

1 Introduzione

Il 18 aprile 2002 un Rockwell Aero Commander 112TC da turismo si è schiantato contro il 26° piano del grattacielo Pirelli, nel centro di Milano, provocando la morte di due persone, oltre a quella del pilota. Tale incidente, sebbene non confrontabile in termini di cause e di conseguenze con l'attentato terroristico delle Torri del World Trade Center (WTC) di New York dell'11 settembre 2001, ha rimarcato l'importanza di studiare l'impatto di velivoli, come una delle possibili condizioni di carico, nel progetto degli edifici più alti.

Il progetto per la costruzione di edifici è subordinato a una normativa [1-2], valida a livello internazionale, che specifica i minimi carichi esterni, a cui l'edificio deve resistere. Tali norme prevedono anche che siano soddisfatti dei requisiti di sicurezza interna all'edificio, quali la protezione dagli incendi e la presenza di un numero opportuno di uscite di sicurezza.

I principali carichi esterni specificati in tali norme [1] sono quelli dovuti alla forza di gravità, vale a dire il peso dell'edificio, quelli dovuti alla forza del vento e infine quelli dovuti a un eventuale terremoto.

I carichi di gravità includono il peso dell'edificio e del suo contenuto. Il peso di un edificio è calcolato in base ai disegni progettuali e alla densità dei materiali, mentre il peso del contenuto dipende dall'uso che il proprietario decide di farne. Le norme specificano il carico minimo per unità di superficie del pavimento ed è quindi responsabilità del proprietario che tali carichi non vengano superati.

La determinazione dei carichi, dovuti alla forza del vento e specificati nelle norme, si basano invece sulle mappe della velocità eolica, che descrivono l'intensità e la direzione dei venti nelle differenti regioni. La pressione, che il vento esercita sull'edificio, varia con il quadrato della sua velocità e dipende inoltre dall'altezza e dal grado di schermatura degli edifici circostanti. C'è da rimarcare che, per la determinazione dei carichi eolici nel caso delle Torri del WTC, si è ricorso, per la prima volta, a studi in galleria del vento.

Anche i carichi dovuti ai terremoti dipendono dalla geografia del territorio e vengono determinati con l'ausilio di specifiche mappe. Nel caso di grattacieli, però, l'elevata altezza permette alla struttura di seguire i movimenti del terreno, durante le scosse di terremoto, senza sviluppare forze elevate, come quelle causate dal vento.

Per quanto riguarda la normativa sugli incendi, essa stabilisce tanto l'esistenza di dispositivi che ne limitino l'insorgere, quanto naturalmente la presenza di allarmi anti-incendio e di uscite di sicurezza. Nel caso di grattacieli, essa prevede inoltre che la struttura mantenga la propria integrità, provvedendo a un'adeguata resistenza al fuoco e allestendo al proprio interno sistemi, che controllino l'intensità dell'incendio.

Le normative anti-incendio [1], vigenti negli Anni '60, all'epoca della costruzione delle Torri del WTC e del grattacielo Pirelli, valutavano la resistenza al fuoco con una stima temporale che, erroneamente, veniva letta come l'intervallo di tempo, in cui un componente della struttura dell'edificio (muro, colonna, pavimento, ecc.) resisteva al collasso, quando esposto ad un incendio. Ma tale stima era ottenuta sperimentalmente: con il metodo standard di valutazione della resistenza al fuoco ASTM E119, i provini venivano esposti a condizioni controllate di incendio, che non permettavano quindi di dedurre l'effettivo comportamento. I risultati così ottenuti inoltre non consideravano le reali condizioni della struttura, quali le interazioni tra i vari componenti strutturali e l'esistenza di un possibile danno, prima dell'inizio dell'incendio.

Ora tali normative sono state aggiornate. Gli studi sulla resistenza al fuoco non considerano più soltanto la variazione della temperatura con il tempo, ma anche altre condizioni, quali la ventilazione, la geometria della struttura, le proprietà termiche dei materiali e le caratteristiche di combustione del combustibile. La prova di valutazione standard ASTM E119 è ancora valida, ma ormai ha una valenza puramente comparativa, vale a dire che è usato per confrontare il comportamento di costruzioni differenti, esposte al fuoco.

Gli studi, condotti sugli incendi, hanno poi evidenziato due differenti tipi di incendio, che occorrono agli edifici o a parti di essi. Il primo è il fuoco a "superficie di combustibile controllata", cioè quello che si sviluppa in compartimenti aperti e sufficientemente larghi da provvedere ad un'adeguata combustione dell'aria, mentre l'altro è il fuoco "a ventilazione controllata", vale a dire quello che si sviluppa in compartimenti

aperti, ma non sufficientemente larghi da permettere una combustione ampia e senza limitazioni. La prima tipologia è generalmente di breve durata e la sua intensità viene facilmente controllata dai dispositivi anti-incendio automatici, mentre la seconda ha una durata media maggiore. Negli spazi ampi spesso succede che le due tipologie di fuoco si alternino o addirittura coesistano, in zone diverse.

Per nessun edificio civile è prevista l'inclusione di carichi eccezionali, quali quelli dovuti a possibili atti terroristici e di guerra oppure a incidenti casuali, quali quello occorso al grattacielo Pirelli. Tale possibilità finora era stata inclusa solamente nel caso di edifici che richiedessero un alto livello di sicurezza, come le ambasciate, le strutture di difesa militare o le centrali nucleari.

Le Torri del WTC [1] sono state le prime strutture civili, nel cui progetto venne considerato l'impatto di un velivolo. Nelle analisi progettuali per le Torri del WTC, fatte negli Anni '60, si suppose che un Boeing 707, perso nella nebbia, cercasse di atterrare al vicino aeroporto e potesse invece colpire una delle Torri, sulla base di quanto accadde il 28 luglio 1945, quando un bombardiere B-25 Mitchell colpì l'Empire State Building. D'altronde i Boeing 767-200ER, che l'11 settembre 2001 colpirono entrambe le Torri, erano considerevolmente più grandi, con masse maggiori e velocità più alte del Boeing 707, considerato in fase di progetto. Infatti allora si considerò un Boeing 707 con una massa di 120 t, una velocità, in avvicinamento all'aeroporto, di 290 km/h e i serbatoi quasi vuoti, mentre i Boeing 767-200ER dell'attacco terroristico avevano una massa di 125 t, una velocità di impatto tra i 756 e i 950 km/h e circa 38000 l di carburante nei serbatoi.

La decisione di includere l'impatto di un velivolo, nei parametri di progetto di un edificio, chiaramente porterebbe ad una maggiore variabilità del progetto, che richiederebbe un costo di realizzazione molto elevato. Infatti questa soluzione esigerebbe l'analisi dell'intera gamma di velivoli esistenti, con variabili condizioni di volo, vale a dire diversificando la velocità del velivolo, la sua massa, la massa del combustibile, oltre all'angolo e all'altezza dell'impatto.

Le possibilità di un edificio di resistere all'impatto di un velivolo diminuiscono all'aumentare delle dimensioni e della velocità dell'aeromobile. Nel 2006, per esempio, dovrebbe essere varato l'Airbus A380, che avrà una massa e una capacità, in termini di combustibile, che sono approssimativamente tre volte quelle del Boeing 767-200ER. E'

quindi difficile riuscire a progettare un edificio che possa resistere all'impatto degli aeroplani più grandi, esistenti adesso o che verranno costruiti in futuro.

In linea di massima, quindi, non è necessario includere tra le condizioni di carico minime, richieste nel progetto di un edificio, anche l'impatto di un "generico" velivolo. Le situazioni, in cui è preferibile valutare la possibilità di un edificio di resistere all'impatto di un velivolo, sono molto limitate e in tali casi è sufficiente considerare un "dato" velivolo con dimensioni, velocità di crociera, nonché angolo e altezza d'impatto prefissati.

Proprio in base alla larga variabilità della dimensioni degli aeromobili, non è infatti tecnicamente possibile sviluppare una previsione di progetto, che permetta di realizzare edifici in grado di resistere, senza crollare, all'impatto di velivoli in rapido avvicinamento.

Tutti gli edifici potrebbero crollare, se soggetti ad un carico sufficientemente intenso, quale l'impatto di un velivolo; ma, durante gli studi fatti sulla dinamica del collasso delle Torri del WTC, è stato evidenziato anche quanto sia importante occuparsi della sicurezza dell'edificio e della sua evacuazione, in caso d'incidente. Infatti le Torri del WTC crollarono non a causa dei danni strutturali causati dall'impatto dei Boeing 767-200ER, ma a causa della contemporaneità di tali danni strutturali, con incendi molti intensi, che hanno ulteriormente lesionato le strutture; ciò è provato dal grande lasso di tempo intercorso tra l'impatto e il crollo.

Si prevede quindi che gli sviluppi futuri in tale ambito saranno indirizzati, più che ad irrobustire la struttura degli edifici per evitarne il collasso, a mantenerne l'integrità, provvedendo ad un'adeguata resistenza strutturale, in grado di ritardarne il crollo e di permetterne l'evacuazione da parte degli occupanti [1].

Sia nell'incidente al grattacielo Pirelli, sia in quello alla Torri del WTC, si è sviluppato un incendio.

Nel primo caso [3], per la combustione del carburante, rimasto nel serbatoio dell'aereo, si è sviluppato un incendio di piccole dimensioni al 26° piano. Il sistema anti-incendio automatico (*sprinkler*) ne ha facilitato lo spegnimento, mentre la posizione delle scale di sicurezza, poste all'interno delle strutture portanti alle estremità dell'edificio e quindi lontano dal punto di impatto, ha permesso la completa e veloce evacuazione dell'edificio.

Nel caso delle Torri del WTC invece, gli incendi furono molto più intensi a causa della maggiore quantità di combustibile presente sugli aerei, che, inoltre, tramite lo scorrimento nelle trombe degli ascensori e delle scale, ha raggiunto più piani e ha scatenato numerosi incendi contemporaneamente [1]. La struttura portante, in acciaio e posta nel nucleo dei due grattacieli, ha così subito pesantemente l'azione del fuoco: infatti, già danneggiata dall'impatto, non ha resistito alla forza dell'incendio, che ha notevolmente diminuito la sua resistenza a qualsiasi eventuale altro carico aggiuntivo. Infatti prima è collassata la Torre Sud, quella maggiormente colpita dal punto di vista strutturale, in seguito c'è stato il crollo della Torre Nord, accelerato dallo spostamento d'aria e dalla scossa tellurica, provocati dal crollo della Torre Sud.

Dal punto di vista dell'ingegneria aeronautica, la letteratura presenta numerosi studi d'impatto e di *crashworthiness*. Infatti i moderni strumenti d'analisi e di simulazione hanno permesso di studiare problemi d'impatto anche complessi (quali l'impatto di proiettili volanti [4]), oppure i tipici problemi del campo aeronautico (quali l'impatto al suolo di aeroplani ed elicotteri e l'impatto di volatili contro le gondole del motore [5]) e del campo automobilistico (quali l'impatto di un'automobile contro un ostacolo deformabile). Nonostante ciò, rimane difficoltoso adottare direttamente questi strumenti per affrontare il problema dell'impatto di un velivolo contro un edificio [6-7]. Ciò è dovuto a diversi fattori, quali la complessità dell'evento, la difficoltà di reperire conoscenze aggiornate sull'impatto ad alte velocità di corpi deformabili, la rottura e la frammentazione di materiali metallici e compositi, la simulazione degli eventuali effetti del fuoco e infine l'efficienza computazionale per affrontare un problema di simulazione su larga scala [8].

Il presente studio si prefigge quindi lo scopo di valutare, in via preliminare, i processi di danno strutturale che può causare l'impatto di un velivolo contro un'installazione civile. Nel caso particolare, è stato analizzato l'incidente occorso al grattacielo Pirelli di Milano, il 18 aprile 2002. L'approccio adottato si basa sull'uso di un modello analitico semplificato per valutare, dal punto di vista energetico, i danni occorsi alle singole componenti strutturali del velivolo e del grattacielo, durante l'incidente.

L'approccio energetico utilizzato prende spunto da quello proposto da Wierzbicki et al. [9] per studiare il danno subito dalle Torri del WTC durante l'11 settembre 2001,

nonostante il grattacielo Pirelli abbia una struttura differente, sia per quanto riguarda la geometria che per quanto riguarda i materiali.

Successivamente verrà eseguita una verifica dei risultati, così ottenuti, tramite un'analisi numerica, eseguita con il codice ad elementi finiti LS-DYNA[®], dell'impatto della fusoliera e dell'ala, contro la soletta del pavimento in calcestruzzo armato e la struttura esterna della facciata.

2 Impatto di un velivolo contro un grattacielo

Il 18 aprile 2002 un piccolo aereo da turismo si è schiantato contro il grattacielo Pirelli, provocando danni strutturali tra il 26° e il 27° piano (Fig. 2-1). Il piccolo aereo da turismo, un Rockwell Commander 112TC, era partito da Locarno diretto all'aeroporto Linate di Milano, ma, dopo un volo di circa 110 km e una deviazione verso il centro della città, è andato ad impattare contro il Palazzo della Regione Lombardia.



Fig. 2-1 Il grattacielo Pirelli il 18 aprile 2002

2.1 Il grattacielo Pirelli

Il grattacielo Pirelli [10] è stato costruito tra il 1955 ed il 1959 su progetto dell'architetto Gio Ponti e con la consulenza degli ingegneri Pierluigi Nervi e Arturo Danusso per le strutture in calcestruzzo armato; nato come avveniristica sede direzionale della Pirelli (Fig. 2-2), oggi è la sede principale degli uffici della Giunta Regionale di Lombardia.



Fig. 2-2 Il grattacielo Pirelli negli Anni '60

L'edificio è alto 127 m , suddivisi in trentuno piani fuori terra e due sotterranei, ed è uno degli edifici di cemento armato più alti del mondo. All'epoca della costruzione fu il primo grattacielo al mondo ad usare una struttura portante con lunghe campate ($24,7\text{ m}$). E' caratterizzato da una forma a lastra con estremità ristrette (Fig. 2-3 e Fig. 2-4), che si rastremano diventando punte tagliate ai vertici.

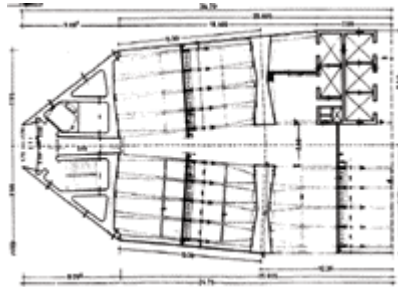


Fig. 2-3 Pianta a quota 12,90 m



Fig. 2-4 Veduta aerea del grattacielo Pirelli

I più gravi problemi dal punto di vista statico, che furono risolti in fase di progettazione, grazie all'intervento degli ingegneri Nervi e Danusso, furono quelli dell'azione del vento, agente sulle ampie facciate, e delle vibrazioni trasmesse alla struttura in calcestruzzo armato da agenti esterni, problemi che caratterizzano tutti gli edifici più alti. Gli ingegneri decisero di affidare la totalità dei carichi agenti alla struttura portante, suddivisa in quattro pilastri triangolari, posti all'estremità dell'edificio, e in quattro piloni rastremati, che tagliano perpendicolarmente le facciate.

Mentre per quanto riguarda la parte esterna, fu creata una facciata continua [11], vale a dire una struttura piana prefabbricata, che corre verticalmente attorno all'edificio e sostenuta alle solette. Tale struttura (Fig. 2-5) è costituita da una maglia di montanti verticali e di traverse orizzontali in lega leggera di alluminio, senza controtelai, e atta a sostenere infissi apribili in vetro e pannelli trasparenti e opachi. I montanti e le traverse sono vincolati tra loro da un sistema di giunti, che permette l'assorbimento di eventuali cedimenti elastici, dovuti a vibrazioni o a carichi. In previsione di punte di carico eccezionalmente elevate, la struttura della facciata è stata progettata in modo tale che fossero raggiunti prima i limiti di rottura dei vetri e poi quelli della lega leggera, che costituisce i montanti, in modo da assicurare comunque la stabilità dell'edificio.



Fig. 2-5 Particolare della facciata

Questo sistema, che si è sviluppato negli USA. sin dagli Anni '50, è denominato facciata continua, o *curtain wall* [12]. Tale tecnica permise la risoluzione di numerosi problemi, soprattutto di natura statica, che caratterizzavano le facciate in acciaio e vetro, utilizzate precedentemente. La serie di vincoli tra montanti e traverse ha permesso di controllare i movimenti causati dalle escursioni termiche, dal caricamento dei solai e dagli agenti esterni (vento, terremoti, ecc.). Inoltre la costruzione in fabbrica dei pannelli finiti e la loro messa in struttura prefabbricata ha risolto il problema, sia economico che operativo, del montaggio in loco.

La facciata è costituita da pannelli larghi $4,055\text{ m}$ e alti $3,7\text{ m}$. Ciascun pannello è diviso dai montanti e dalle traverse in nove aree, di cui la più grande ($1,9\text{ m} \times 1,7\text{ m}$) è centrale e apribile. Ciascuna trave è vincolata ai due estremi in modo tale da assorbire i notevoli movimenti relativi tra i campi della facciata, dovuti a possibili dilatazioni termiche e alle vibrazioni trasmesse dalla struttura in calcestruzzo armato e provocate da agenti esterni, quali tram, treni, aerei, ecc., e favorite dalla notevole lunghezza (20 m) delle travi.

Le travi sono vincolate tra loro nel seguente modo: nel montante all'estremo inferiore è situata una cerniera, mentre all'estremo superiore è posto un giunto scorrevole a cannocchiale, inserito nell'anima del montante contiguo sovrapposto; invece le traverse sono incastrate tra loro.

2 Impatto di un velivolo contro un grattacielo

Le travi della facciata hanno sezioni e dimensioni differenti, a seconda che siano montanti o traverse e, nel caso delle traverse, esse variano in base alla loro posizione sul pannello della facciata (inferiore, intermedia o superiore) (Tab. 2-1).

	lunghezza l [m]	larghezza b [mm]	altezza h [mm]	spessore s [mm]
Montante	3,700	105	85	5
traversa superiore	4,055	100	110	5
traversa intermedia	4,055	80	80	5
traversa inferiore	4,055	165	125	5

Tab. 2-1 Dimensioni della facciata

La soletta dei pavimenti invece è costituita da travi a T in calcestruzzo armato, lunghe 24,7 m, affiancate tra loro, in modo da coprire tutta la larghezza dell'edificio, e con laterizi forati, disposti in fila tra le nervature del solaio (Fig. 2-6). Lo scopo di una tale soluzione è di diminuire il peso proprio del pavimento, di attenuare le sonorità e di aumentarne la rigidezza e la coibenza.

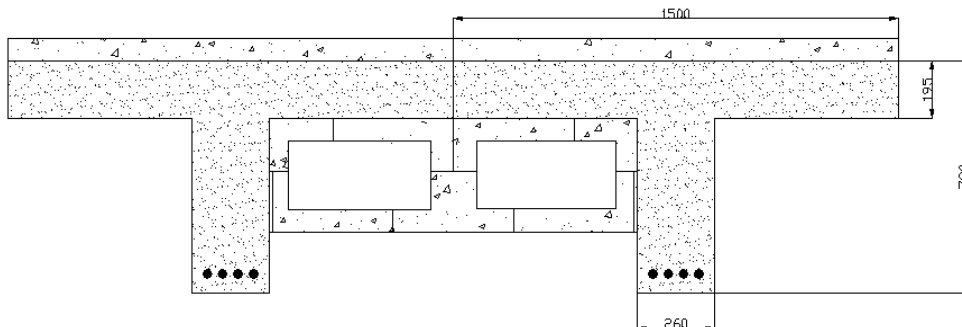


Fig. 2-6 Sezione della soletta del pavimento

2.2 Il Rockwell Commander 112TC

Il Rockwell Commander RC 112TC [13] è un aereo monomotore da turismo di produzione statunitense. Si tratta di un aereo ad ala bassa, con elica bipala a passo variabile, montata su motore a scoppio turbocompresso Lycoming, che sviluppa una potenza di 210 *HP* e che gli permette una velocità di crociera pari a 300 *km/h* e un'autonomia massima di 1670 *km* (Fig. 2-7).



Fig. 2-7 Il Rockwell Commander 112TC

La massa totale a vuoto del velivolo è

$$M_0 = M_{fusoliera} + M_{ala} + M_{motore} = 841 \text{ kg} \quad (2.1)$$

ripartita come indicato nelle Tab. 2-2, 2-3 e 2-4 [14]

2 Impatto di un velivolo contro un grattacielo

<u>Fusoliera</u>	[kg]
struttura	162,5
strumentazione	29,0
impianto idraulico	4,5
impianto elettrico	37,0
arredamento	75,0
carrello secondario	15,0
zavorra	9,5

Tab. 2-2 *Distribuzione delle masse nella fusoliera*

$$M_{fusoliera} = \sum_i M_i = 332,5 \text{ kg} \quad (2.2)$$

<u>Ala</u>	[kg]
struttura	151,5
carrello principale	57,0
superfici di controllo	20,0

Tab. 2-3 *Distribuzione delle masse nell'ala*

$$M_{ala} = \sum_i M_i = 228,5 \text{ kg} \quad (2.3)$$

<u>Motore</u>	[kg]
gondola motore	28,0
impianto di propulsione	252,0

Tab. 2-4 *Distribuzione delle masse nel motore*

$$M_{motore} = \sum_i M_i = 280,0 \text{ kg} \quad (2.4)$$