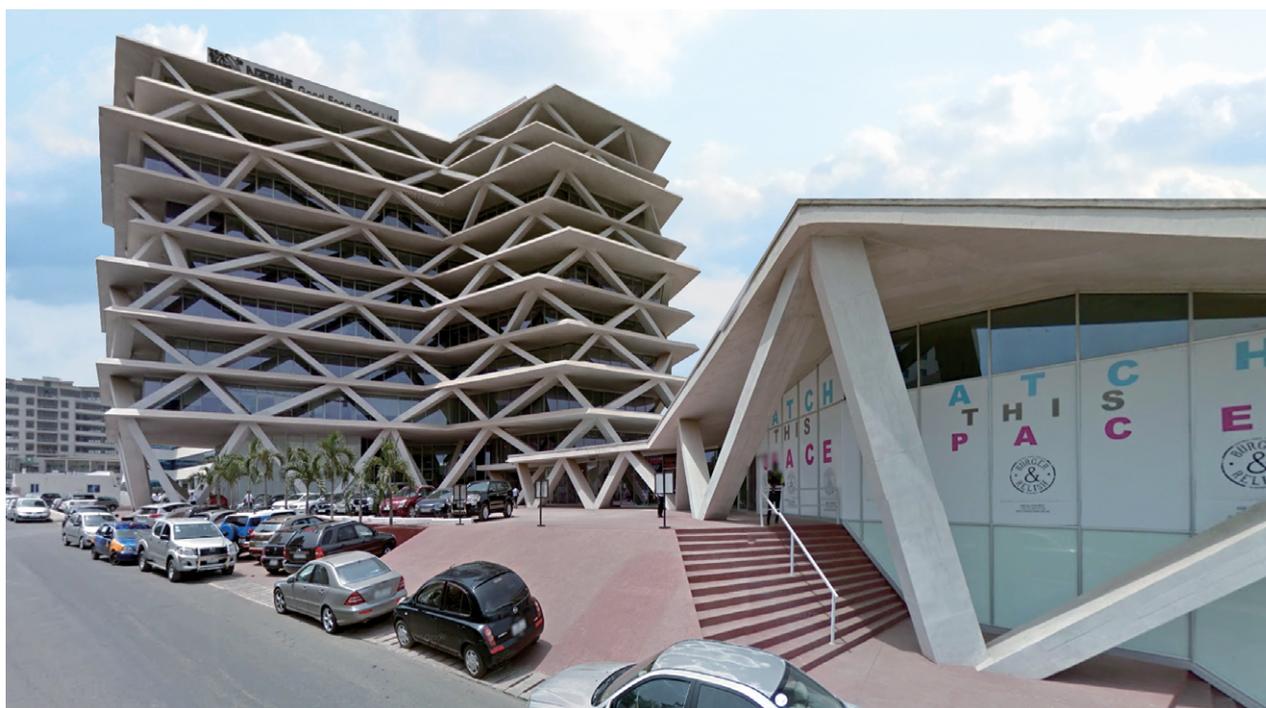


Progetto e realizzazione di un edificio su isolatori sismici a doppio pendolo, con struttura in c.a. in opera, sito ad Accra (Ghana) e denominato One Airport Square; l'edificio è caratterizzato da strutture portanti esterne a geometria complessa e funzionamento a reticolare spaziale

Fabio Camorani¹, Luciano Gasparini², Antonello Gasperi³ ■



Nome del progetto:

One Airport Square

Ubicazione:

Accra (Ghana)

Committente:

Actis (London, UK); Laurus (London, UK)

Progettazione Strutturale:

Politecnica Ingegneria e Architettura, Modena.

Ing. Fabio Camorani, Ing. Luciano Gasparini, Ing. Antonello Gasperi (consulente)

Progettazione Architettonica:

MCA, Bologna

Anno di completamento lavori:

2015

1. Premessa

L'edificio denominato One Airport Square è stato inaugurato ad Accra (Ghana) nel 2015, dopo circa tre anni di cantiere e due di sviluppo della progettazione; si tratta di un edificio complesso ed articolato, costituito da dieci livelli fuori terra e due livelli interrati, adibito ad uffici, spazi commerciali (piano terra), parcheggi (livelli interrati), per una superficie lorda slp complessiva di circa 17000 mq. I progetti concettuali architettonico e strutturale si sono sviluppati fin dall'inizio in stretta sinergia e sintonia e le progettazioni disciplinari, sviluppate da studi italiani (MCA progetto architettonico, Politecnica progetto strutturale), sono state condotte di conseguenza fino alle fasi di sviluppo dei dettagli costruttivi per il cantiere e di controllo dei lavori. L'edificio sorge in una zona in grande sviluppo, molto prossima all'aeroporto e sede di numerosi alberghi ed edifici per il terziario.

¹ Politecnica Ingegneria e Architettura via Galileo Galilei 220, 41126 Modena; Facoltà di Ingegneria Università di Modena e Reggio Emilia.

² Politecnica Ingegneria e Architettura via Galileo Galilei 220, 41126 Modena.

³ Consulente Politecnica e Ingegneria e Architettura via Galileo Galilei 220, 41126 Modena.

Figura 1
Edificio ultimato.





Figura 2
Contesto ed edificio ultimato.

Vista l'elevata sismicità locale che caratterizza la città di Accra, sede di una importante faglia, l'edificio è stato posto su isolatori sismici del tipo a doppio pendolo inverso posizionati in corrispondenza del piano terra. Il corpo di fabbrica ad un piano del Retail è invece direttamente vincolato al basamento interrato

L'elemento che maggiormente caratterizza l'edificio, sia dal punto di vista architettonico che strutturale, è sicuramente il "cesto" di facciata, formato da elementi diagonali portanti in c.a. con orientamento nello spazio variabile e diversificato.

2. Concept del progetto

Il Ghana non è in larga parte un paese soggetto ad eventi sismici, costituisce però eccezione la capitale Accra, la quale, essendo realizzata in corrispondenza di una faglia è classificata come zona sismica con PGA 0,35. Pertanto nelle fasi iniziali della progettazione, a seguito della definizione dell'idea architettonica, che partendo dalla suggestione delle figure geometriche stilizzate dell'arte ghanese, è approdata ad un edificio con facciate vetrate arretrate rispetto al perimetro caratterizzato da aggetti variabili in funzione dell'esposizione solare e di effetti chiaroscurali e rispetto al "diagrid" costituito dalle aste a disposizione inclinata variabile nello spazio, i progettisti si sono trovati di fronte alla scelta se utilizzare il "diagrid" in funzione strutturale o solo decorativa, considerando anche le complicazioni ulteriori legate a possibili eventi sismici.

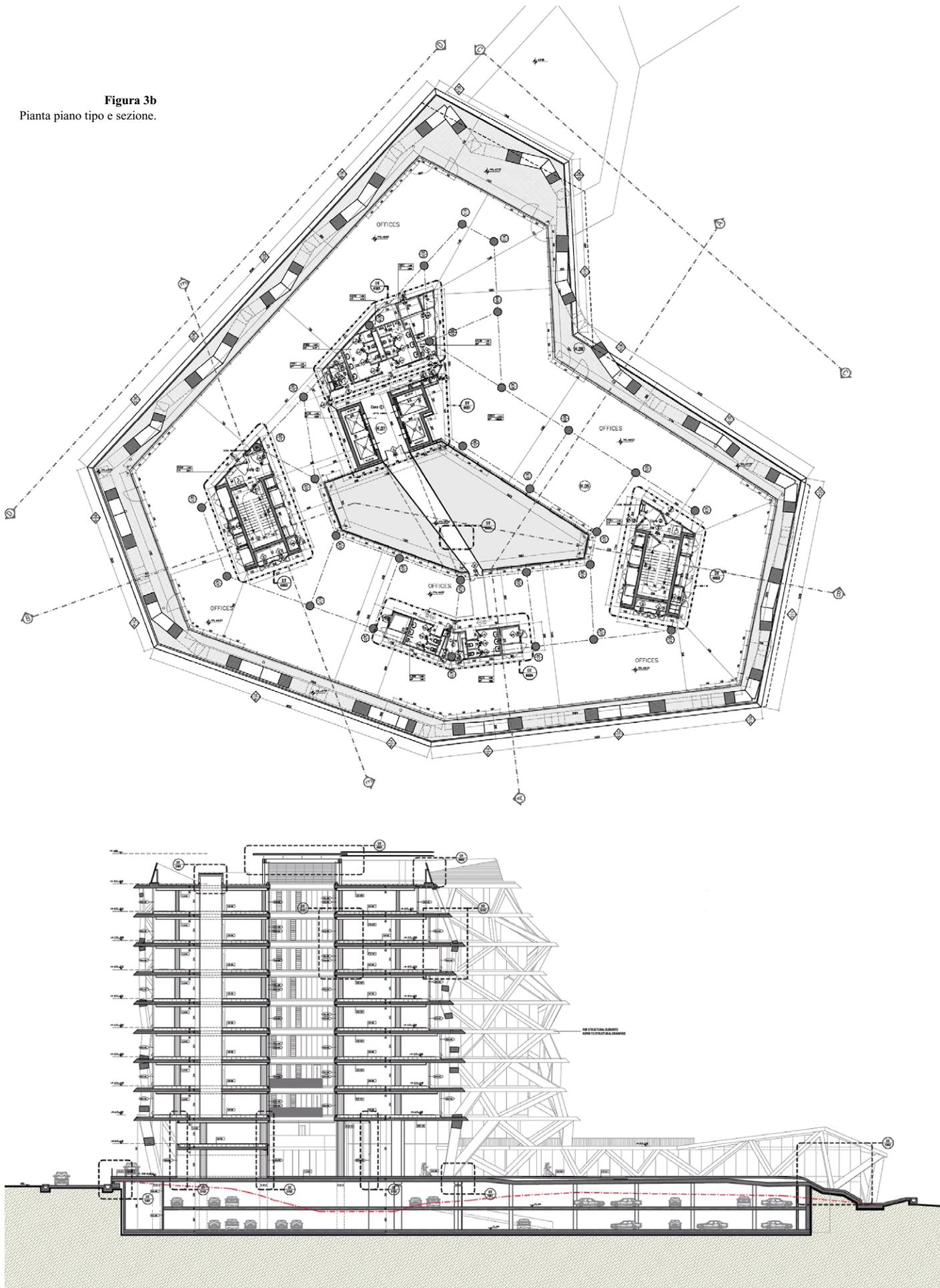
Dopo un esame di varie soluzioni alternative, comparate nell'ambito di valutazioni costi-benefici, stimate sotto l'aspetto funzionale, estetico ed economico, si è optato, in accordo con la Committenza, per una soluzione esposta nel seguito.

I diagonali del diagrid costituiscono il sistema portante esterno per carichi verticali, in tal modo l'ossatura portante diviene



Figura 3a
Render.

Figura 3b
Pianta piano tipo e sezione.



elemento di caratterizzazione formale, la posizione esterna alla facciata consente di ridurre le luci degli aggetti dei solai. L'apparente irregolarità geometrica è stata in realtà ricondotta a precise regole strutturali, in primo luogo la somma delle forze orizzontali di nodo, dovute all'inclinazione spaziale dei pilastri diagonali, è ad ogni piano circa uguale a zero, ovvero i solai fungono da sistemi di tiranti-puntoni per equilibrare la componente orizzontale delle forze di nodo del sistema reticolare di bordo, senza gravare i nuclei scale ascensore di controvento. Vista comunque la complessità del sistema strutturale, che vede la sovrapposizione di vari meccanismi di funzionamento, si è deciso di disporre l'edificio su isolatori, in modo da abbattere le azioni sismiche. Le azioni orizzontali sulla struttura in elevazione sono comunque prevalentemente assorbite dai cores scale ascensori.



Figura 4
Diagrid (di fianco).

3. La soluzione strutturale, le alternative esaminate

Vista la presenza di terreno incoerente di buone caratteristiche meccaniche si è optato per fondazioni superficiali del tipo a platea nervata in c.a. di spessore 60 cm con nervature ricalate di altezza complessiva 130 cm e muri contro terra di spessore 60 cm. Il basamento dell'edificio, adibito a parcheggio e locali tecnici, è molto più ampio rispetto alla parte in elevazione e costituisce pertanto, nel suo insieme, una struttura di fondazione molto rigida, esso è realizzato con pilastri a sezione quadrata. In sommità ai pilastri del livello -1 sono previsti numero 61 isolatori del tipo a pendolo inverso e numero 30 appoggi scorrevoli bidirezionali. Ogni piano dell'edificio presenta forma, dimensioni, contorno variabili, sia sul lato esterno che sulla corte interna. La struttura portante in elevazione, del tipo in c.a. gettata in opera, presenta una maglia di pilastri variabile tra 8.00 m e 12.00 m, i pilastri posti in corrispondenza della corte interna e quelli degli allineamenti centrali sono a sezione circolare con diametro variabile tra 45 cm e 90 cm.

I pilastri inclinati che costituiscono il diagrid sono realizzati ai vari piani con le seguenti dimensioni: 125 x 65 cm; 115 x 55 cm; 95 x 55 cm; 85 x 50 cm; 75 x 45 cm; 65 x 45 cm; 45 x 40 cm.

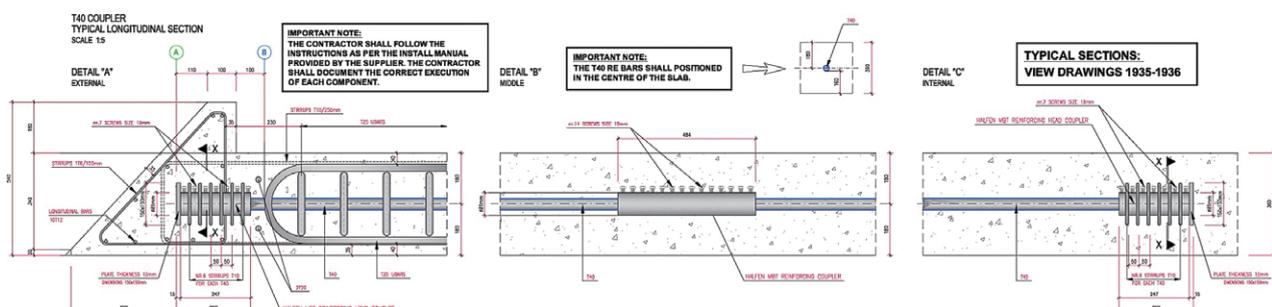
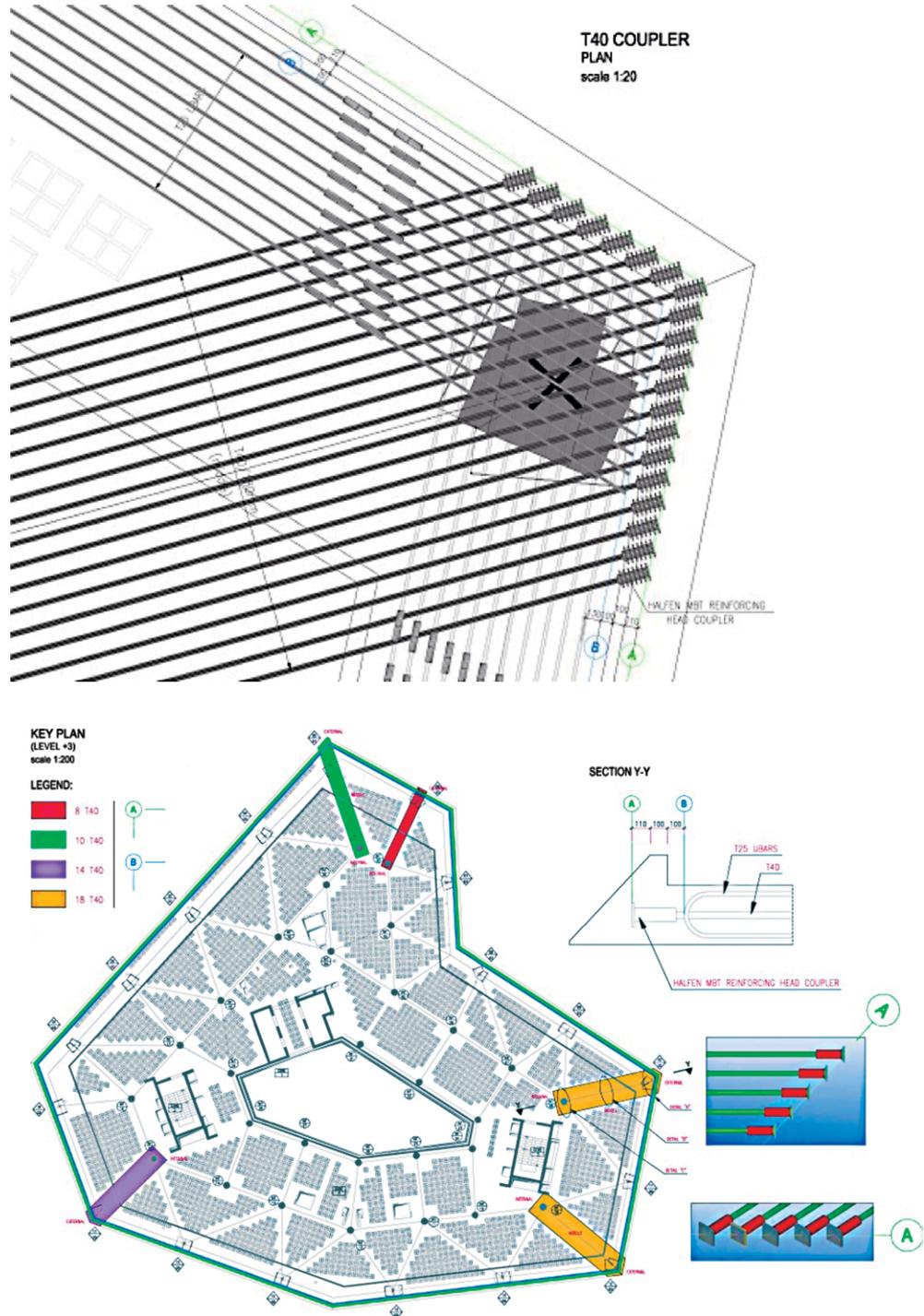


Figura 5a
Solai.

Figura 5b
Solai e Reticolari di piano.



I solai sono caratterizzati sia da sollecitazioni flessionali di tipo bidirezionale, visto che le maglie presentano dimensioni assimilabili al quadrato, sia da sollecitazioni di tipo membranale di compressione e trazione, per equilibrare le componenti orizzontali delle forze trasmesse nei nodi del diagrid e per trasmettere le forze sismiche.

I suddetti solai, con spessore 36 cm, sono del tipo a soletta piana bidirezionale con alleggerimenti realizzati con casseri a perdere in materiale plastico; lungo le linee che congiungono i pilastri sono previste fasce piene in c.a. con una duplice funzione: quella di “travi” in spessore di solaio a sostegno dei carichi verticali trasmessi dalle nervature bidirezionali e quella di sistema di tiranti-puntoni per equilibrare le forze orizzontali nei nodi del diagrid. In particolare la funzione di tirante viene prioritariamente assegnata a fasce di barre dywidag inserite in asse alle solette di piano.

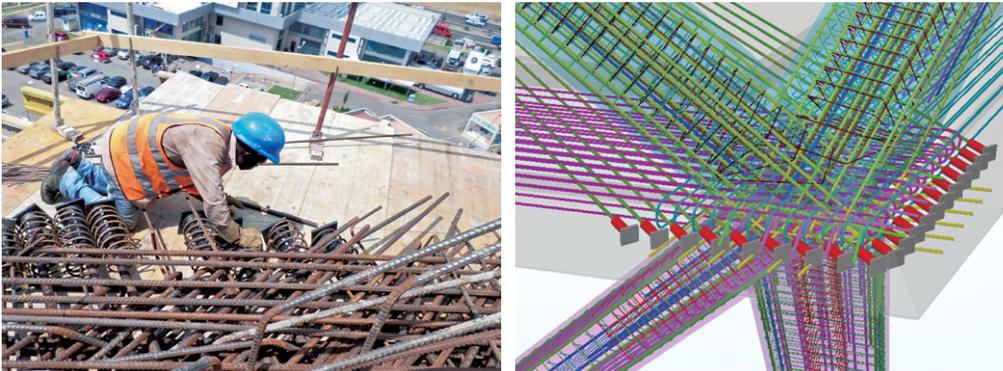


Figura 6
Tiranti di piano con barre dywidag.

Sono presenti tre nuclei con pareti in c.a. che ospitano scale, ascensori, cavedi per impianti, essi, vista la notevole rigidezza, assorbono e trasmettono al basamento le forze eoliche e quelle sismiche. Le tipologie strutturali appena descritte sono state scelte dopo aver preso in esame diverse opzioni, in particolare è stata valutata l'ipotesi di telai in acciaio con solai in lamiera grecata e getto collaborante, nonché l'ipotesi di solette piene con cavi di post-tensione. Le motivazioni principali che hanno portato alle soluzioni effettivamente adottate sono sintetizzabili come segue.

Le strutture in acciaio non sono facilmente reperibili nell'area e la necessità di farle arrivare da grandi distanze rendeva costi e tempi poco competitivi; l'idea architettonica richiedeva soluzioni piuttosto massive, inoltre la struttura in c.a. presenta una inerzia termica in grado di limitare gli effetti potenzialmente pericolosi dell'irraggiamento solare sulle porzioni direttamente esposte. L'impiego di cavi post tesi risultava eccessivamente complesso in funzione della geometria dei solai e della qualificazione della manodopera disponibile. Per quanto riguarda il diagrid i progettisti avevano individuato e definito a livello di progetto esecutivo una innovativa soluzione basata sulla prefabbricazione a pie d'opera; la soluzione a colonne realizzate in opera è stata esplicitamente richiesta dall'Impresa che si è aggiudicata l'appalto in relazione alla propria esperienza pregressa ed alla disponibilità di personale ed attrezzature; i progettisti, su richiesta della Committenza hanno pertanto redatto una ulteriore versione del progetto esecutivo.

4. Azioni

Le azioni sono state valutate con riferimento agli Eurocodici (in particolare 1 ed 8) ed alla norma Ghanese. In particolare l'azione sismica, in termini di PGA, è stata determinata in ottemperanza a quanto prescritto nel "Code for the Seismic of Concrete Structure" – Ghana November, 1990".

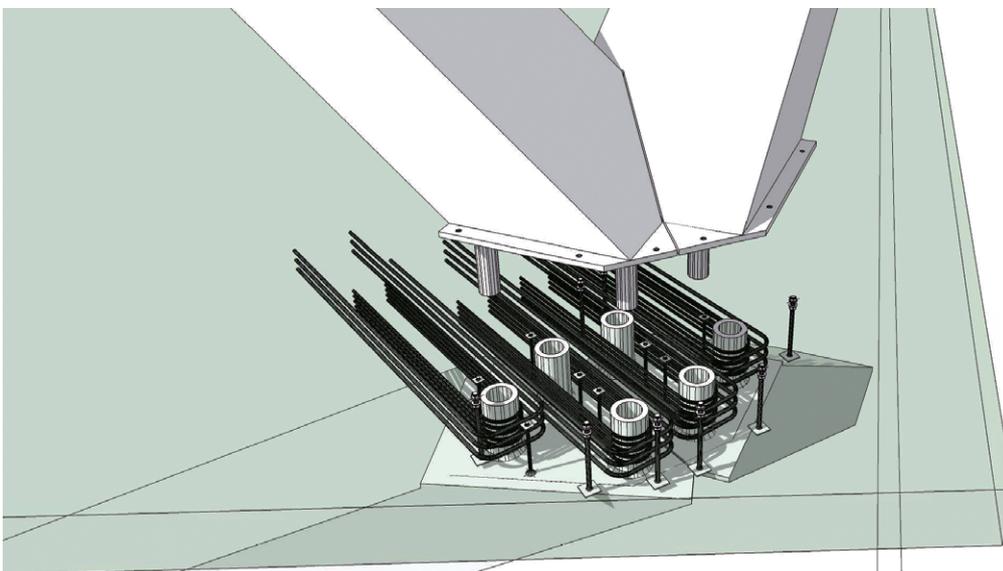


Figura 7
Ipotesi di pilastri prefabbricati, nodo.

Figura 8
Seismic risk Map of Ghana_
Individuazione zona 3.

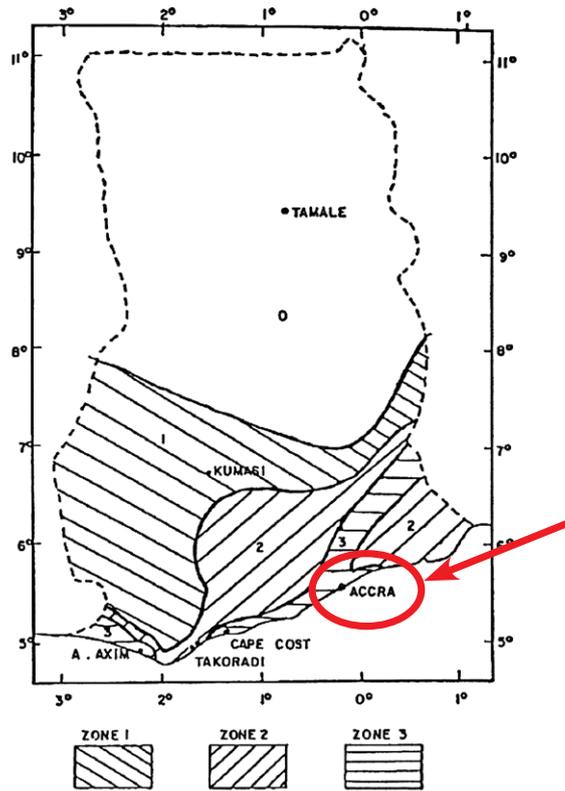


FIG 6.1 SEISMIC RISK MAP OF GHANA

Figura 9
Definition of seismic zone.
Individuazione della PGA.

Seismic Zone	Assigned Horizontal Design Ground Acceleration: A _g (unit of gravity)
0	0
1	0.15
2	0.25
3	0.35

Per quanto concerne invece la rappresentazione di base dell'azione sismica si è fatto riferimento agli Eurocodici in particolare: EC8 "Design of structures for earthquake and rules for building" Part 1: General rules, seismic action and rules for building", nonché alla norma del Ghana, assumendo i seguenti parametri.

Tipo di Terreno:	A
Coefficiente di amplificazione topografica:	1
Coefficiente di comportamento "q factor":	1
Vita nominale della costruzione VN:	50.0 anni
Classe d'uso (Reliability Differentiation):	II
Coefficiente di importanza:	1
Smorzamento Viscoso:	v = 0.05

Per la componente verticale si è assunto un q factor pari a 1.5, come suggerito dall'EC8.

Il terreno di fondazione è costituito da roccia, con l'inclusione di strati superficiali di materiale incoerente comunque di buone caratteristiche meccaniche e di spessore non superiore a 5 m. L'analisi dinamica della struttura isolata ha tenuto conto dello smorzamento del sistema di isolamento adottato (isolatori a doppio pendolo inverso), comunque non superiore a $\nu = 0.30$.

Una volta definiti gli spettri di progetto desumibili dai parametri sopra richiamati si è proceduto alla selezione di vari set di n° 7 accelerogrammi spettrocompatibili per la definizione del moto sismico in termini temporali. Tali accelerogrammi sono adottati nelle analisi dinamiche eseguite nel dominio del tempo.

Per tenere conto della variabilità spaziale del moto sismico, nonché di eventuali incertezze nella localizzazione delle masse, al baricentro delle masse è stata attribuita una eccentricità accidentale pari a 0.05 volte la dimensione dell'edificio, misurata perpendicolarmente alla direzione di applicazione dell'azione sismica.

Gli effetti della eccentricità accidentale del centro di massa sono stati determinati mediante l'applicazione dei carichi statici costituiti da momenti torcenti di valore pari alla risultante delle forze di piano moltiplicate per l'eccentricità accidentale sopra definita.

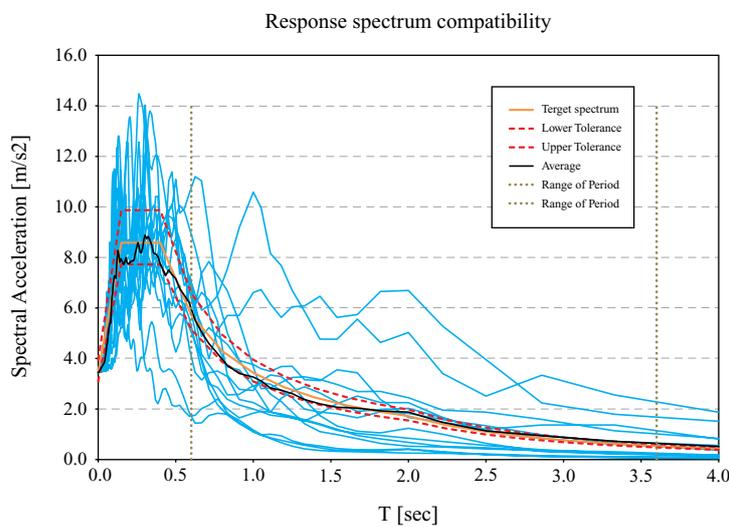


Figura 10
Spettrocompatibilità degli accelerogrammi in direzione orizzontale.

Sono state considerate con molta attenzione le azioni termiche sulla struttura.

Nelle condizioni climatiche tipiche delle aree tropicali, i differenziali termici stagionali non sono rilevanti, gli sbalzi termici di maggiore consistenza possono aversi sull'arco temporale giornaliero, si deve inoltre considerare la differenza di temperatura interna, dovuta al raffrescamento, rispetto a quella esterna.

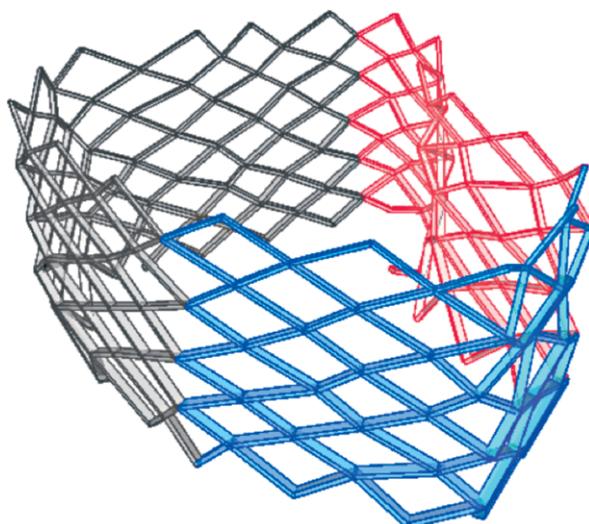


Figura 11
Suddivisione in tre parti della struttura diagonale esterna ai fini termici di irraggiamento.

Le azioni termiche sono state tenute in conto tramite una componente uniforme di temperatura sugli elementi strutturali, data dalla differenza tra la temperatura media degli stessi ad un certo istante rispetto ad un istante iniziale, considerando la loro ubicazione. Si è assunto un fattore significativo per l'assorbimento pari a 0.7 per superfici chiare colorate esterne (in accordo al prospetto 5.2 EN 1991-1-5). Inoltre, allo scopo di prendere in considerazione variazioni termiche differenziali anche in funzione dell'irraggiamento dovuto all'orientamento solare, si è suddivisa la struttura esterna in tre zone.

Sono stati considerati i seguenti differenziali termici:

$\Delta T_s = 15^\circ \text{C}$ variazione stagionale per gli elementi interni;

$\Delta T_s = 25^\circ \text{C}$ variazione stagionale per gli elementi esterni;

$\Delta T_i = 30^\circ \text{C}$ variazione giornaliera per gli elementi esterni soggetti ad irraggiamento.

5. Modellazioni numeriche

L'analisi strutturale è stata condotta ricorrendo a molteplici modelli, sviluppati assumendo varie possibili configurazioni dei parametri in gioco (vincoli, rigidzze, carichi); i risultati sono stati poi attentamente comparati e mediati al fine di determinare il comportamento strutturale più plausibile, per le varie combinazioni di carico.

Per la modellazione è stato utilizzato il codice di calcolo "SAP 2000 v.15.1.0" della Computers & Structures Inc, distribuito in Italia dalla CSI Italia Srl.

Sono state effettuate analisi statiche e dinamiche in campo lineare e non lineare, concentrando su elementi link la simulazione del comportamento degli isolatori a doppio pendolo inverso.

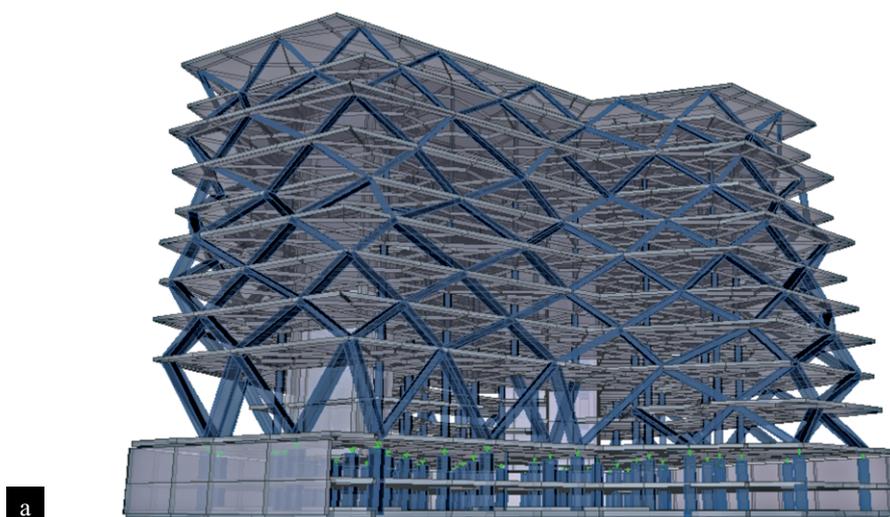
In considerazione della tecnologia realizzativa prevista in progetto, gli orizzontamenti sono stati considerati infinitamente rigidi nel proprio piano. Per quanto concerne l'analisi sismica, al fine di modellare adeguatamente il sistema di isolamento si è adottata una analisi dinamica nel dominio del tempo, confrontando poi i risultati con quelli derivanti da analisi modale con spettro di risposta.

I principali modelli agli elementi finiti adottati per l'analisi strutturale sono sintetizzabili come segue:

- 1) Struttura globale comprensiva della platea di fondazione su suolo alla Winkler (sono state eseguite simulazioni con almeno tre valori differenti del coefficiente di sottofondo).
- 2) Struttura globale comprensiva della platea di fondazione su suolo alla Winkler, con modifica (ovvero drastica riduzione) delle rigidzze membranali delle solette bidirezionali di piano, per valutare il flusso di sollecitazioni di trazione o compressione sulle diagonali di piano (le travi) che contribuiscono al funzionamento reticolare complessivo; si tratta ovviamente di una situazione "limite" cautelativa, pertanto sono stati assunti adeguati fattori di sicurezza.
- 3) Modello specifico della sovrastruttura su isolatori per l'analisi sismica condotta con diverse metodologie. In particolare è stata condotta l'analisi dinamica nel dominio del tempo confrontata con analisi modale con spettro di risposta.
- 4) Modelli separati dei singoli implacati, con diverse condizioni di vincolo tra soletta e pilastri e setti, al fine di studiarne il comportamento, in particolare a flessione e taglio per carichi verticali.

Sono state prese inoltre in considerazione diverse condizioni di vincolo per la struttura a diagonali esterna.

Figura 12a
Modello FEM globale.
Vista.



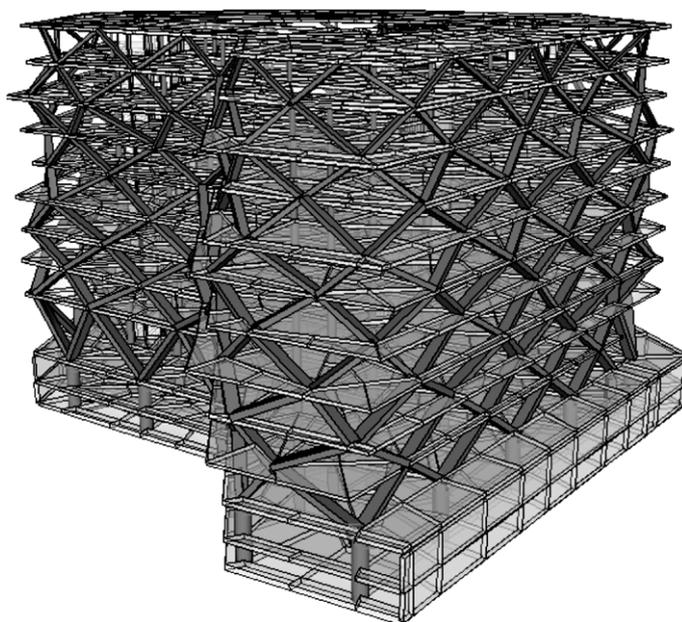


Figura 12b
Modello FEM globale.
Vista.

b

6. Isolatori sismici impiegati

Come è noto i tipi più diffusi di isolatori sismici attualmente in commercio sono sostanzialmente suddivisibili in due categorie: quelli a scorrimento e quelli elastomerici. Come già anticipato, per il caso in esame sono impiegati isolatori sismici del tipo a scorrimento a superficie curva doppia, caratterizzati dalle seguenti peculiarità:

- lo scorrimento avviene su superfici sferiche consentendo così l'autocentramento della struttura dopo il sisma;
- la dissipazione di energia e lo smorzamento viscoso equivalente sono associati all'attrito delle due superfici di scorrimento;
- il raggio di curvatura è determinante per definire il periodo proprio di vibrazione della struttura;
- il raggio di curvatura equivalente coincide con il doppio del raggio di curvatura geometrico della singola superficie sferica di scorrimento;
- il periodo proprio è sostanzialmente indipendente dalla massa della struttura;
- rispetto agli isolatori a superficie curva singola, l'eccentricità del carico verticale durante il moto sismico è ridotta.

In particolare sono state impiegate quattro tipologie di isolatori, differenziate in base ai carichi verticali:

- **Tipo A** FIP-DL 1200/600(3700);
- **Tipo B** FIP-DL 1600/600(3700);
- **Tipo C** FIP-DL 2250/600(3700);
- **Tipo D** FIP-DL 2700/600(3700).

Nella pagina seguente è riportata la planimetria degli isolatori con la rispettiva identificazione tipologica.

Caratteristiche isolatore

Tipo A	Raggio di curvatura equivalente: $R = 3700$ mm Spostamento orizzontale massimo: $d = \pm 300$ mm Classe d'attrito : bassa ("Low friction, type L") Carico verticale max in condizioni sismiche: $NEd = 6000$ kN
Tipo B	Raggio di curvatura equivalente: $R = 3700$ mm Spostamento orizzontale massimo: $d = \pm 300$ mm Classe d'attrito : bassa ("Low friction, type L") Carico verticale max in condizioni sismiche: $NEd = 8000$ kN
Tipo C	Raggio di curvatura equivalente: $R = 3700$ mm Spostamento orizzontale massimo: $d = \pm 300$ mm Classe d'attrito : bassa ("Low friction, type L") Carico verticale max in condizioni sismiche: $NEd = 12500$ kN
Tipo D	Raggio di curvatura equivalente: $R = 3700$ mm Spostamento orizzontale massimo: $d = \pm 300$ mm Classe d'attrito : bassa ("Low friction, type L") Carico verticale max in condizioni sismiche: $NEd = 15000$ kN

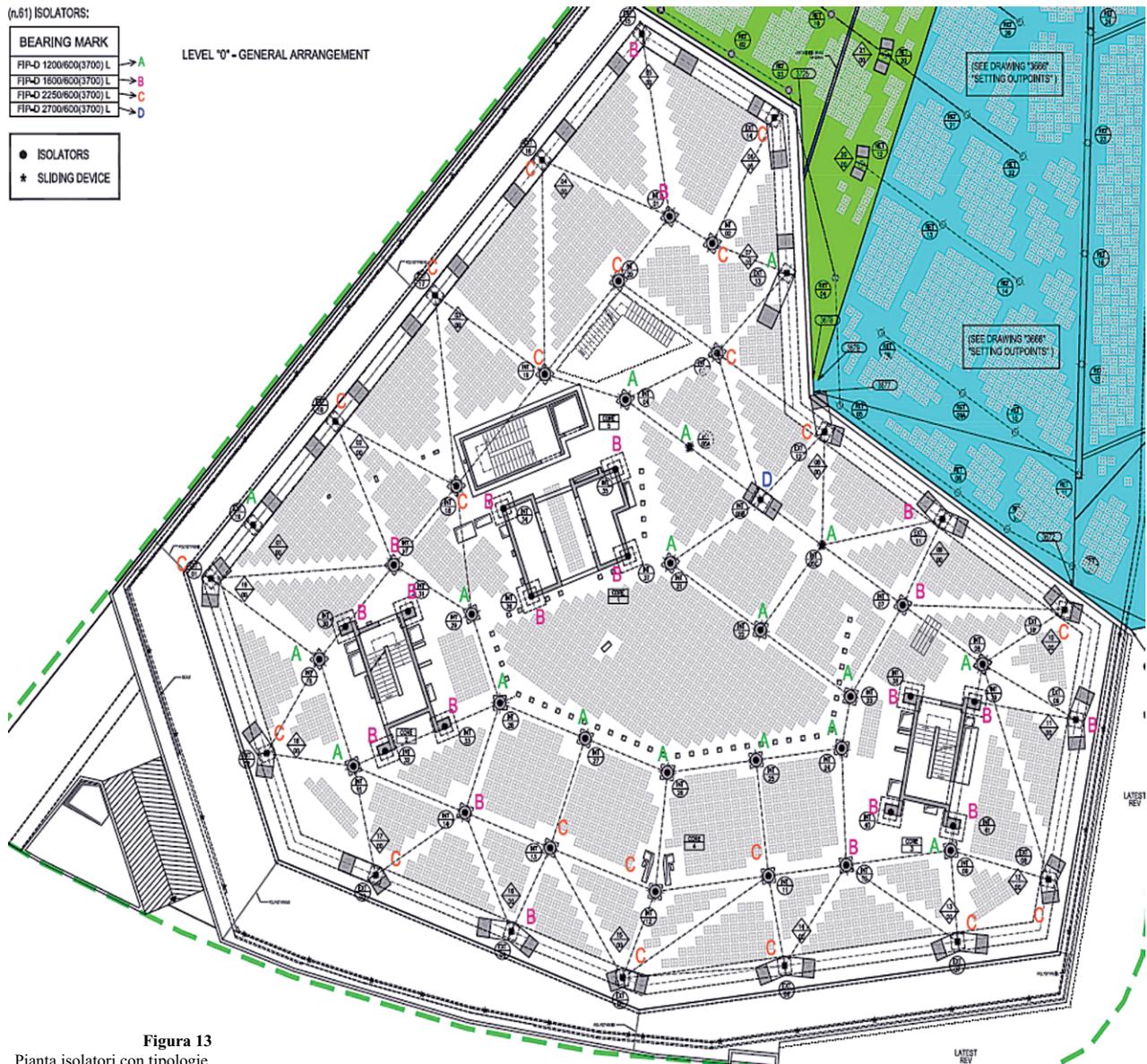


Figura 13
Pianta isolatori con tipologie.

Il coefficiente di attrito dinamico rappresenta certamente il parametro più importante ai fini della determinazione della risposta strutturale. Qualsiasi sia il materiale di scorrimento, il coefficiente d'attrito dipende da velocità e pressione. Tuttavia, la dipendenza dalla velocità risulta essere poco significativa nel range di velocità associato all'eccitazione sismica di una struttura isolata e per tale motivo la ditta produttrice assicura la trascurabilità della variazione in termini di velocità. D'altra parte, è noto invece dalla letteratura e dall'evidenza sperimentale, che la dipendenza dalla pressione (ossia dal carico verticale) non è trascurabile; in particolare, il valore del coefficiente d'attrito cala all'aumentare del carico verticale. Il grafico successivo mostra come varia il coefficiente d'attrito dinamico al variare del carico verticale; in particolare, come esso varia al variare del rapporto tra carico verticale agente sull'isolatore N_{Sd} (tipicamente assunto costante ed uguale al carico verticale in condizioni di esercizio quasi-permanenti) e al massimo carico verticale N_{Ed} precedentemente definito.

$$\mu = 2.5 \cdot \left(\frac{N_{Sd}}{N_{Ed}} \right)^{-0.834} \quad (1)$$

In considerazione della legge costitutiva che regola l'attrito si è effettuata la scelta delle tipologie dei dispositivi in modo da ottimizzare il coefficiente dinamico con l'intento di mantenere ridotte le azioni orizzontali in condizioni dinamiche.

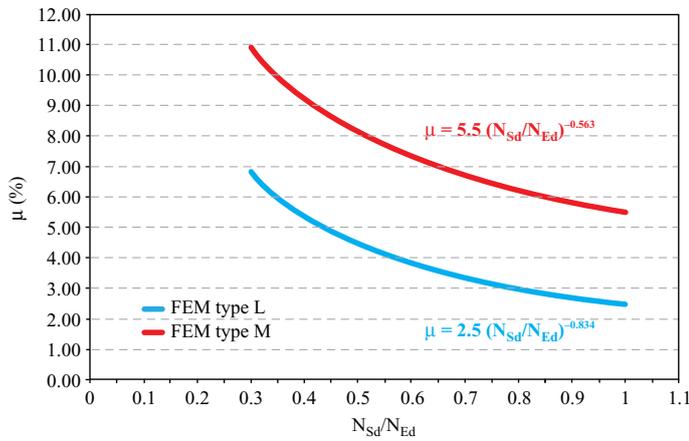


Figura 14
Variazione coefficiente di attrito.

Il modello matematico che meglio interpreta l'impiego di isolatori con superficie a doppia curvatura prevede una relazione forze-spostamenti bilineare.

I parametri che descrivono il "comportamento lineare equivalente" sono la rigidità effettiva e lo smorzamento visco effettivo che possono essere calcolati con le seguenti formule.

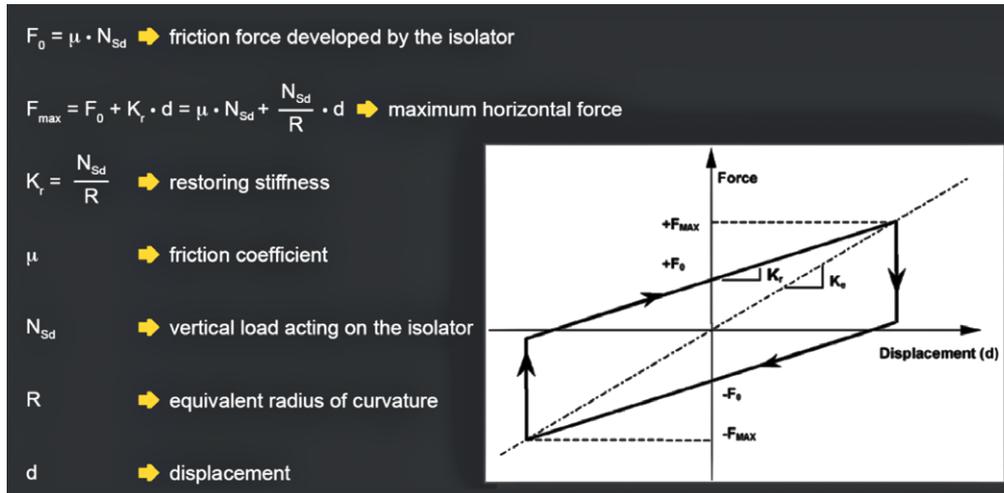


Figura 15
Isolatori, relazione forze spostamenti.

$$K_e = N_{Sd} \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right) \quad (2)$$

$$\xi_e = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{\mu \cdot R} + 1} \quad (3)$$

Dalle suddette relazioni, è possibile vedere come entrambi i parametri dipendano dagli spostamenti. È stato quindi necessario un procedimento iterativo di calcolo.

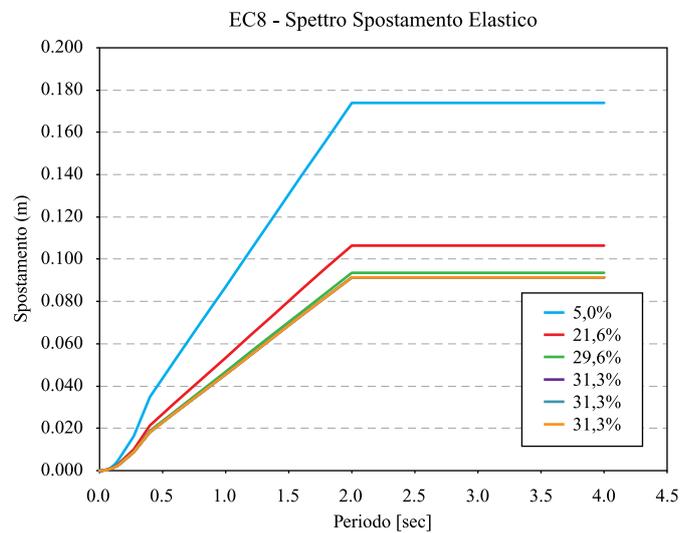
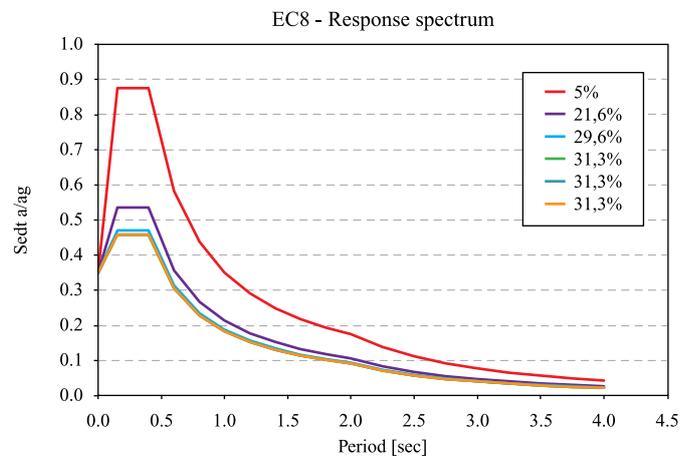
$$K_e = N \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{X} \right) \quad (4)$$

$$\zeta_e = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{X}{\mu R} + 1} \tag{5}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{X} \right)}} \tag{6}$$

Figura 16a
Sintesi procedimento iterativo.

EC8 Parameters	
Ground acceleration a_g	0.35
Terrain categories	A
S	1.00
T_B	0.15
T_C	0.40
T_D	2.00
	0.2
	5%
Damping factor	1
Structures factor q	1



Target Isolation System Vibration Period (assumed)	T	3.86	sec
Radius of double pendulum	R	3.701	mm
Fiction factor	μ	0.025	
Total Building Weight Force	V	385.850	kN
Maximun displacement	X	180	mm
Rigidezza prima iterazione	K_{e1}	157.849	N/mm
Periodo prima iterazione	T_{e1}	3.14	sec
Smorzamento prima iterazione	e_1	21.61%	
Damping factor	e_1	0.61	
	S_{e1}	0.04360	a/ag
Spostamento prima iterazione	X_{e1}	106.58	mm
Rigidezza seconda iterazione	K_{e2}	194.765	N/mm
Periodo seconda iterazione	T_{e2}	2.82	sec
Smorzamento seconda iterazione	e_2	29.58%	
Damping factor	e_2	0.55	
	S_{e2}	0.04827	a/ag
Spostamento prima iterazione	X_{e2}	95.63	mm
Rigidezza terza iterazione	K_{e2}	205.129	N/mm
Periodo terza iterazione	T_{e2}	2.75	sec
Smorzamento terza iterazione	e_2	31.31%	
Damping factor	e_2	0.55	
	S_{e2}	0.05084	a/ag
Spostamento prima iterazione	X_{e2}	95.63	mm
Rigidezza quarta iterazione	K_{e2}	205.129	N/mm
Periodo quarta iterazione	T_{e2}	2.75	sec
Smorzamento quarta iterazione	e_2	31.31%	
Damping factor	e_2	0.55	
	S_{e2}	0.05084	a/ag
Spostamento prima iterazione	X_{e2}	95.63	mm
Rigidezza quinta iterazione	K_{e2}	205.129	N/mm
Periodo quinta iterazione	T_{e2}	2.75 sec	
Smorzamento quinta iterazione	e_2	31.31%	
Damping factor	e_2	0.55	
	S_{e2}	0.05084	a/ag
Spostamento prima iterazione	X_{e2}	95.63	mm

Figura 16b
Sintesi procedimento iterativo.

La relazione forza-deformazione associata con l'effetto pendolo è stata considerata secondo il raggio equivalente della sfera del dispositivo che nel nostro caso è $R = 3700$ mm.

Gli isolatori a doppio pendolo sono stati modellati usando appositi elementi link con comportamento non lineare mediante SAP2000. La forza assiale $P = f_{u1}$ e le forze di attrito f_{u2f} e f_{u3f} variano in maniera non lineare durante l'analisi secondo le relazioni ($f_{u1} = 0$ se $d_{u1} < 0$):

$$f_{u1} = k1 \cdot d_{u1} + c1 \cdot d_{u1}$$

$$f_{u2} = f_{u2f} + f_{u2p}$$

$$f_{u3} = f_{u3f} + f_{u3p}$$

$$f_{u2f} = P\mu_2Z_2$$

$$f_{u3f} = P\mu_3Z_3$$

$$f_{u2p} = -P \frac{d_{u2}}{\text{radius2}}$$

$$f_{u3p} = -P \frac{d_{u3}}{\text{radius3}}$$

(7)

Dove z_2 e z_3 sono le variabili isteretiche interne e i coefficienti di attrito μ_2 e μ_3 sono dipendenti dalla velocità. I dati relativi al raggio di curvatura (3700 mm), alla rigidità, ai coefficienti di attrito, allo smorzamento (differenziati per i tipi di smorzatori A, B, C e D) sono stati specificati nel programma. La deformabilità verticale degli isolatori non è stata considerata essendo i rapporti di rigidità assiale del sistema di isolamento K_v e l'equivalente rigidità orizzontale K_{esi} decisamente maggiori di 800.

Il modello di attrito è basato sul comportamento isteretico proposto da Wen e Park (1976), Wen e Ang (1986), e raccomandato per analisi su base isolata da Nagarajaiah, Reinhorn e Constantinou (1991). Il comportamento a pendolo è assunto come raccomandato da Zayas e Low (1990).

Le forze di attrito e le forze da pendolo sono direttamente proporzionali alle forze di compressione assiale nell'elemento. Per questi dispositivi, la variazione del coefficiente di attrito è trascurabile in accordo con la relativa velocità di scorrimento nel dispositivo in termini di eccitazione sismica.

L'analisi dinamica non lineare è stata eseguita con modello FEM illustrato precedentemente. Essendo in presenza di un sistema nel quale le non linearità possono essere pensate come interamente concentrate nel sistema isolante (gli elementi della struttura operano in campo lineare) e perciò presenti in un numero limitato di elementi, è stato deciso di utilizzare la strategia di soluzione che va sotto il nome di "Fast Non-linear Analysis" (FNA).

7. Aspetti realizzativi

Numerosi sono stati gli aspetti realizzativi degni di interesse, tra essi certamente lo studio delle cassetture dei pilastri dei diagrid, una volta scelta dall'Impresa la soluzione in opera in sostituzione di quella prefabbricata a piè d'opera, scelta in origine dai progettisti.

Figura 17
Casseratura diagrid.



Dopo aver discusso con l'Impresa varie possibilità è stata adottata una soluzione che prevede elementi terminali metallici, denominati "shoes", realizzati su misura, in due pezzi, in una officina friulana, essi sono stati poi assemblati in cantiere tramite bullonatura. La precisione delle "shoes" costituenti la cassetta di nodo era di fondamentale importanza per assicurare la corretta realizzazione geometrica del diagrid, in particolare l'inclinazione e la posizione del baricentro della sezione. La parte centrale di ogni asta diagonale è invece stata realizzata con casseri metallici modulari a doghe, adattabili per tutte le colonne e quindi standardizzati.

8. Conclusioni

L'edificio denominato OAS, nel quale la struttura costituisce l'elemento caratterizzante, ha richiesto la valutazione di molteplici alternative progettuali e la definizione di numerosi modelli, sia sotto l'aspetto dello studio dell'edificio finito sia sotto l'aspetto dello studio delle tecnologie e delle fasi di realizzazione.

L'utilizzo di isolatori sismici del tipo a doppio pendolo inverso ha consentito la realizzazione di una struttura in elevazione geometricamente molto complessa, essa si identifica in modo sostanziale con l'immagine architettonica.

Bibliografia

Progetto e realizzazione di un edificio in c.a. ad Accra (Ghana), denominato One Airport Square, con facciate strutturali a geometria complessa e funzionamento reticolare spaziale, posto su isolatori sismici. Fabio Camorani, Luciano Gasparini, Antonello Gasperi. Congresso ANIDIS Pistoia 2017.