

Il ruolo, il comportamento e l'analisi dei diaframmi di piano

Guido Camata, prof. Associato di Tecnica delle Costruzioni Università "G. D'Annunzio" di Chieti Pescara, direttore tecnico, ASDEA srl. www.asdea.eu

Questo breve articolo descrive il comportamento dei diaframmi di piano soggetti ad azioni orizzontali. La comprensione del comportamento meccanico è fondamentale sia per definire correttamente il ruolo delle singole componenti del diaframma che per individuare il modello analitico e/o numerico più appropriato.

Il ruolo dei cordoli, dei collettori, delle connessioni tra gli elementi verticali e quelli orizzontali, l'importanza della corretta valutazione della rigidezza e della resistenza del diaframma verranno analizzati criticamente.

Rigidezza e resistenza del diaframma devono essere valutate con attenzione in particolare per strutture con elementi sismo-resistenti distanti o con esoscheletri rigidi esterni che portano ad un aggravio delle sollecitazioni membranali di tutte le componenti del diaframma.

Il documento dopo avere illustrato il ruolo e le componenti del diaframma, analizza la normativa vigente e descrive modelli semplici e complessi per l'analisi e il dimensionamento di tutte le componenti del diaframma.

RUOLO E COMPONENTI DEL DIAFRAMMA

In questo paragrafo vengono analizzati il ruolo e le componenti del diaframma di piano. I solai hanno il compito di resistere ai carichi gravitazionali, di sostenere gli elementi verticali soggetti a carichi laterali, di resistere alle spinte degli elementi strutturali inclinati, di trasferire le azioni orizzontali al sistema resistente laterale (sisma e vento) e nel caso di interrati di contrastare la spinta del terreno. Figura 1 mostra gli elementi che compongono il diaframma.

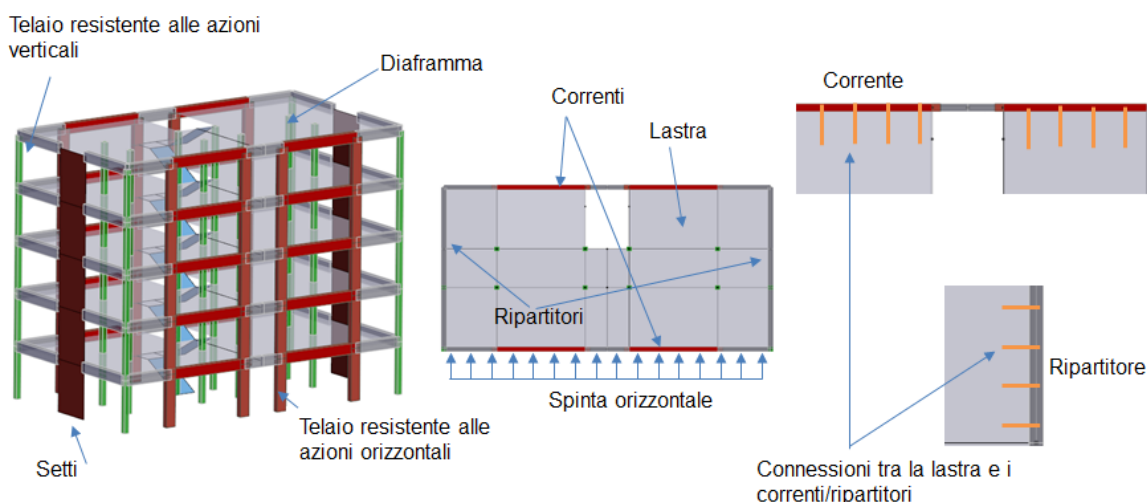


Figura 1 – Componenti del diaframma

Come illustrato in figura 1, i diaframmi sono costituiti da diverse componenti:

- **Lastra.** Ha il compito di trasferire le forze di taglio.
- **Correnti.** Hanno la funzione di assorbire gli sforzi di compressione e trazione della coppia indotta dal carico orizzontale
- **Ripartitori.** Hanno il compito di distribuire gli sforzi di taglio agli elementi resistenti alle forze orizzontali
- **Connessioni.** Servono a connettere la lastra ai correnti e ai ripartitori.

Per realizzare un diaframma di piano rigido/resistente è necessario che le componenti citate siano presenti e sufficientemente resistenti.

Negli edifici nuovi a telaio in c.a. (Figura 1):

- la lastra è realizzata da una soletta in c.a.,
- i correnti sono costituiti dalle travi ortogonali all'azione orizzontale,
- i ripartitori sono costituiti dalle travi che collegano gli elementi resistenti paralleli all'azione orizzontale
- le connessioni sono realizzate dall'armatura di collegamento tra la soletta in c.a. e le travi

Negli edifici esistenti in c.a., la cappa in calcestruzzo è spesso non armata e per essere resistente deve essere in grado di resistere al taglio di piano indotto dalle forze esterne. Non essendoci armatura, la connessione tra la cappa e i ripartitori/correnti è garantita solo dalla resistenza a taglio della cappa all'interfaccia tra la cappa e i ripartitori/correnti.

Negli edifici in muratura di nuova costruzione la lastra può essere realizzata con un soletta in c.a., da elementi in acciaio o da elementi lignei. I cordoli hanno funzione di ripartitori e correnti e la connessione tra i cordoli e la lastra deve essere realizzata attraverso connessioni meccaniche. Nel caso di edifici esistenti in muratura la cappa spesso non è armata. La presenza dei cordoli o meno dipende dal periodo di costruzione della struttura e quasi sempre le connessioni tra i cordoli e la cappa non sono presenti. Se uno di questi elementi è mancante o non sufficientemente resistente il diaframma non può essere considerato resistente o rigido. Nei paragrafi seguenti si approfondirà il concetto di diaframma rigido/resistente.

NORME VIGENTI

Le NTC 2018 trattano i diaframmi di piano nei capitoli 4, 7 e 8. Nel capitolo 4, relativo alla statica, si parla del ruolo del diaframma solo per le strutture in legno e muratura, non ci sono indicazioni per le altre tipologie strutturali.

Nella parte sismica nei criteri generali di progettazione dei sistemi strutturali §. 7.2.2 la norma descrive genericamente il ruolo degli orizzontamenti senza fornire indicazioni quantitative o prescrizioni sul significato di rigidezza e resistenza: *“Gli orizzontamenti, ove presenti, devono essere dotati di rigidezza e resistenza tali da consentire la redistribuzione delle forze orizzontali tra i diversi sistemi resistenti a sviluppo verticale”*

Alcuni codici americani e l'eurocodice 8 forniscono indicazioni quantitative sulla rigidezza dei diaframmi. L'ASCE 7-16 nella sezione 12.2.1.2 fornisce un'indicazione utile su quando un diaframma può essere considerato rigido: *“Diaframmi di solai in calcestruzzo o misti acciaio-calcestruzzo con un rapporto luce/profondità di tre o meno in strutture che non hanno irregolarità orizzontali possono essere idealizzati come rigidi”*.

Il rapporto campata-profondità non si riferisce a quello della soletta stessa, ma piuttosto al rapporto tra la distanza tra i telai/setti del sistema sismo-resistente ("campata") e la larghezza del diaframma ("profondità") come indicato in Figura 2. Se il diaframma è lungo e stretto, non può essere considerato un diaframma rigido. Questa definizione è comunque troppo generica perché non considera lo spessore e la resistenza della lastra e delle sue componenti.

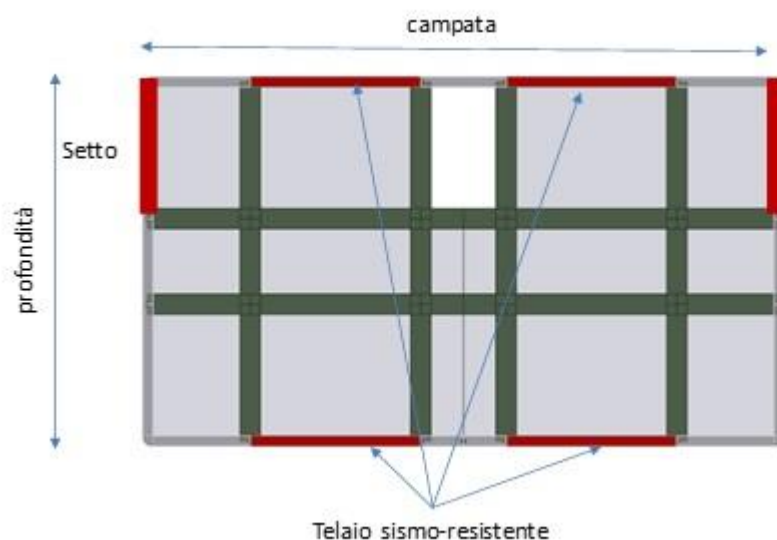


Figura 2 – Solaio rigido secondo ASCE 7-16

Nella sezione 1604.4 dell'International Building Code 2018 si legge:

"Un diaframma è rigido ai fini della distribuzione del taglio e del momento torsionale del piano quando la deformazione laterale del diaframma è inferiore o uguale a due volte lo spostamento di interpiano medio".

In questo caso è fornita un'indicazione quantitativa, ma è richiesto un calcolo analitico per determinare se il diaframma può essere ritenuto rigido

Anche l'Eurocodice EN 1998-1:2004 richiede di fare una valutazione analitica. Il diaframma deve essere modellato con la sua effettiva flessibilità nel piano valutando se i suoi spostamenti orizzontali non superano in nessun caso quelli risultanti dall'ipotesi di diaframma rigido di oltre il 10% dei corrispondenti spostamenti orizzontali.

Nei criteri di modellazione della struttura e dell'azione sismica §. 7.2.6., viene scritto che in assenza di aperture che non riducano significativamente la rigidezza nel piano, gli orizzontamenti possono essere considerati rigidi se è presente una soletta in cemento armato di almeno 40 mm per le strutture in c.a. e 50 mm per le strutture miste. Tuttavia, la resistenza e la rigidezza del diaframma dipendono dall'azione sismica e dalla distanza tra gli elementi verticali sismo-resistenti. Quindi, non è detto che una soletta di 40/50 mm sia sufficiente ad assicurare la rigidezza e la resistenza del diaframma, in particolare nel caso di elementi sismo-resistenti posti a grande distanza.

Nelle costruzioni in calcestruzzo per le verifiche in resistenza al § 7.4.4.4.1 la norma richiede che le componenti del diaframma debbano essere progettate e verificate con una sovrarigidità del 30%, quindi la soletta, i ripartitori, i cordoli e le connessioni tra gli elementi devono essere progettati sovrarigidità. Per le pareti il § 7.4.4.5.1 parla di diaframmi rigidi senza dare dettagli nel caso di pareti semplici.

Per le costruzioni con struttura prefabbricata (§ 7.4.5.3) la norma spiega che il comportamento a diaframma *“è reso più efficace”* se sono predisposti appositi supporti nelle zone di collegamento, realizzata una cappa in c.a., inserite delle armature a trazione lungo il perimetro e nelle connessioni interne.

Nel § 4.4.11 per le costruzioni in legno la norma richiede di verificare il comportamento a lastra dei diaframmi considerando sia le modalità di realizzazione che le caratteristiche di unione. Per l'analisi strutturale (§ 7.7.4.) la norma indica che i solai in legno dovrebbero essere considerati con la loro deformabilità e considerati rigidi se rispettate le disposizioni costruttive del § 7.7.5.3 o, in alternativa, nel § 7.7.7.2 e se non sono presenti aperture che influenzano significativamente la rigidità nel piano della lastra. Le disposizioni costruttive per gli impalcati in legno (§ 7.7.5.3) forniscono indicazioni di dettaglio. Nelle verifiche di sicurezza (§ 7.7.6.) si richiede che sia gli elementi strutturali che le connessioni siano progettati con valori di sovrarigidità come indicato in § 7.7.3, in particolare per i collegamenti tra diaframmi orizzontali ed elementi verticali di controvento.

L'organizzazione strutturale delle costruzioni in muratura (§ 4.5.4) richiede che l'edificio sia concepito come una struttura tridimensionale con adeguati collegamenti tra pareti in muratura, orizzontamenti e fondazioni per resistere alle azioni orizzontali e verticali. Gli orizzontamenti devono avere sufficiente resistenza e rigidità per ripartire le azioni orizzontali agli elementi resistenti e garantire un comportamento d'insieme *“scatolare”*. Per assicurare un comportamento scatolare, muri, orizzontamenti e cordoli devono essere opportunamente collegati tra di loro.

I criteri di progetto § 7.8.1.4 indicano che gli orizzontamenti e le coperture non siano spingenti o che ci siano elementi atti ad assorbire la spinta orizzontale. Inoltre, i solai, per garantire il funzionamento a diaframma, devono essere collegati agli elementi verticali e fornire vincoli nei confronti delle azioni fuori piano delle pareti e ripartire le azioni orizzontali nel piano delle pareti. Per la progettazione degli interventi per le costruzioni in muratura in presenza di azioni sismiche § 8.7.1. l'analisi sismica globale deve considerare con attenzione la *“la rigidità e resistenza degli orizzontamenti, e all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali con gli orizzontamenti e tra loro”*. Se gli orizzontamenti non sono sufficientemente rigidi nel proprio piano si deve procedere all'analisi delle singole pareti, mentre nel caso di solaio rigido si può effettuare un'analisi globale mediante l'analisi statica non lineare.

La circolare al C8.7.1 indica che nell'analisi globale la ripartizione delle azioni orizzontali dipende dalla rigidità del solaio nel proprio piano e dai loro collegamenti con le murature. I solai sono modellabili come infinitamente rigidi, con rigidità finita e con rigidità trascurabile e la loro rigidità influenza la ripartizione delle forze sugli elementi verticali. Nel caso di rigidità trascurabile l'analisi viene svolta separatamente per ogni parete. Il concetto è ripreso anche nel C8.7.1.3.1 per gli edifici singoli e nel C8.7.1.3.2 per gli edifici in aggregato.

Nel caso di intervento su edifici semplici C8.7.1.3.3 è necessario che dopo l'intervento *“i solai siano in grado di svolgere la funzione di diaframma di piano, siano ben collegati alle pareti e siano in grado di evitare il ribaltamento delle pareti fuori dal loro piano”*

Negli criteri per gli interventi di consolidamento C8.7.4.1 è auspicato la formazione di diaframmi di piano e l'inserimento di connessioni efficaci tra diaframmi e pareti.

Per le costruzioni con isolamento e/o dissipazione viene indicato (§ 7.10.4.3) che le strutture del piano di posa degli isolatori e sia la strutture del piano immediatamente sopra devono essere progettate per assicurare un comportamento rigido.

Il tema dei diaframmi non è trattato dalla norma in maniera uniforme per tutte le tipologie strutturali. Il criterio di sovrarresistenza è prescritto solamente per le strutture in c.a., prefabbricate e in legno. Per le strutture prefabbricate, il § 7.4.5.3 richiede che per gli elementi strutturali si applichino le regole degli elementi non prefabbricati. Quindi, anche se non indicato esplicitamente, la soletta in c.a., i cordoli e i correnti dovrebbero essere progettati come sovrarresistenti. Per le connessioni piastra-piastra o piastra-trave la richiesta di sovrarresistenza è indicata esplicitamente. Per le costruzioni in muratura, in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo non ci sono indicazioni esplicite di richiesta di progettazione del diaframma sovrarresistente. Nei criteri generali di progettazione dei sistemi strutturali §. 7.2.2 sarebbe auspicabile inserire un'indicazione quantitativa per la determinazione del solaio rigido, esplicitando inoltre la richiesta di progettare il diaframma di piano sovrarresistente per tutte le tipologie strutturali.

La sezione successiva chiarisce le indicazioni presenti nella norma e fornisce cenni utili per l'analisi dei diaframmi.

ANALISI DEI DIAFRAMMI

SCHEMI SEMPLIFICATI

Lo schema più semplice per rappresentare il diaframma è quello di trave semplicemente appoggiata (Figura 3). Lo schema è molto utile per comprendere il funzionamento del diaframma e il ruolo delle componenti e per verificare le analisi più complesse.

L'azione orizzontale sull'impalcato, w induce un momento, M e un taglio sollecitante, V . Il momento viene assorbito dai correnti attraverso sforzi di trazione e compressione, mentre il taglio nel piano è resistito dalla lastra. I ripartitori devono essere in grado di resistere alle forze massime di trazione, T_{max} e compressione, C_{max} e raccolgono le forze di taglio dai diaframmi e le trasferiscono agli elementi verticali e viceversa. I ripartitori e i correnti possono essere realizzati con barre di armatura o da travi, se si usano porzioni di lastra per raccogliere le forze si assume che i correnti e i ripartitori siano distribuiti nella lastra.

Le connessioni hanno il compito di trasferire il taglio agli elementi verticali resistenti e di connettere la lastra ai correnti e ai ripartitori. La tensione tangenziale v trasferita ai ripartitori è uniforme, mentre quella trasferita ai correnti varia linearmente con il taglio. Figura 3 indica le equazioni per derivare le sollecitazioni sulle componenti.

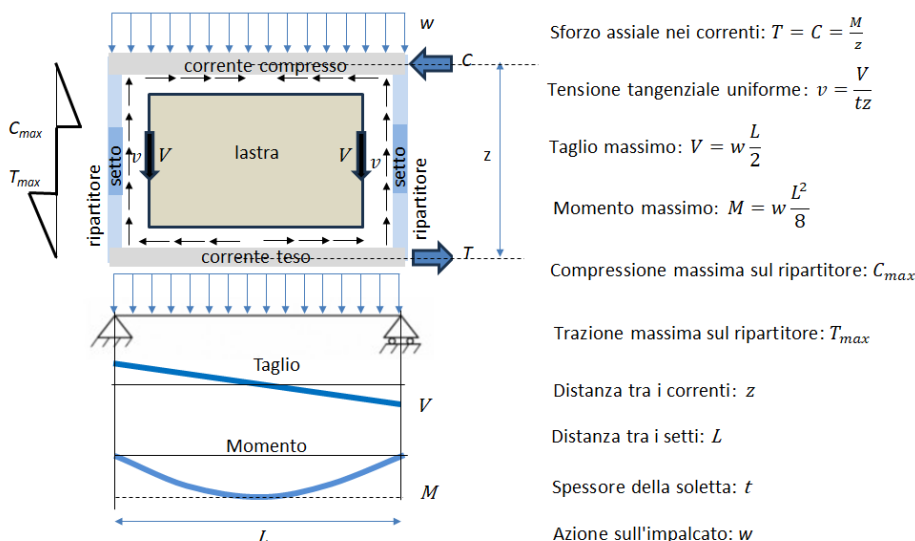


Figura 3 – Schema a trave appoggiata

Lo schema può essere idealmente pensato come una trave a doppio T semplicemente appoggiata, dove l’anima porta il taglio (lastra), le flange portano le sollecitazioni flettenti (correnti), il collegamento tra l’anima e la flangia è realizzato mediante saldature (connessioni correnti-lastra) e la trave è collegata agli appoggi attraverso delle opportune connessioni (connessioni ripartitori-lastra). La distribuzione delle forze della trave appoggiata può essere reso più accurato tenendo in conto le rigidzze degli elementi verticali (Figura 4).

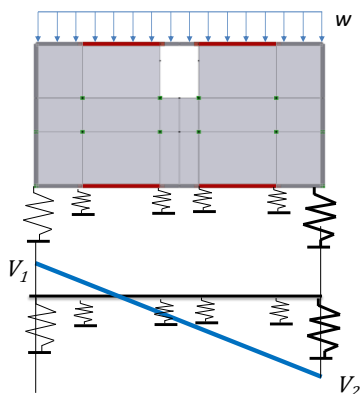


Figura 4 – Schema su molle

In questo caso la ripartizione delle sollecitazioni sul diaframma e sugli elementi verticali è funzione delle rigidzze orizzontali degli elementi verticali.

MODELLI AGLI ELEMENTI FINITI

Il modello ad elementi finiti è il più adatto per trattare realisticamente i casi generici e irregolari in particolare in presenza di forze di trasferimento molto elevate o aperture grandi e rampe.

Lo schema indicato nei modelli analitici assume che l’armatura necessaria a portare gli sforzi di trazione sia concentrata nei ripartitori e nei correnti, mentre la lastra ha solo il ruolo di resistere al taglio. Nella realtà la lastra porta anche parte delle sollecitazioni flessionali, oltre a quelle di taglio, non scomponendo le forze il modello agli elementi finiti rappresenta una soluzione più realistica. Il modello del diaframma può essere realizzato con elementi monodimensionali (travi e/o bielle) o con elementi bidimensionali (membrane o shell). Le mesh del diaframma devono essere discretizzate correttamente. Le dimensioni delle mesh dovrebbero essere indicativamente 1/10-1/5 della luce delle campate o della lunghezza del setto e dovrebbero essere infittite dove necessario.

Figura 5 mostra un edificio regolare a 5 piani in c.a., 10 m x 18.5 m in pianta, con un’apertura realizzata per il corpo scala. Il solaio è composto da una soletta bidirezionale di 30 cm, le travi del telaio sismo resistente sono 30 cm di larghezza e 60 cm di altezza. L’edificio è soggetto ad un’azione orizzontale. Le travi e pilastri sono modellati con elementi trave, mentre il solaio è modellato utilizzando elementi shell.

La figura mostra i risultati relativi al primo piano. I ripartitori sono sollecitati da sforzi assiali di trazione e compressione che variano linearmente. I correnti sono sottoposti a sforzi di trazione e compressione che contrastano il momento esterno. L’andamento delle tensioni membranali nella direzione 11, σ_{11} indica che la lastra porta parte delle sollecitazioni flessionali. In particolare, vicino al corpo scala è evidente un elevato sforzo di trazione causato dall’apertura. Il taglio membranale massimo, σ_{12} è localizzato in prossimità dei setti.

Le connessioni trasferiscono il taglio della lastra ai setti sismo-resistenti e collegano i correnti alla lastra. Le sollecitazioni per le verifiche della lastra e delle connessioni possono essere ottenute integrando le tensioni membranali. E' possibile dimensionare i correnti e i ripartitori per assorbire tutti gli sforzi assiali e dimensionare la lastra per portare solamente le azioni di taglio nel piano.

Oltre che per diaframmi irregolari, i modelli a elementi finiti possono essere molto utili per valutare la resistenza del diaframma di edifici esistenti. Per gli edifici in c.a. le componenti da verificare sono:

- lastra. Se le sollecitazioni taglianti nel piano sono inferiori alla resistenza a taglio della cappa esistente la lastra può essere considerata resistente anche senza armatura.
- Correnti e ripartitori. La capacità a trazione e compressione di questi elementi deve essere maggiore della domanda.
- Connessioni. Se la capacità a taglio dell'interfaccia tra i correnti/ripartitori e la lastra è maggiore della domanda non sono necessarie armature aggiuntive.

Per gli edifici in muratura oltre a una lastra sufficientemente resistente, è fondamentale la presenza di cordoli resistenti a trazione e a compressione per fungere da ripartitori e correnti. Inoltre, la presenza di connettori meccanici per collegare i cordoli e la muratura alla lastra è indispensabile, non è infatti possibile affidare la resistenza del collegamento al solo attrito.

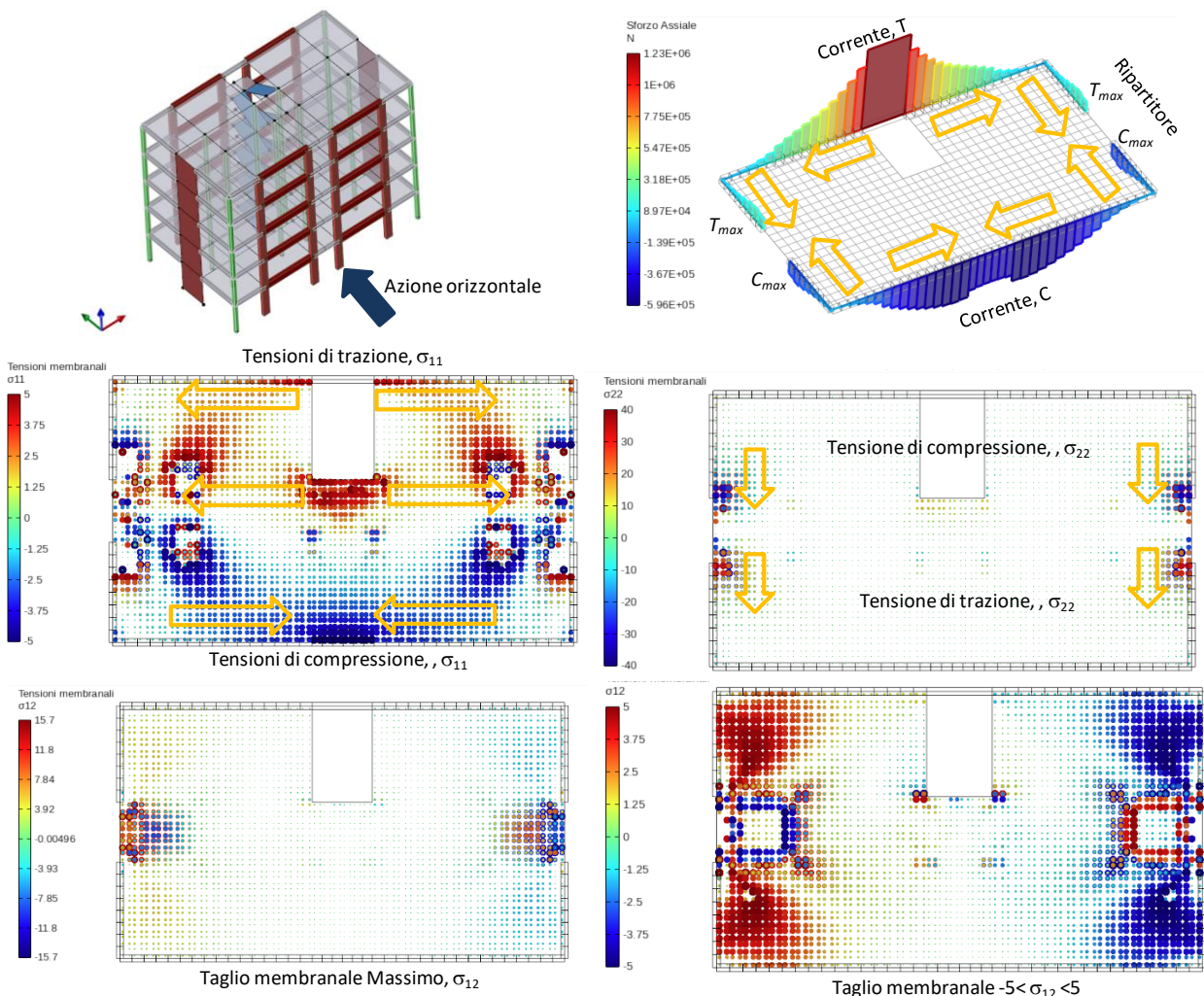


Figura 5 – Soluzione agli elementi finiti (Azioni assiali -Newton, Tensioni - MPa)

CONCLUSIONI

Questo breve articolo illustra il comportamento e il ruolo dei diaframmi di piano e delle sue componenti. L'articolo non è esaustivo, una trattazione completa richiederebbe infatti molto più spazio, tuttavia evidenzia alcune importanti osservazioni:

- l'analisi del diaframma deve essere sufficientemente accurata per descrivere come le forze si sviluppano nell'edificio e nel diaframma. Per edifici semplici, senza discontinuità e in zone a non elevata sismicità il modello semplificato a trave può descrivere efficacemente il comportamento del diaframma. Per edifici con solai con grandi aperture, edifici irregolari e multipiano sarebbe auspicabile sviluppare l'intero modello considerando la flessibilità del diaframma. Nel caso nel diaframma siano presenti aperture grandi è necessario eseguire un corretto dimensionamento delle componenti. In particolare nel caso ci siano elevati sforzi assiali di trazione si devono prevedere dei cordoli o armature apposite.
- Il posizionamento di elementi sismo-resistenti a grande distanza richiede di eseguire valutazioni attente. In particolare, nel caso di rinforzo sismico di edifici esistenti mediante pareti o esoscheletri esterni è fondamentale calcolare correttamente la rigidezza e la resistenza del diaframma, poiché le sollecitazioni indotte dall'azione orizzontale potrebbero essere molto elevate sia sulla lastra che sulle connessioni. Inoltre, è importante sottolineare che spesso la soletta negli edifici esistenti non è armata e questo rende il problema delle soluzioni esterne ancora più complesso.
- Una corretta valutazione della rigidezza del diaframma permette di valutare con maggiore accuratezza la domanda sulle componenti, questo è vero in particolare per i piani dove ci sono significative variazioni di massa o di rigidezza degli elementi verticali. La rigidezza del diaframma può essere ridotta per considerare la fessurazione del calcestruzzo (valori tipici sono dell'ordine di 0.25-0.5 della rigidezza elastica). Nel caso le sollecitazioni siano molto sensibili alla variazione di rigidezza del diaframma sarebbe opportuno fare valutazioni considerando valori di rigidezza diversi.
- La resistenza e la rigidezza del diaframma dipendono dall'azione orizzontale, dalla distanza tra gli elementi resistenti verticali e dalla capacità delle componenti del diaframma. Se tutte le componenti del diaframma hanno una capacità maggiore della domanda allora il diaframma è sufficientemente resistente. Non è detto che un diaframma resistente sia anche rigido. La resistenza è funzione della capacità delle componenti, mentre la rigidezza del diaframma è funzione del rapporto tra forza e spostamento e dovrebbe essere quantificata.
- Diaframmi flessibili generano spostamenti relativi nel piano a causa delle forze inerziali e degli spostamenti di interpiano degli elementi verticali. Gli elementi che non fanno parte del sistema sismo-resistente dovrebbero essere valutati per gli spostamenti addizionali del diaframma.
- La NTC2018 dovrebbe essere uniformata nei criteri di progettazione dei diaframmi per tutte le tipologie strutturali.