particolari relativi ai dettagli costruttivi, pertanto la verifica condotta su questi elementi si limita al calcolo dei cedimenti.

La verifica delle fondazioni si concentra in particolare sulla piastra dei setti centrali e dei blocchi ascensori, che, essendo simmetrica, viene approssimata ad una forma a L.

Per semplificare ulteriormente le verifiche, si decide, infine, di considerare una forma rettangolare, che corrisponde alla porzione di piastra sottostante i nuclei centrali, e di tenere conto della presenza dei blocchi ascensori sommando i carichi assiali di questi ultimi a quelli provenienti dai setti e introducendo il relativo momento di trasporto.

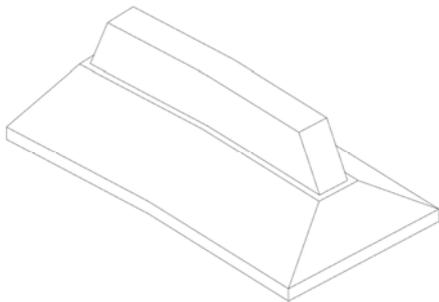


Figure 5. Simplified model of the foundation slab taken into account for the analysis / Semplificazione della geometria della piastra di fondazione usata per le verifiche

Per la fondazione in esame è stato calcolato il cedimento con l'ipotesi di suolo alla Winkler e piastra deformabile. Per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche del terreno su cui sorge il grattacielo, in mancanza di informazioni più dettagliate, si è fatto riferimento ai dati forniti dal PGT del Comune di Milano e dalla relazione geotecnica (*Consolidamento fondazionale per un edificio alto* di L. Mancinelli, M. Gatti e L. Bellardo) redatta per la realizzazione del consolidamento fondazionale del Palazzo Lombardia, che si trova a circa 500 m di distanza dal Grattacielo.

Dopo aver modellato la fondazione con il software Midas Gen, vengono applicati i carichi che gravano su di essa e il terreno viene schematizzato come un letto di molle elastiche con una determinata rigidità  $k$ , dipendente dal modulo elastico  $E$ . In accordo con i dati geotecnici di cui si dispone, il modulo elastico del terreno  $E$  può variare entro un intervallo di valori ( $120 \div 200$  MPa), dunque è possibile valutare i due casi di rigidità maggiore e minore delle molle, che comportano rispettivamente il cedimento minore e maggiore della fondazione. Nel caso di rigidità minore ( $E = 120$  MPa) i cedimenti calcolati vanno da un minimo di 21 mm a un massimo di 72,7 mm; mentre nel caso di rigidità maggiore ( $E = 200$  MPa), i cedimenti variano tra 11,7 mm e 41,7 mm.

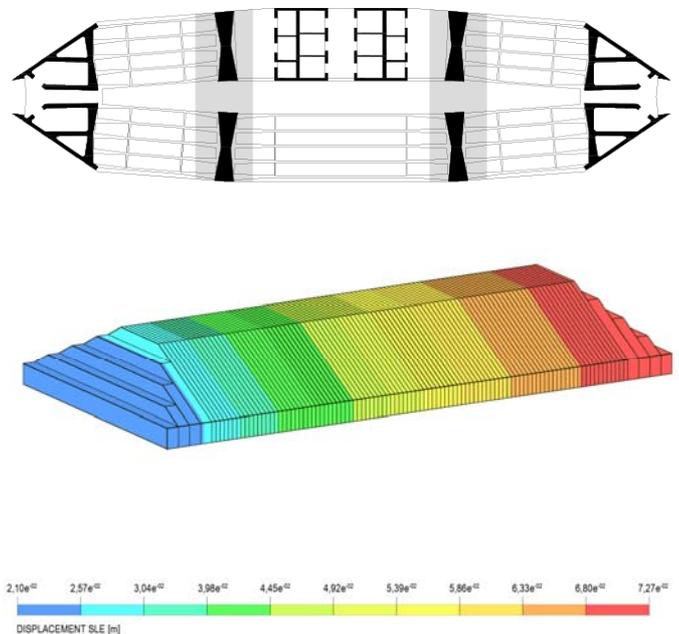


Figure 6. Displacement diagram of the foundation slab in the case of smaller stiffness / Andamento dei cedimenti della fondazione nel caso di rigidità minore

## 5 LA VERIFICA STRUTTURALE IN CAMPO LINEARE: SOLAIO CENTRALE E SOLAIO LATERALE

Il solaio a graticcio è un altro degli elementi strutturali oggetto di indagine e verifica. In particolare, vengono studiati:

- il solaio della campata centrale, costituito da cinque travi di luce pari a circa 24 m;
- il solaio della campata laterale, costituito da cinque travi di luce pari a circa 14 m.

Anche per i solai, è stata svolta, in primo luogo, una verifica strutturale in campo lineare.

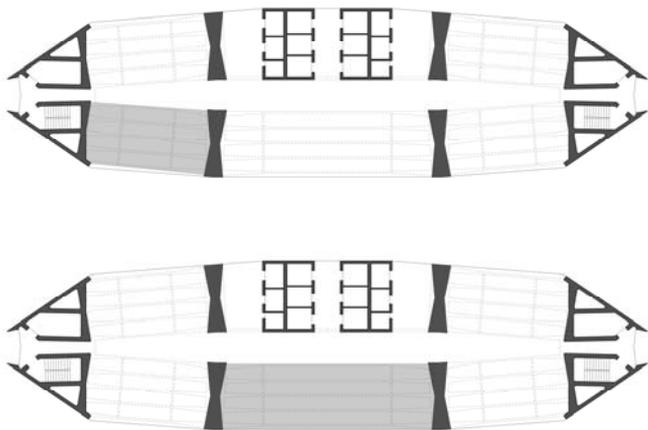


Figure 7. Central and lateral span / Campata centrale e campata laterale

Le travi presentano, nei tratti centrali, una larghezza dell'anima costante (20 cm) e, nei tratti laterali, verso gli incastri, una larghezza variabile da 20 cm fino a 80 cm all'incastro per le travi di bordo, e fino a 50 cm per le restanti.

Il sistema a graticcio così ottenuto favorisce una significativa redistribuzione dei carichi agenti, favorendo la risposta del solaio. Per lo studio del sistema, lo schema statico da considerare è di tipo incastro-incastro, a fronte del notevole spessore dei due setti anteriori su cui si innestano le travi e che costituiscono l'ossatura portante del grattacielo.

Al fine di tenere conto dell'effetto positivo del sistema a graticcio, il solaio è stato modellato con elementi beam, con i quali è possibile definire il momento sollecitante dovuto ai vari carichi agenti.

Una volta modellato il sistema e definite le proprietà meccaniche dei materiali, il software è in grado di calcolare il peso proprio della struttura, al quale deve essere sommato il peso proprio della soletta di 8 cm, come carico permanente strutturale, e i vari carichi permanenti non strutturali e variabili. Questi in particolare sono stati assegnati a ciascuna trave in funzione della propria area di influenza.

Una volta definiti i carichi e la relativa combinazione, il software è in grado di calcolare i valori delle azioni di taglio e momento agenti su ciascuna trave del sistema.

Noti i carichi agenti sul solaio a graticcio, è possibile procedere con le verifiche di sicurezza di taglio e momento in ciascuna. A seguito dell'analisi strutturale elastica, la verifica viene svolta in termini sezionali; per ciascuna trave si scelgono dunque le sezioni più sollecitate, delle quali sono stati calcolati i valori delle azioni resistenti, considerando anche la presenza delle barre di armatura, e, in seguito, vengono confrontati con le sollecitazioni agenti.

Oltre alle sezioni più sollecitate, che sono sicuramente quelle di incastro e quella in mezzzeria, vengono studiate anche alcune sezioni intermedie per tenere conto della variazione dell'armatura longitudinale lungo lo sviluppo della trave; in questo modo, è possibile costruire per punti i diagrammi delle azioni resistenti, tenendo conto in modo più accurato della geometria della trave.

Ciascuna sezione viene modellata con il software Response 2000, il quale consente di assegnare le proprietà geometriche della sezione, comprese le dimensioni e la posizione delle barre di armatura longitudinale, e le proprietà meccaniche dei materiali. La presenza della soletta di 8 cm dà un contributo positivo alla capacità resistente delle travi, in quanto consente di considerare una sezione a T. A tal fine, è necessario calcolare la larghezza dell'ala superiore della sezione, detta ala efficace  $b_{eff}$ .

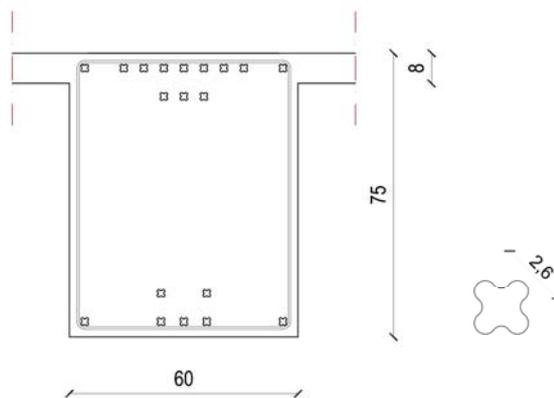


Figure 8. Transversal section of beam TC01 in the central span. Note: dimensions are in cm / Sezione trasversale della trave TC01 della campata centrale. Nota: le misure sono in cm

Per completare le verifiche di sicurezza del solaio a graticcio, vengono confrontati i valori di taglio e momento resistenti di ciascuna sezione considerata, con le azioni agenti. Dall'analisi emerge che la campata centrale, essendo costituita da travi con una luce considerevole (circa 24 m), non soddisfa le verifiche in tutte le sue sezioni, in quanto l'analisi svolta, di tipo elastico, non tiene conto della capacità redistributiva della struttura, che può essere colta solo mediante un'analisi non lineare della stessa.

In particolare, tutte le sezioni di incastro della campata centrale non soddisfano le verifiche di sicurezza in assenza di redistribuzione.

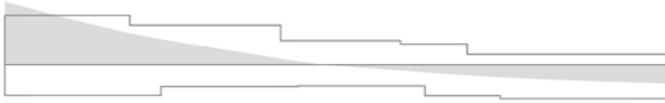


Figure 9. Comparison between effective (hatch) and resistant moment (line) on beam TC01 in the central span / Confronto dei diagrammi dei momenti agente (campitura) e resistente (linea) per la trave TC01 della campata centrale

Il solaio della campata laterale è stato analizzato e verificato con lo stesso procedimento illustrato per la campata centrale. In questo caso, tuttavia, tutte le sezioni delle travi soddisfano le verifiche di sicurezza.

## 6 LA VERIFICA STRUTTURALE IN CAMPO NON LINEARE: STUDIO DELLA CAPACITÀ REDISTRIBUTIVA DEL SOLAIO CENTRALE

Le verifiche in campo elastico, svolte su tutti i principali elementi strutturali del grattacielo Pirelli, trascurano l'incremento di capacità resistente dovuto alla capacità redistributiva strutturale, in quanto confrontano le azioni agenti e resistenti sulle singole sezioni, considerando solo l'eventuale capacità redistributiva a livello sezionale.

Se si operasse limitandosi a considerare il limite elastico, risulterebbe necessario un intervento di retrofitting strutturale. L'approccio utilizzato in questo caso, invece, secondo quanto proposto dal Model Code 2010, consente di svolgere un'analisi strutturale non lineare che tenga conto della capacità redistributiva della struttura.

Lo scopo di questa analisi è quello di valutare un coefficiente moltiplicativo del carico agente sul solaio al fine di determinare la sovra-resistenza che il graticcio della campata centrale può sfruttare, avvalendosi della redistribuzione.

L'analisi non lineare, facendo uso di software a elementi finiti, è un metodo molto efficiente di valutazione e descrizione del reale comportamento delle strutture e dei relativi materiali. Tuttavia, i risultati di tali analisi, sono fortemente influenzati dai modelli e dai fattori scelti in fase di impostazione delle stesse e dunque variano in relazione alle decisioni del progettista che le conduce. Per questo motivo, nel 2012, il professor Ane de Boer, in collaborazione con il Ministero delle Infrastrutture e dell'Ambiente olandese, ha definito una serie di linee guida, volte a ridurre l'influenza delle scelte del singolo progettista sui risultati delle analisi.

Per l'analisi non lineare del solaio centrale del grattacielo Pirelli, vengono seguite tali linee guida e, in particolare, viene svolta, con il software Midas Gen 2015, un'analisi statica non lineare, in controllo di spostamenti: si definisce lo spostamento ultimo che la struttura può raggiungere prima del collasso e si incrementa il carico per step fino al raggiungimento di tale spostamento.

Le linee guida forniscono prescrizioni in merito a:

- le dimensioni massime e minime di ciascun elemento beam. Nel caso in esame, ciascuna trave è stata suddivisa in 80 elementi della lunghezza di 15 cm ciascuno. Inoltre, la sezione di ciascun elemento beam viene discretizzata in fibre, che si assumono soggette a sola azione assiale;

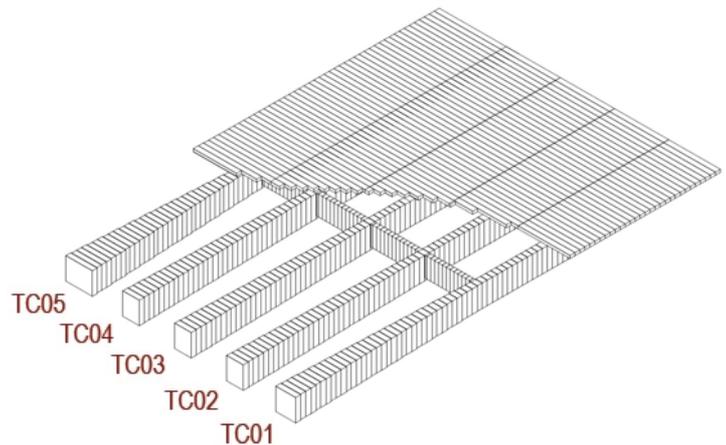


Figure 10. Finite element model of the central slab / Solaio della campata centrale discretizzato in elementi finiti

- i legami costituiti ammessi sia per l'acciaio sia per il calcestruzzo. In particolare, per il calcestruzzo viene considerato il modello di Kent&Park che consente di tenere conto del confinamento della sezione, mentre per l'acciaio viene utilizzato il modello di Park;

- il comportamento non lineare viene colto dall'assegnazione di cerniere plastiche agli elementi beam del graticcio. In questo caso, si sceglie la cerniera plastica distribuita, che può essere definita con una relazione sforzo-deformazione ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) per la componente assiale, e con un diagramma momento-curvatura ( $M$ - $\theta$ ) per quella flettente;

- il valore massimo degli incrementi di carico: nel caso in esame l'analisi viene svolta in controllo di spostamento, cioè viene imposto lo spostamento ultimo che la struttura può raggiungere prima del collasso e viene incrementato il carico per step, fino al raggiungimento di tale spostamento;

- i criteri di convergenza, in quanto in generale, l'equilibrio tra le forze interne e le forze esterne viene raggiunto ammettendo una soglia di errore e dunque si definisce un valore di tolleranza che determina il soddisfacimento della convergenza. Per l'analisi non lineare del solaio del grattacielo Pirelli, si è fatto uso di 50 step di incremento; ogni step può

essere suddiviso in substep e in questo caso vengono definiti 100000 substep per ogni step di carico; e, infine, per ogni substep, vengono svolte 20 interazioni, fino al raggiungimento di un valore di tolleranza pari 0,0001;

- i metodi di verifica allo SLU, con i relativi coefficienti di sicurezza. In questo caso è stato usato il metodo GRF, global resistance factor method, a cui è associato un coefficiente di sicurezza pari a  $\gamma_{GL} = 1,27$ .

Dall'analisi svolta risulta che il valore dei carichi variabili che il solaio a graticcio della campata centrale può portare è pari a 12,48 kN/m, che corrisponde ad un carico distribuito di 7,66 kN/m<sup>2</sup>. Questo valore deve essere poi ridotto dal coefficiente di sicurezza legato al metodo di verifica scelto, pari a  $\gamma_{GL} = 1,27$ , e dal coefficiente di sicurezza di combinazione associato ai carichi variabili, pari a  $\gamma_{Q1} = 1,5$ . Dunque il sovraccarico che la struttura può sopportare prima del collasso risulta pari a 4,02 kN/m<sup>2</sup>, mentre dall'analisi strutturale in campo elastico era emerso che la struttura non risultava verificata con un valore dei carichi variabili pari a 3,00 kN/m<sup>2</sup>.

Questo dimostra che il solaio, sfruttando il sistema a graticcio, può contare su una certa sovrarresistenza dovuta alla capacità redistributiva della struttura, consentendo di soddisfare la sicurezza richiesta dalla verifica agli S.L.U.

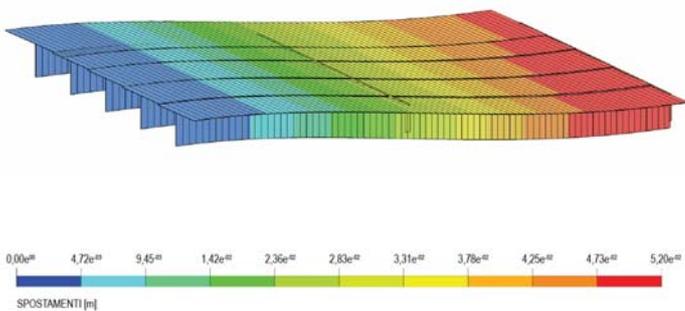


Figure 11. Qualitative deformed shape and displacement diagram of the slab at the end of the analysis / Deformata qualitativa del graticcio al termine dell'analisi e andamento degli spostamenti

## 7 ROBUSTEZZA STRUTTURALE

### 7.1 Introduzione sul tema della robustezza

In seguito ai tragici eventi dell'11 settembre 2001, il tema della robustezza strutturale è diventato di primaria importanza, soprattutto in relazione agli edifici alti.

Per robustezza strutturale si intende la capacità della struttura di resistere a carichi eccezionali (quali quelli dovuti a esplosioni, urti, incendi, etc.) e di subire danni proporzionati alla causa che li ha provocati, evitandone il crollo. Se, infatti, un evento inat-

teso danneggia la struttura, non si deve assistere al collasso della stessa, ma solo al crollo dell'elemento colpito ed eventualmente di alcuni elementi ad esso adiacenti.

La valutazione della robustezza può essere svolta per mezzo di un'analisi globale che tenga conto della risposta dell'intero organismo strutturale. Il procedimento teorico per la stima della robustezza si articola secondo i seguenti passaggi:

- individuazione di una distribuzione di carichi sulla struttura integra;

- svolgimento di un'analisi non lineare per valutare la resistenza ultima della struttura in base al valore del moltiplicatore di carico per il quale si raggiunge il collasso;

- incremento del livello di danno di un'unità;

- rimozione dell'elemento che ha raggiunto il collasso e svolgimento di una nuova analisi non lineare.

L'analisi termina quando si raggiunge il livello di danno massimo considerato, fornendo un valore di resistenza per ciascun livello di danno.

### 7.2 Grattacielo Pirelli – 18 aprile 2002

Il 18 aprile 2002 un velivolo leggero del tipo Rockwell Commander 112TC colpisce il grattacielo Pirelli.

L'impatto avviene tra gli impalcati dei piani 26 e 27, sulla mezzeria della facciata esposta a sud - est (prospiciente piazza Duca d'Aosta). In seguito all'urto e all'esplosione dei due serbatoi, il motore si separa dalla fusoliera, trapassando l'edificio e fuoriuscendo dalla facciata opposta, su via Fabio Filzi.

Considerando il comportamento della struttura in seguito all'impatto, la campata centrale dell'impalcato del piano 26, soggetta a un carico impulsivo verso il basso e ad un ulteriore carico dovuto all'accumulo d'acqua dell'impianto antincendio, risulta fortemente inflessa verso il basso, con frecce comprese tra 25 cm per la trave più interna e 14 cm per quella più esterna. L'impalcato del piano 27, invece, in seguito al carico impulsivo si inflette verso l'alto con spostamenti non superiori ai 5 cm.

L'osservazione dello stato fessurativo degli impalcati conferma i meccanismi sopra descritti.

In quest'ottica, a partire dal caso concreto, sono state svolte alcune analisi al fine di valutare la robustezza strutturale del grattacielo Pirelli.

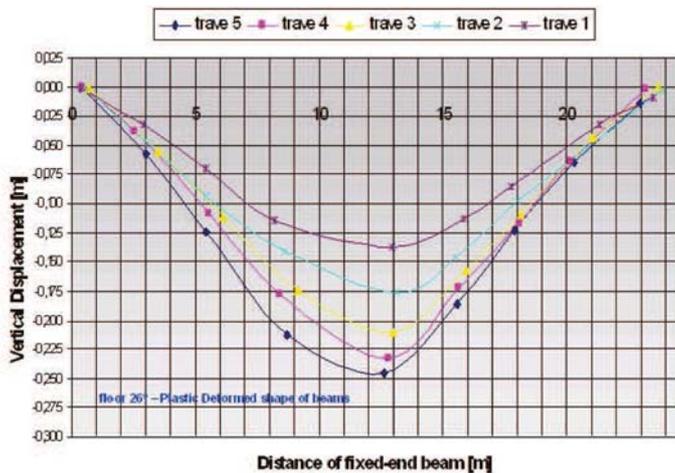


Figure 12. Displacement of the beams of slab at 26<sup>th</sup> floor after the plane crash / Misura della deformazione delle travi dell'impalcato 26 dopo l'impatto (Crippa M.A., Il restauro del grattacielo Pirelli, Skira, Milano 2007)

### 7.3 La robustezza del grattacielo Pirelli: simulazioni di impatto aereo

#### 7.3.1 Introduzione all'analisi e definizione del modello

La robustezza del solaio del grattacielo Pirelli è stata valutata con un'analisi non lineare statica prendendo in considerazione un carico orizzontale agente sulla campata della trave di bordo, che simula l'impatto di un velivolo in corrispondenza del traverso centrale del solaio a graticcio.

Per prima cosa è stato necessario costruire, con l'ausilio del software Midas Gen, l'intero modello del graticcio e modellare i nuclei centrali e i setti ascensori, la cui inerzia molto elevata dà un contributo positivo al comportamento del graticcio, nel caso di carico orizzontale. È stata considerata, inoltre, la sezione effettiva rastremata delle travi (di forma rettangolare) ed è stata modellata la soletta superiore come elemento plate dello spessore di 8 cm.

Per quanto riguarda l'elemento piastra, sono stati considerati due diversi livelli di approfondimento che rappresentano approssimazioni del funzionamento reale e forniscono un quadro semplificato del comportamento effettivo del solaio:

- PIASTRA 01: piastra caratterizzata da un modulo elastico  $E = 30 \text{ GPa}$ , in grado di trasferire sia taglio sia momento;

- PIASTRA 02: piastra con modulo elastico ridotto che tiene conto dell'eventuale parzializzazione della sezione della piastra e in grado di trasferire sia taglio sia momento.

In seguito all'osservazione del panorama fessurativo dopo l'incidente del 2002, sono state altresì introdotte cerniere sui bordi della piastra al fine di eliminare la continuità flessionale con il graticcio di travi.

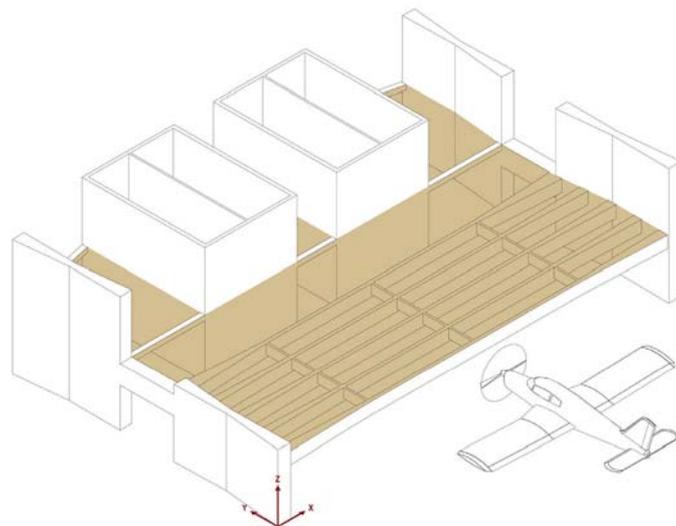


Figure 13. Model for the impact simulation in Midas Gen / Modello usato per la simulazione di impatto aereo con Midas Gen

#### 7.3.2 Analisi dei carichi

Per le simulazioni sono stati presi in considerazione alcuni comuni aerei da turismo, che più verosimilmente, in termini dimensionali, potrebbero sorvolare a bassa quota la zona centrale della città di Milano:

- Rockwell Commander 112TC;
- PIPER M350;
- PIPER M600.

Table 3. Technical features of the planes / Caratteristiche tecniche dei velivoli

	Rockwell Commander 112 TC	PIPER M350	PIPER M600
Lunghezza [m]	7,57	13,1	13,2
Larghezza [m]	1,5	1,5	1,5
Massa [kg]	1200	1969	2744
Velocità massima [km/h]	290	365	400
Velocità impatto [km/h]	220	365	400

La forza di impatto è stata stimata ipotizzando che la fusoliera si schianti contro un corpo perfettamente rigido e che si accartocci totalmente in un certo intervallo di tempo  $\Delta t$ . Tale intervallo di tempo, in particolare, è stato calcolato valutando il rapporto tra la lunghezza della fusoliera e la velocità al momento dell'impatto. Dividendo la quantità di moto per il tempo  $\Delta t$  si ottiene, quindi, il carico di impatto:

$$F = \frac{mv}{\Delta t}$$

Per ottenere un carico lineare da applicare sull'asse della trave TC01, il valore così ottenuto deve essere diviso per la larghezza della fusoliera.

Table 4. Summary of the loads / Riepilogo dei carichi

	Rockwell Commander 112 TC	PIPER M350	PIPER M600
Carico [kN]	611	1535	2540
Carico lineare [kN/m]	407	1023	1693
Step di carico [kN/m]	13,57	34,10	56,43

### 7.3.3 Risultati delle analisi

Si riportano solo i risultati delle analisi relativi al velivolo PIPER M600 e alla PIASTRA 02, dal momento che si tratta del caso in cui la struttura del soletto è maggiormente sollecitata.

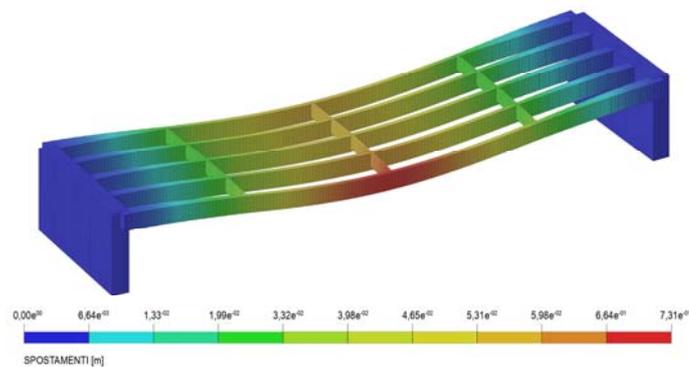


Figure 14. Qualitative deformed shape and displacements of the slab at the end of the analysis / Deformata qualitativa del graticcio al termine dell'analisi e andamento degli spostamenti

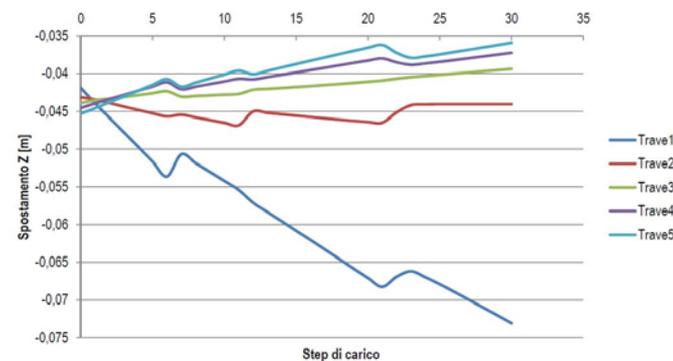


Figure 15. Displacement diagram in Z direction at the middle section of the beams at each analysis step / Grafico di spostamento delle travi in direzione Z ad ogni istante di tempo dell'analisi nella sezione di mezzeria

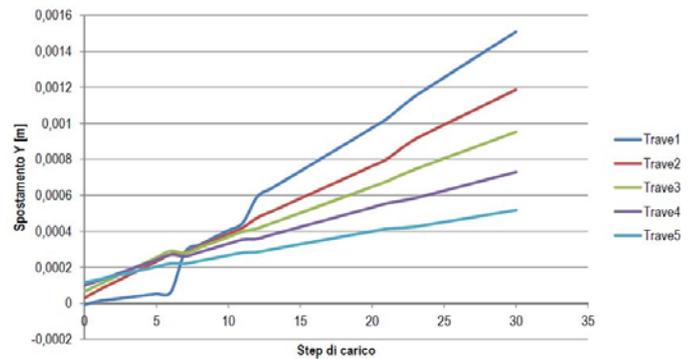


Figure 16. Displacement diagram in Y direction at the middle section of the beams at each analysis step / Grafico di spostamento delle travi in direzione Y ad ogni istante di tempo dell'analisi nella sezione di mezzeria

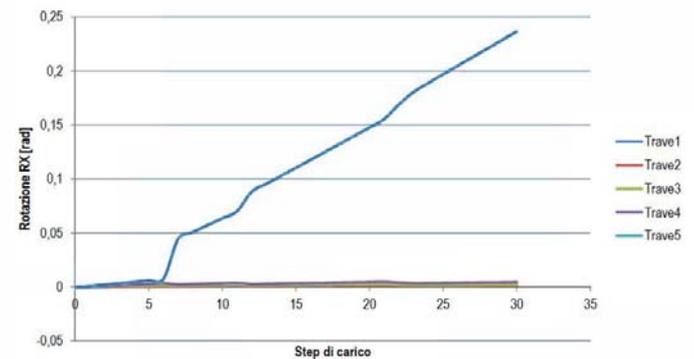


Figure 17. Rotation in X direction at the middle section of the beams at each analysis step / Grafico di rotazione delle travi intorno a X ad ogni istante di tempo dell'analisi nella sezione di mezzeria

Dalle analisi emerge in primo luogo che la trave soggetta a maggiore deformazione è quella direttamente colpita dal velivolo, come facilmente intuibile.

Si può constatare altresì che gli spostamenti in direzione Y sono ridotti per la presenza dei nuclei ascensori, che vengono sollecitati per l'effetto diaframma della soletta.

Si rileva che, all'aumentare dell'abbassamento della trave di bordo, le restanti travi tendono ad alzarsi grazie alla presenza dei traversi, a testimonianza del fatto che il sistema a graticcio funziona correttamente nella redistribuzione delle sollecitazioni.

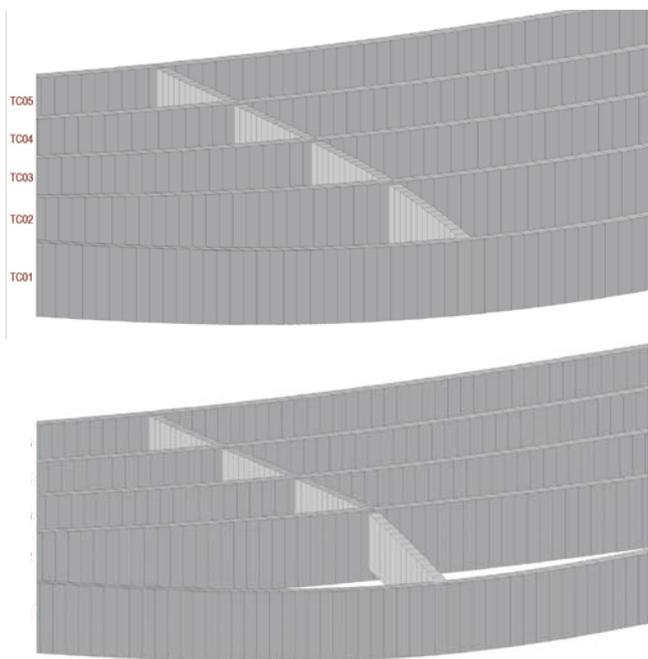


Figure 18-19. Deformed shape at the impact point before and after the formation of plastic hinges in the transverse beam / Deformate nel punto di impatto del travaso prima e dopo la plasticizzazione del travaso

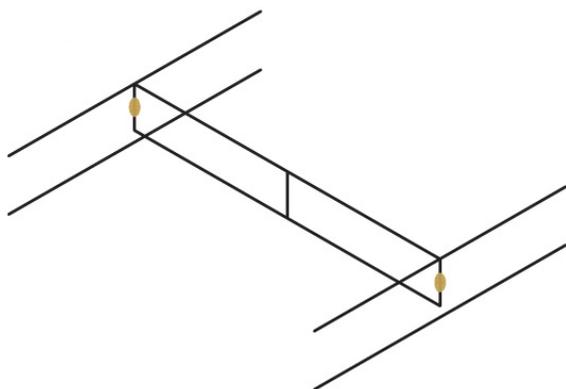


Figure 20. Plastic hinges in the transverse beam / Individuazione delle cerniere plastiche nel travaso

Infine nei grafici si possono osservare delle discontinuità nell'andamento in corrispondenza di determinati step di carico:

- plasticizzazione dell'estremità del travaso in corrispondenza del nodo con la trave TC01;
- plasticizzazione dell'altra estremità del travaso in corrispondenza del nodo con la trave TC02.

Dalle analisi emerge che l'elemento solaio non raggiunge il collasso in quanto non si osservano brusche interruzioni dei diagrammi. Va osservato che nel calcolo semplificato, non si è tenuto in conto in alcun modo della dinamica dell'incidente.

## 8 CONCLUSIONI

L'analisi e la verifica delle strutture del grattacielo offrono la possibilità di fotografare lo stato attuale dell'edificio, ormai giunto al termine della sua vita

utile, e di metterlo a confronto con la normativa attualmente in vigore.

La valutazione della capacità redistributiva oltre l'elasticità conferma un corretto comportamento delle strutture, compreso il solaio se si considera la sua capacità redistributiva in campo non lineare. A questo proposito, lo studio della robustezza strutturale, svolto attraverso le simulazioni di impatto con diversi tipi di velivolo, con un approccio a carichi equivalenti, mostra un buon funzionamento dell'edificio a fronte di eventi inattesi e conseguenti sollecitazioni eccezionali. I risultati ottenuti mettono in evidenza la necessità della valutazione del comportamento delle strutture in campo non lineare, come metodo di verifica e di progettazione, al fine di comprendere e di sfruttare appieno le reali potenzialità degli elementi strutturali in opera dimostrando come in tali casi sia opportuno spendere risorse e tempo nel processo di conoscenza, monitoraggio e analisi come alternativa all'intervento diretto sulle strutture. L'esperienza vissuta in questo lavoro di ricerca fa emergere la necessità di provvedere al più presto alla creazione di un archivio storico dove raccogliere con cura tutte le informazioni relative alla costruzione di strutture simbolo dell'archeologia del calcestruzzo armato, al fine di provvedere con studi finalizzati al loro mantenimento con la minima spesa, estendendo per quanto possibile la loro vita utile.

## REFERENCES

- Acito, M. 2013. *Livelli di conoscenza e fattori di confidenza nella verifica di vulnerabilità sismica. Indagini sperimentali come strumento di verifica sismica*. Seminario CIAS, Verona, 27 June 2013.
- De Boer, A. *Re-examination of RC and PRC structure by a guided nonlinear analysis*. Congresso CTE, Milano, 6-7-8 November 2014
- Cevini, P. 1996. *Grattacielo Pirelli*. Roma: Nuova Italia Scientifica.
- Crippa, M.A. 2007. *Il restauro del grattacielo Pirelli*. Milano: Skira.
- Nervi, P.L. 1965. *Costruire correttamente*. Milano: Hoepli.
- Nervi, E. M., Chiorino, C., Romeo, F., Salvatore, M., Baglioni, L., & Fallavollita, F. 2011. *Le geometrie strutturali di Pier Luigi Nervi: letture attraverso modelli*. L'industria del costruito, 417: 79-90
- Oberti, G. 1958. *Verbale di collaudo delle opere in conglomerato cementizio armato del Grattacielo Pirelli di Piazza Duca d'Aosta in Milano*. Milano.
- Toniolo, G.M. & di Prisco M. 2010. *Cemento armato. Calcolo agli stati limite*. Bologna: Zanichelli.
- Agenzia Nazionale per la Sicurezza del Volo. 2002. *Relazione d'inchiesta sull'incidente occorso all'aeromobile Rockwell Commander 112TC, MARCHE HB-NCX, Località Milano - Palazzo della Regione ("Grattacielo Pirelli"), 18 aprile 2002*.
- RTD 1016:2012, *Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures*.
- Software: *Midas Gen 2015*. MIDAS Information Technology Co.,Ltd.