

Fondazioni su piani sfalsati: considerazioni sulle modalità di modellazione

Le unità strutturali oggetto di studio possono talvolta presentare condizioni altimetriche complesse: è questo il caso di edifici che si sviluppano su più quote in altezza, presentando quindi un reticolo di travi di fondazione su livelli sfalsati (situazione frequente negli aggregati edilizi).

In PCM è possibile modellare agevolmente anche tali casi, tenendo presente alcune regole sia per quanto concerne l'inserimento architettonico degli elementi, che per la loro caratterizzazione in ambito strutturale.

Dal punto di vista operativo, per il disegno delle travi di fondazione in ambito architettonico la strada corretta da percorrere è la seguente:

- Posizionarsi sul piano 'Fondazione', avendo attivato per il piano immediatamente superiore la proprietà 'Riferimento'='Si', in modo da vedere al piano di fondazione stesso la traccia delle pareti presenti sopra

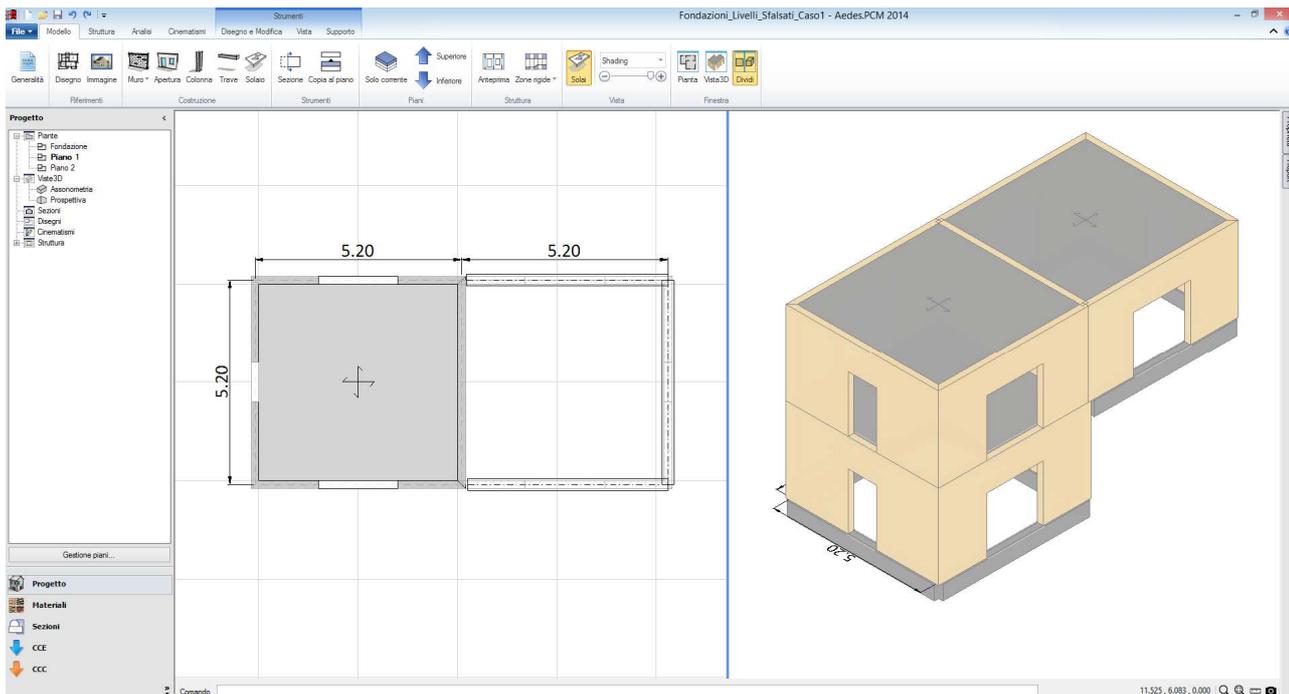
- Creare le travi di fondazione attraverso il comando 'Trave', selezionando i punti medi dei diversi maschi murari; automaticamente, se create al piano di fondazione, queste aste presenteranno correttamente la proprietà 'Posizione= in fondazione'

- Se invece vi sono dei **livelli di fondazione sfalsati**, come nei casi che intendiamo trattare in questo documento di approfondimento:

la procedura per le fondazioni a quota più bassa è la stessa indicata sopra;

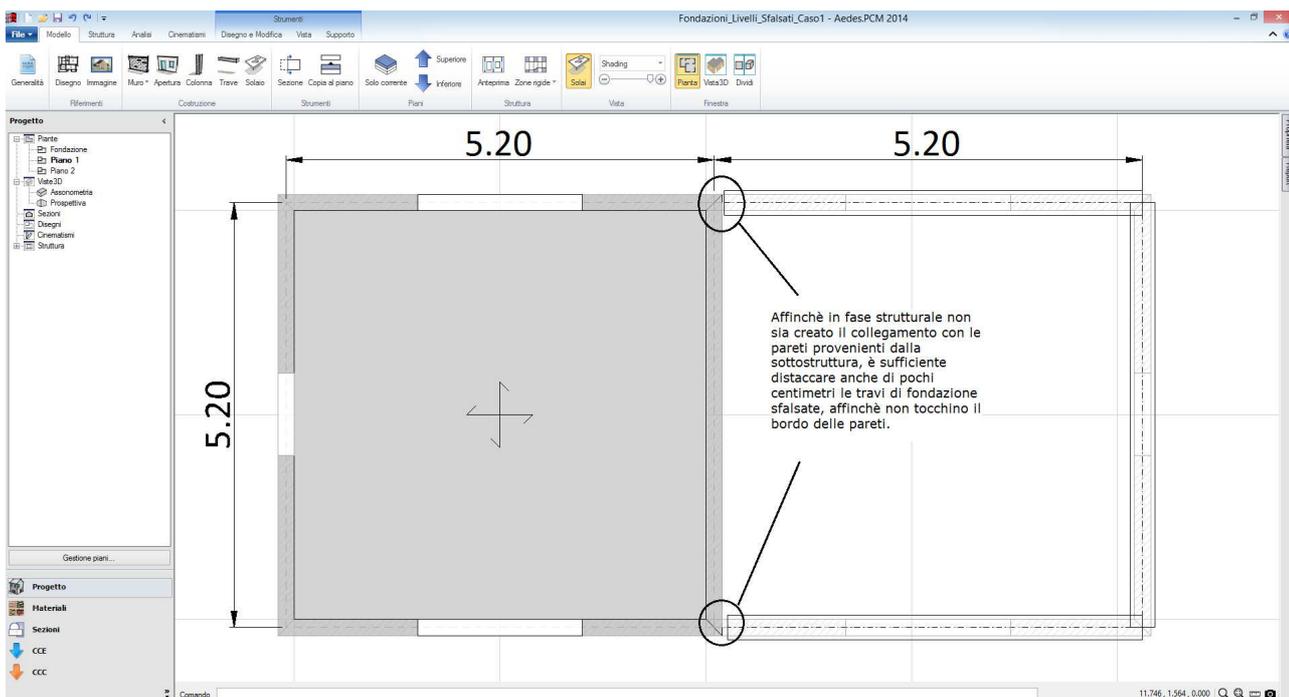
per quelle a quota superiore (sfalsata), le corrispondenti travi saranno create al piano di riferimento (quindi al piano sfalsato, non più allo stesso piano di fondazione), impostando manualmente la proprietà 'Posizione=in fondazione'.

Si faccia riferimento ad un semplice edificio (vd. figura seguente), costituito da due livelli fuori terra (H=3.00 m per entrambi i Livelli), con una quota di sfalsamento in fondazione pari all'intero piano terra; in pianta, vi sono due celle quadrate di dimensione 5.20m x 5.20m:



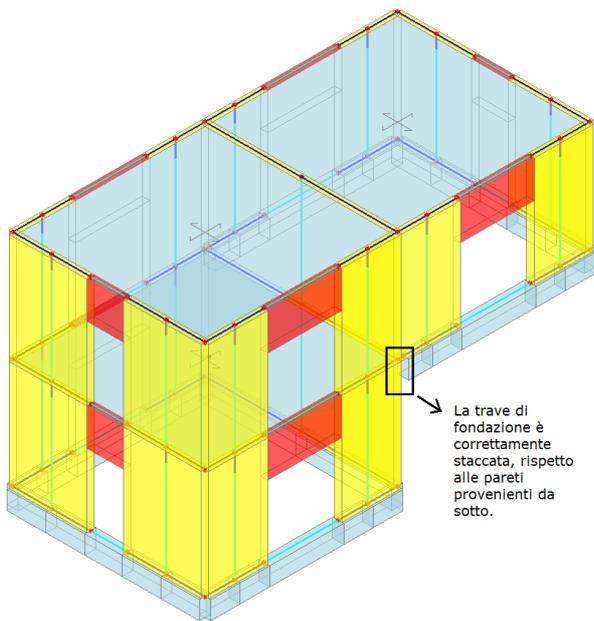
Nella vista 'Pianta', con il Piano 1 attivo, si può notare nella cella sinistra la presenza delle pareti perimetrali e del solaio di piano, nella parte destra invece le Travi di fondazione che sostengono le pareti 'sfalse' al Livello 2: le travi in oggetto sono normali travi in c.a., cui successivamente è stata modificata la proprietà 'Posizione', impostandola su 'In Fondazione'; questo aspetto indica al programma che quelle travi sono di fondazione, anche se disegnate al Livello 1 e quindi all'altezza di 3 metri.

In prima ipotesi, non si desidera che le suddette travi in fondazione risultino connesse con le pareti provenienti dalla sottostruttura: per ottenere questa caratteristica, nel modello architettonico le travi in oggetto non dovranno 'toccare' (in pianta) le pareti contigue, come precisato in figura seguente:



Si proceda quindi generando il modello strutturale; si avrà conferma che in effetti nella zona di sfalsamento

non vi è un collegamento tra gli elementi a quota sfalsata:

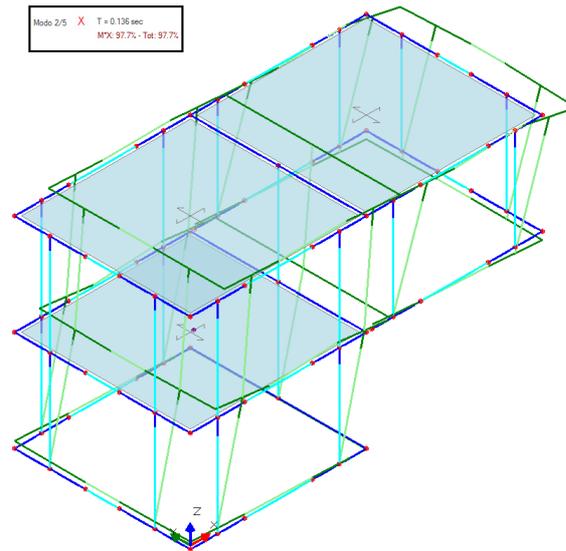
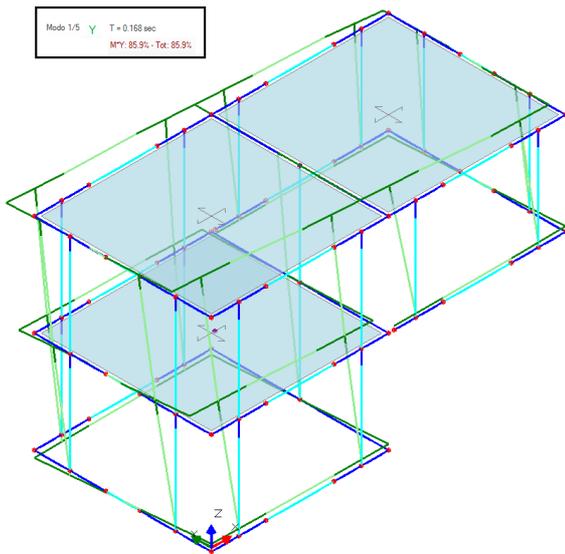


La scelta di non voler ottenere dei 'collegamenti rigidi fra piani diversi' è orientata ad evitare che tali collegamenti possano influire su un corretto comportamento dinamico della struttura, impedendo o bloccando parti della stessa durante i suoi modi di vibrare.

A questo punto, per comprendere le caratteristiche dinamiche di base, si esegue un'analisi modale, e se ne consultano i risultati. Il modello che fa riferimento a questa prima ipotesi viene allegato al presente documento, e denominato 'Fondazioni_Livelli_Sfalsati_Caso1.vdm1':

CASO 1: (Travi di fondazione a quota sfalsata distaccate dalla sottostruttura – Assenza di Solai sul piano di fondazione sfalsato):

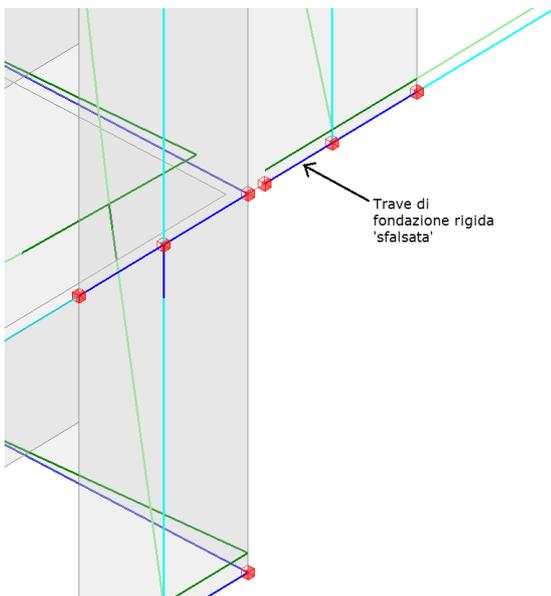
| Modo | Autovalore (rad/sec) ² | Frequenza (cicli/sec) | Periodo (sec) | Masse modali efficaci (% sulla massa totale) | | | Totale progressivo % | | | Quote masse modali efficaci (m) | | |
|------|--------------------------------------|--------------------------|------------------|---|--------|-------|----------------------|--------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| | | | | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 1 | 1396.970 | 5.949 | 0.168 | 0.001 | 85.884 | 0.000 | 0.001 | 85.884 | 0.000 | 4.697 | 4.790 | 0.000 |
| 2 | 2130.568 | 7.346 | 0.136 | 97.732 | 0.001 | 0.000 | 97.733 | 85.885 | 0.000 | 4.744 | 4.777 | 0.000 |
| 3 | 4937.856 | 11.184 | 0.089 | 0.000 | 6.471 | 0.000 | 97.733 | 92.356 | 0.000 | 4.515 | 5.536 | 0.000 |
| 4 | 7728.708 | 13.992 | 0.071 | 2.267 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 92.356 | 0.000 | 4.271 | 4.786 | 0.000 |
| 5 | 14692.372 | 19.292 | 0.052 | 0.000 | 6.898 | 0.000 | 100.000 | 99.254 | 0.000 | 3.079 | 4.016 | 0.000 |



I risultati dell'Analisi Modale indicano la presenza di cinque modi di vibrare, dei quali:

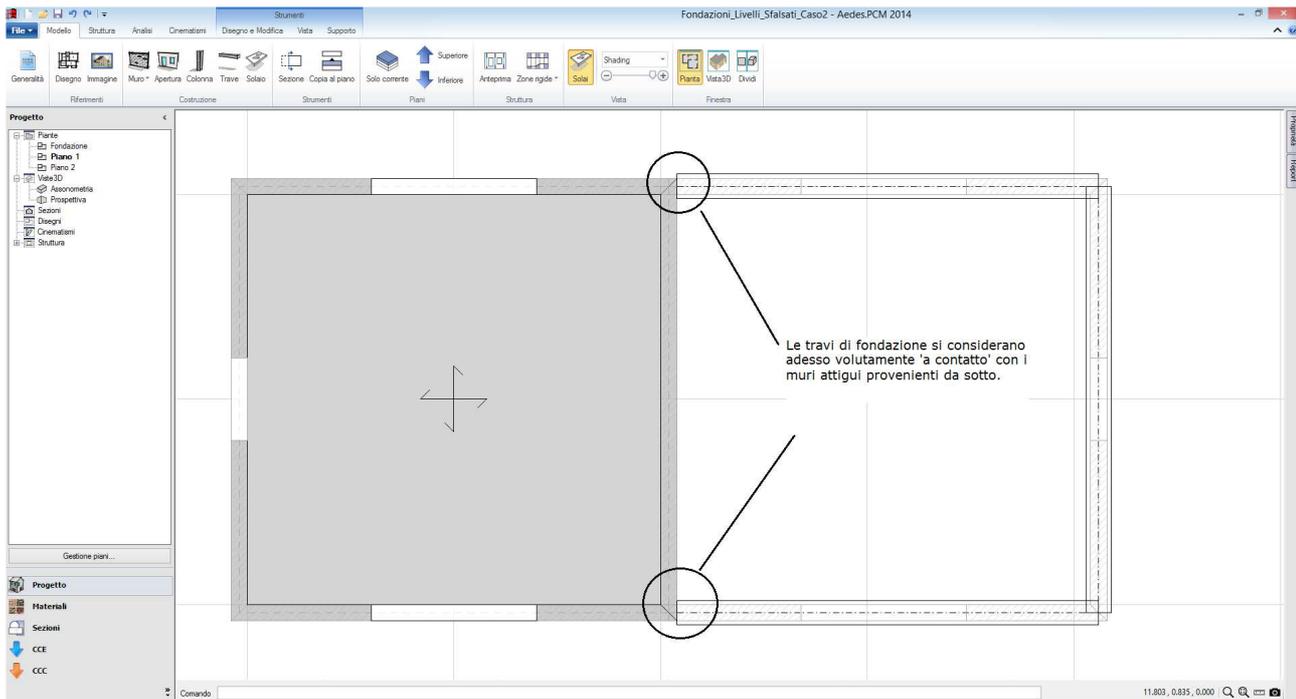
- i numeri 1 e 2 sono i principali, per quanto riguarda la % di massa partecipante, rispettivamente in direzione Y ed in direzione X;
- i relativi periodi di vibrazione sono maggiori di 0.100 sec, rispettivamente 0.168 e 0.136.

Da notare inoltre come, vicino alla zona di sfalsamento, la trave di fondazione sfalsata sia libera di muoversi in modo indipendente rispetto alla 'scatola' di pareti attigue sempre del piano1:

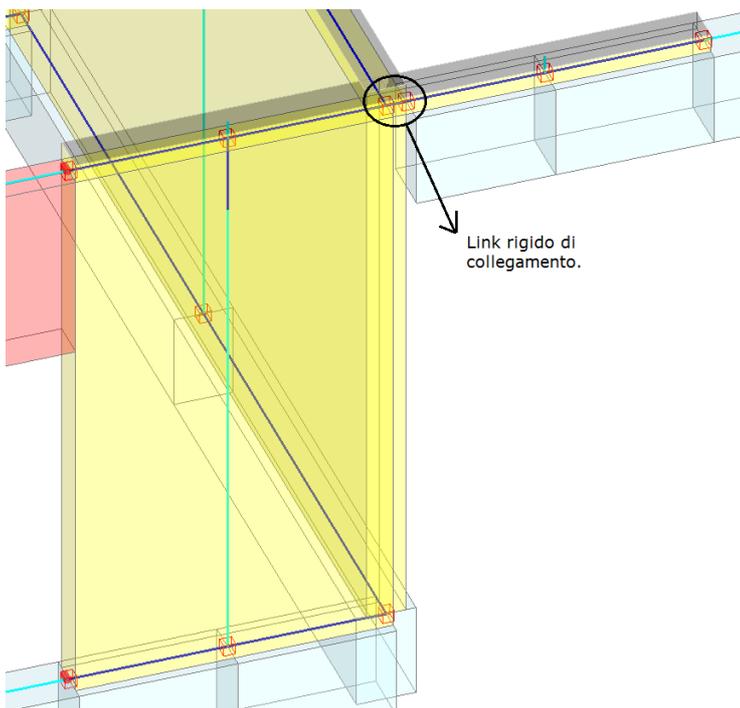


Si supponga adesso di voler comunque mantenere collegate le travi di fondazione sfalsate alle pareti attigue che provengono da sotto (è questo il secondo caso; si allega il modello relativo denominato 'Fondazioni_Livelli_Sfalsati_Caso2.vdm!').

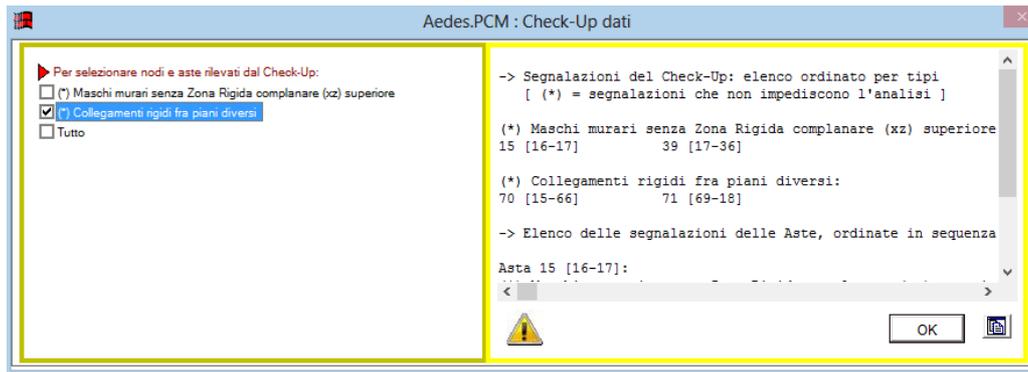
Per ottenere in automatico il collegamento in fase strutturale, è sufficiente accostare in ambiente architettonico le travi di fondazione sfalsate, affinché tocchino la parete esterna delle pareti attigue, come illustrato in figura seguente:



Si genera quindi il relativo modello strutturale, notando che in effetti le travi sono adesso ricollegate tramite link rigidi alla scatola muraria attigua:



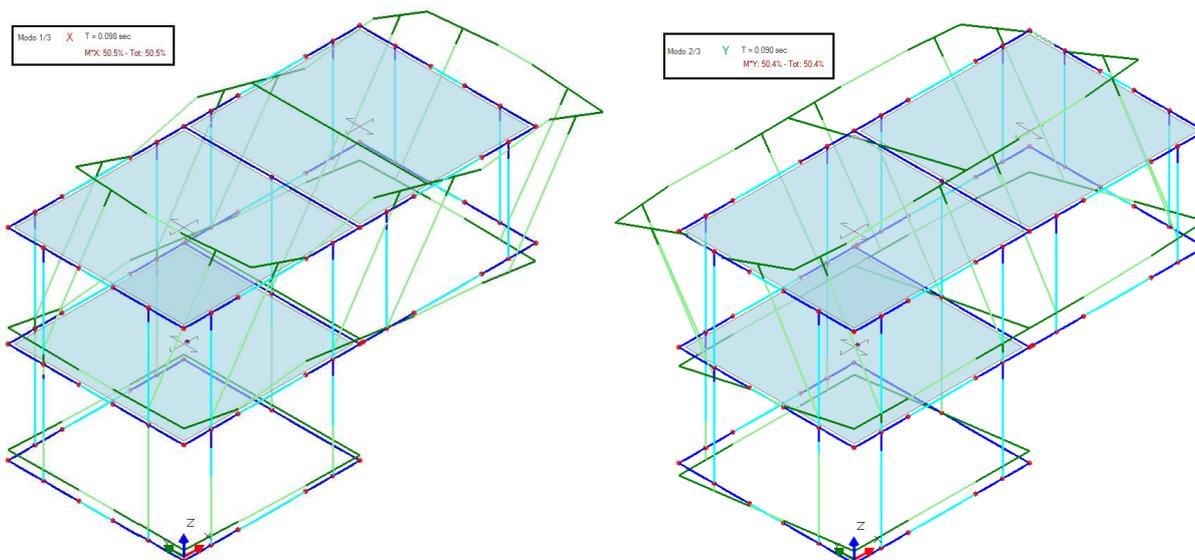
Poiché le travi di fondazione sono posizionate per definizione sempre al Livello 0, mentre i nodi della scatola muraria proveniente da sotto appartengono al Livello 1, il check-Up Dati evidenzierà tale caratteristica con la seguente segnalazione: (*) 'Collegamenti Rigidi fra piani diversi':



Trattandosi di una segnalazione preceduta da (*), essa non impedisce il proseguire dell'analisi; potrebbe però influenzare i risultati, ed è per questo che viene rilevata dal Check-Up Dati. Si esegua l'analisi modale, e si confrontino i risultati ottenuti in questo caso:

CASO 2: (Travi di fondazione a quota falsata collegate alla sottostruttura; Collegamenti rigidi fra piani diversi Incastrati-Incastrati; Assenza di Solai sul piano di fondazione falsato):

| Modo | Autovalore (rad/sec) ² | Frequenza (cicli/sec) | Periodo (sec) | Masse modali efficaci (% sulla massa totale) | | | Totale progressivo % | | | Quote masse modali efficaci (m) | | |
|------|--------------------------------------|--------------------------|------------------|---|--------|-------|----------------------|--------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| | | | | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 1 | 4098.501 | 10.189 | 0.098 | 50.504 | 0.000 | 0.000 | 50.504 | 0.000 | 0.000 | 6.000 | 6.000 | 0.000 |
| 2 | 4859.018 | 11.094 | 0.090 | 0.000 | 50.445 | 0.000 | 50.504 | 50.446 | 0.000 | 6.000 | 6.000 | 0.000 |
| 3 | 7459.721 | 13.746 | 0.073 | 0.000 | 0.058 | 0.000 | 50.504 | 50.504 | 0.000 | 6.000 | 6.000 | 0.000 |



Dai risultati si nota effettivamente un cambiamento abbastanza significativo nel comportamento della struttura:

- vengono adesso calcolati solo tre modi di vibrare (non più 5), di cui i numeri 1 e 2 sono i principali, stavolta invertiti, rispettivamente in X (primo) ed in Y (secondo), e si osserva anche una brusca variazione della massa partecipante (adesso in X e Y vi è circa lo stesso valore, attorno al 50.5%; nel Caso1 precedente si otteneva l'85% circa in Y ed il 98% circa in X) ;
- anche i rispettivi periodi di vibrazione diminuiscono, attestandosi a valori poco più piccoli del valore 0.100 sec, che in precedenza invece era notevolmente superato, sia in direzione X che in direzione Y.

Se ne deduce quindi che il collegamento di tali travi falsate con la scatola muraria proveniente da sotto, applicato attraverso link rigidi, mantenuti con vincolamento interno di incastro-incastro, conduce la struttura ad essere maggiormente 'rigida' rispetto al caso 1, ed in generale il comportamento reale tenderà ad assomigliare al caso di assenza di collegamento.

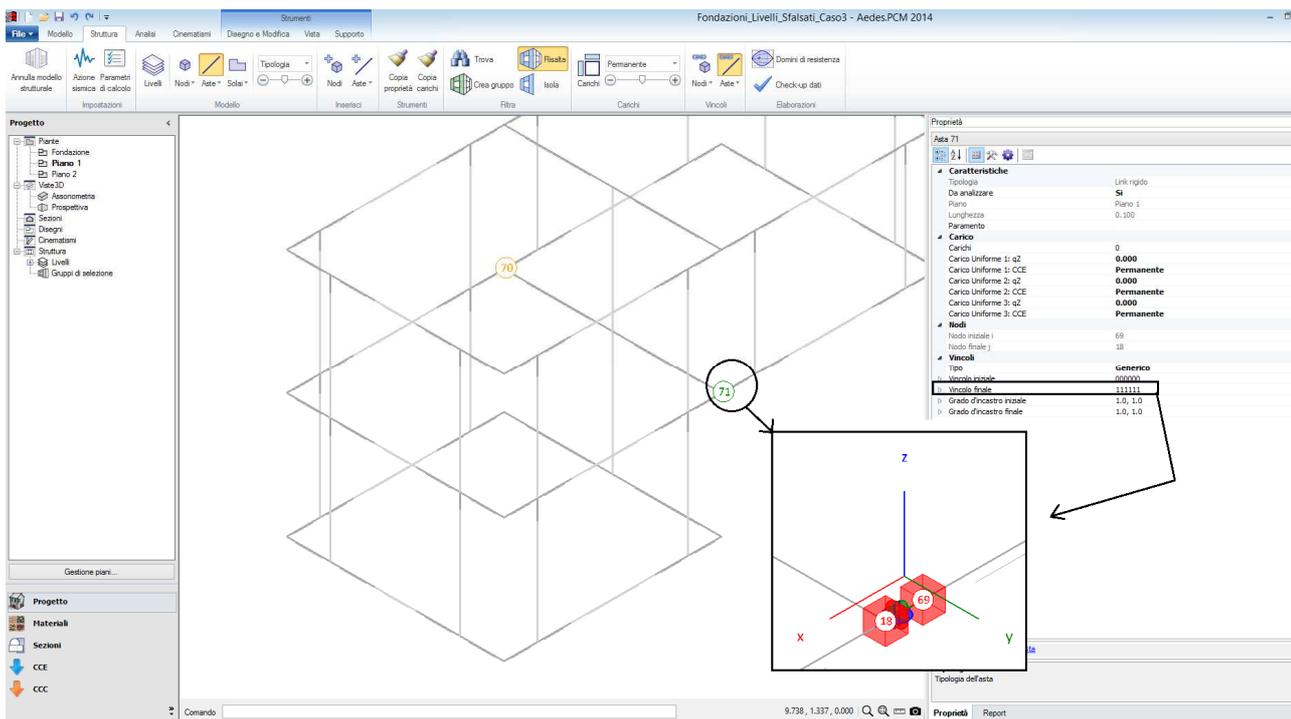
Per interpretare correttamente il comportamento della struttura, si possono scegliere due strade:
 (a) adottare definitivamente la modellazione proposta per il Caso 1, ovvero tornare a distaccare le travi sfalsate;
 (b) oppure svincolare opportunamente questi link di connessione.

L'opzione (b) presenta particolare interesse, perché - a differenza della (a) - contiene comunque le aste di collegamento ed è quindi possibile considerare maglie chiuse necessarie per la definizione di eventuali solai di fondazione.

Si esamina anzitutto l'opzione (b), identificata come Caso 3, in assenza di solai di fondazione: il modello allegato al presente documento è denominato 'Fondazioni_Livelli_Sfalsati_Caso3.vdmf'.

Per consentire che la struttura possa vibrare come nel caso 1, ovvero in modo naturale e non 'vincolato' tra le due 'porzioni' (destra e sinistra), l'ipotesi migliore è liberare tutte le componenti di vincolo interno dei link di contatto; ovviamente ciò deve essere fatto ad un solo nodo dei link rigidi, altrimenti insorgerebbero labilità locali: il nodo da sconnettere è preferibilmente il nodo di contatto tra le due strutture sfalsate.

Si riprenda quindi la stessa struttura di cui al caso 2, selezionando i due link di 'contatto', e svincolando il nodo a contatto con la scatola muraria proveniente da sotto (si visioneranno quindi gli assi locali, pulsante 'F4' da tastiera, per capire quale sia il nodo da svincolare, se iniziale o finale): in figura seguente si evidenzia il caso del link 71, definito tra i nodi 69 e 18:

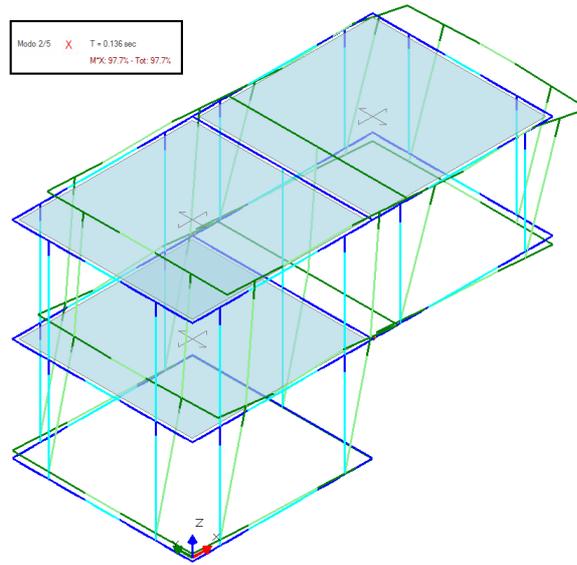
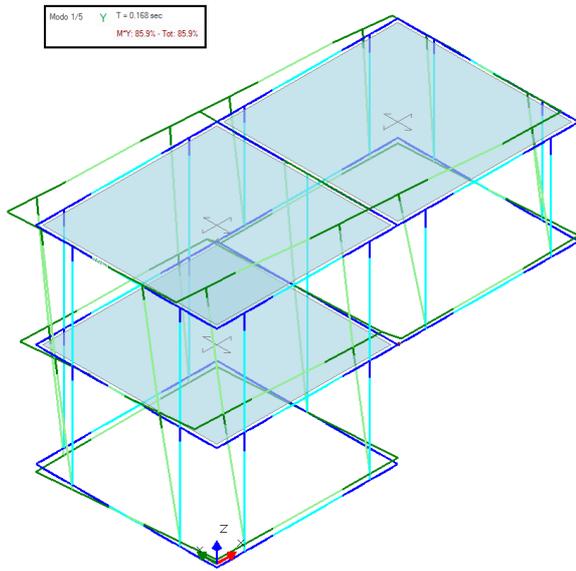


Condotta tale modifica, si rilancia quindi l'analisi modale, confrontando nuovamente i risultati ottenuti:

CASO 3: (Travi di fondazione a quota sfalsata collegate alla sottostruttura; Collegamenti rigidi fra piani diversi svincolati nel nodo iniziale/finale con vincolamento 'Liberò' (000000-111111); Assenza di Solai sul piano di fondazione sfalsato):

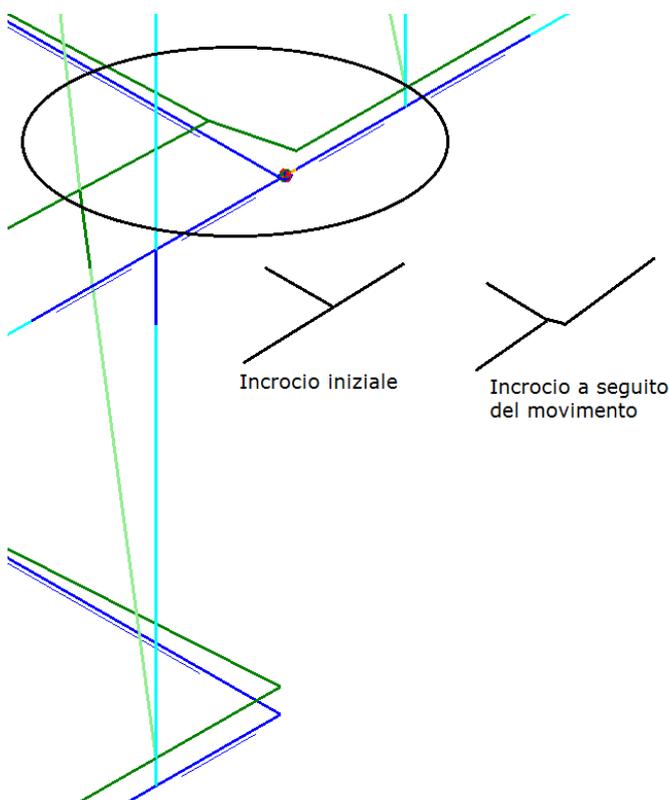
| Modo | Autovalore (rad/sec) ² | Frequenza (cicli/sec) | Periodo (sec) | Masse modali efficaci (% sulla massa totale) | | | Totale progressivo % | | | Quote masse modali efficaci (m) | | |
|------|--------------------------------------|--------------------------|------------------|---|--------|-------|----------------------|--------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| | | | | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 1 | 1397.800 | 5.950 | 0.168 | 0.001 | 85.877 | 0.000 | 0.001 | 85.877 | 0.000 | 4.682 | 4.789 | 0.000 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|--------|-------|--------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | 2131.063 | 7.347 | 0.136 | 97.733 | 0.001 | 0.000 | 97.734 | 85.877 | 0.000 | 4.744 | 4.816 | 0.000 |
| 3 | 4938.798 | 11.185 | 0.089 | 0.000 | 6.484 | 0.000 | 97.734 | 92.362 | 0.000 | 4.469 | 5.537 | 0.000 |
| 4 | 7728.749 | 13.992 | 0.071 | 2.266 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 92.362 | 0.000 | 4.271 | 4.900 | 0.000 |
| 5 | 14693.210 | 19.292 | 0.052 | 0.000 | 6.890 | 0.000 | 100.000 | 99.251 | 0.000 | 3.126 | 4.017 | 0.000 |



Come mostrano i valori dei periodi e delle masse partecipanti, la situazione è praticamente uguale al Caso 1, prima situazione descritta in questo documento, e considerata correttamente rappresentativa del comportamento reale.

L'applicazione degli svincolamenti a questi link ha quindi permesso i movimenti che nel caso di completi incastri interni (caso 2) risultavano contrastati. Anche le deformate mostrano come il link di contatto si deformi liberamente seguendo lo spostamento indotto dalla porzione di struttura di destra:



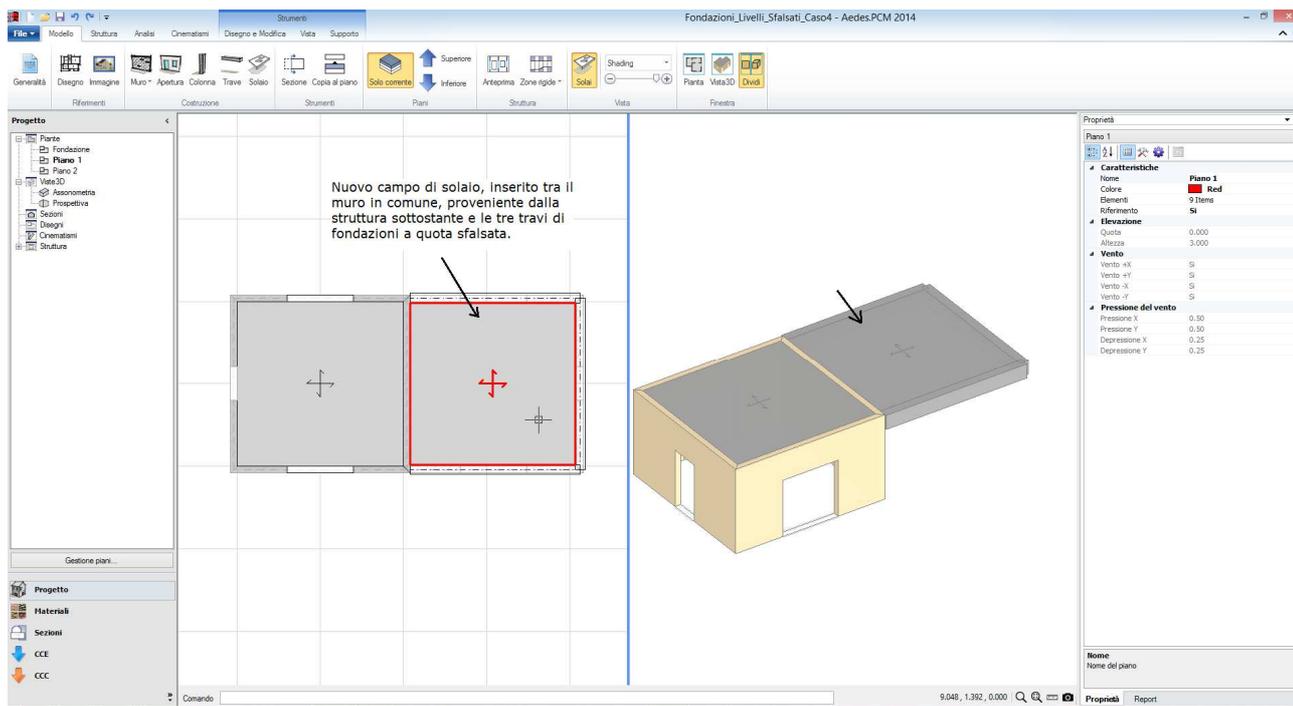
La soluzione proposta per il caso 3 quindi si dimostra equivalente al caso 1, e rispetto al caso 1 ha il

vantaggio di poter considerare un eventuale campo di solaio definito direttamente internamente alle Travi di Fondazione sfalsate.

Spesso i solai al livello di fondazione non vengono modellati, perché non sono dei veri e propri solai, ma per esempio sono costituiti solo da solette gettate in opera su riempiimenti dei vespai fra le travi di fondazione. Quando però anche l'orizzontamento di base presenta le caratteristiche di un vero solaio (ad es. un solaio in laterocemento, ordito sulle travi di fondazione), trascurarne la presenza in fase strutturale, e quindi il proprio carico, potrebbe non risultare opportuno.

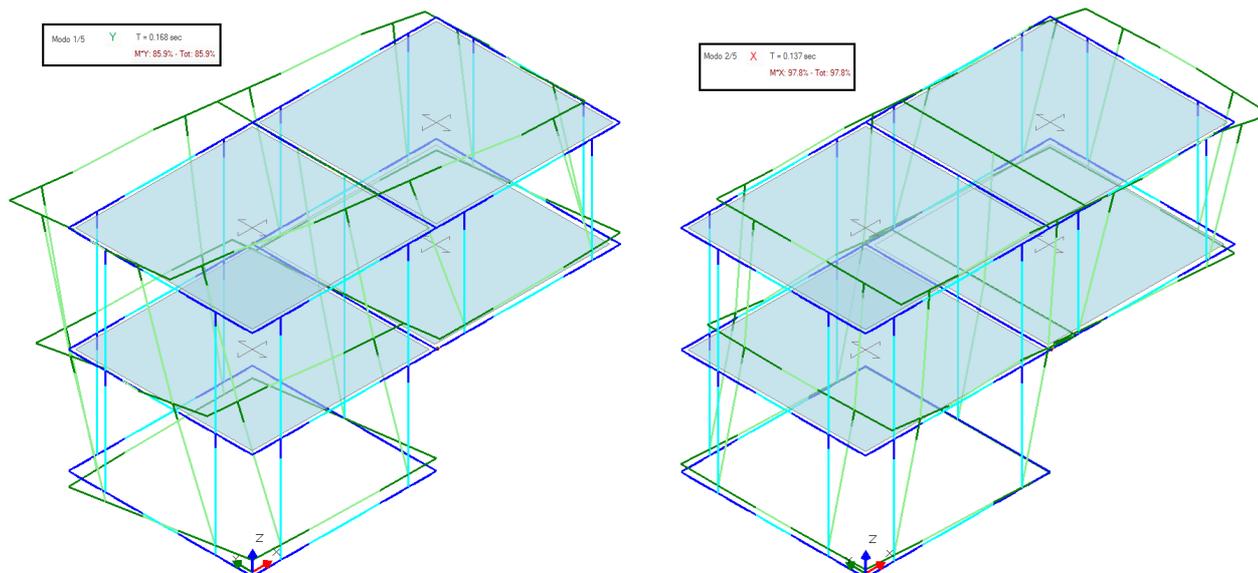
La chiusura della maglia della fondazione sfalsata, che si ottiene facendo toccare le travi sfalsate con i muri sottostanti, permette di poter inserire un campo di solaio anche in questa porzione sfalsata: il contemporaneo svincolamento dei link di collegamento consentirà l'interpretazione del corretto comportamento. Questa modifica viene condotta nell'ultimo modello allegato, denominato 'Fondazioni_Livelli_Sfalsati_Caso4.vdmf'.

Visionando la Pianta della struttura, a partire dal caso 3 si opera nel modello architettonico aggiungendo semplicemente un campo di solaio in fondazione; rigenerando il modello strutturale, si 'recuperano' le proprietà del precedente modello strutturale (in questo modo si mantengono in input gli svincolamenti dei link di contatto dei Caso 3, precedentemente introdotti):



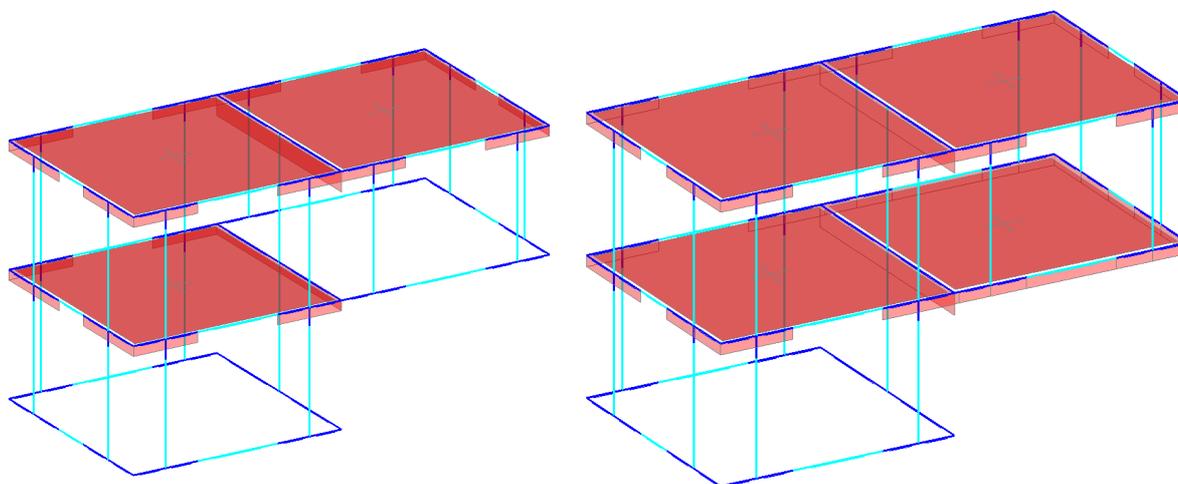
CASO 4: (Travi di fondazione a quota sfalsata collegate alla sottostruttura; Collegamenti rigidi fra piani diversi svincolati nel nodo iniziale/finale con vincolamento 'Libero' (000000-111111); Presenza del Solaio sul piano di fondazione sfalsato). I risultati dell'analisi modale sono i seguenti:

| Modo | Autovalore (rad/sec) ² | Frequenza (cicli/sec) | Periodo (sec) | Masse modali efficaci (% sulla massa totale) | | | Totale progressivo % | | | Quote masse modali efficaci (m) | | |
|------|--------------------------------------|--------------------------|------------------|---|--------|-------|----------------------|--------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| | | | | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| 1 | 1397.907 | 5.951 | 0.168 | 0.001 | 85.878 | 0.000 | 0.001 | 85.878 | 0.000 | 4.665 | 4.784 | 0.000 |
| 2 | 2118.303 | 7.325 | 0.137 | 97.819 | 0.001 | 0.000 | 97.820 | 85.878 | 0.000 | 4.726 | 4.811 | 0.000 |
| 3 | 4935.260 | 11.181 | 0.089 | 0.000 | 6.570 | 0.000 | 97.820 | 92.448 | 0.000 | 4.401 | 5.610 | 0.000 |
| 4 | 7642.953 | 13.914 | 0.072 | 2.180 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 92.448 | 0.000 | 4.276 | 4.750 | 0.000 |
| 5 | 14602.962 | 19.233 | 0.052 | 0.000 | 7.336 | 0.000 | 100.000 | 99.785 | 0.000 | 4.621 | 4.059 | 0.000 |



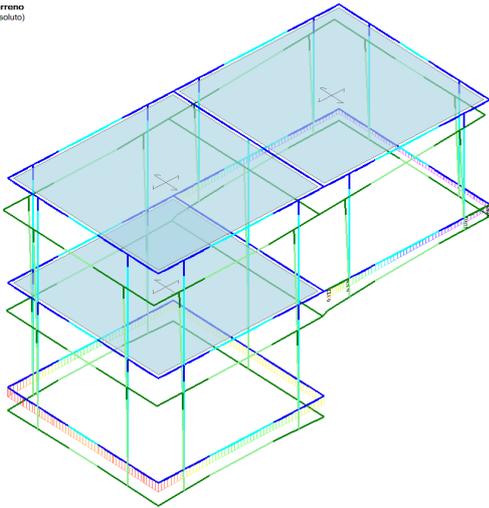
I risultati evidenziano che l'aggiunta del solaio in oggetto non modifica sensibilmente le caratteristiche dei modi di vibrare della struttura rispetto al Caso 3, dove mancava il solaio.

La deformata conferma lo stesso andamento, quindi la struttura non è impedita nel movimento; mentre i carichi del nuovo solaio sono comunque regolarmente considerati, come mostrato sia a livello di visualizzazione dei carichi sulle aste, sia dopo un'analisi Statica Non Sismica, controllando l'entità delle tensioni sul terreno, che aumentano lievemente con riferimento ai massimi valori per la porzione 'sfalsata', come mostrato in figura seguente (la massima tensione passa da circa 0.122 MPa a 0.132MPa):



Tensione sul terreno
Nivel (Valore assoluto)

- 0.064 - 0.071
- 0.071 - 0.078
- 0.078 - 0.085
- 0.085 - 0.091
- 0.091 - 0.098
- 0.098 - 0.105
- 0.105 - 0.112
- 0.112 - 0.118
- 0.118 - 0.125
- 0.125 - 0.132



Tensione sul terreno
Nivel (Valore assoluto)

- 0.077 - 0.082
- 0.082 - 0.088
- 0.088 - 0.093
- 0.093 - 0.099
- 0.099 - 0.104
- 0.104 - 0.110
- 0.110 - 0.115
- 0.115 - 0.121
- 0.121 - 0.126
- 0.126 - 0.132

