A.D. 1308 unipg
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE

METAL PROFILE PRODUCTS
PROFILUMBRA®
BORGNINI GROUP

Caratterizzazione teorica, numerica e sperimentale di profilati metallici a freddo nell'ambito delle normative vigenti

RELAZIONE GENERALE FINALE

PARTE 2

Simulazione numerica prova di carico su travi profilate metalliche ORP HP

Rev. 04/07/2023

GRUPPO DI LAVORO:

Prof. Ing. Massimiliano Gioffrè (Resp.scientifico)

Prof. Ing. Marco Mezzi (prec. Resp.scientifico)

Dott.Ing. Alessandro Fulco

Prof.Ing. Nicola Cavalagli

Perugia, Luglio 2023

Indice

1. Premessa 2
2. Descrizione dei profili analizzati 3
3. Analisi elastica 5
4. Simulazione delle prove sperimentali 6
4.1 Introduzione 6
4.2 Schema di carico e modellazione numerica 6
4.3 Analisi dei risultati per il profilo ORP HP 220 10
4.4 Analisi dei risultati per il profilo ORP HP 280 17
5. Conclusioni 22

1. Premessa

Il presente lavoro riguarda le analisi numeriche per la valutazione della risposta meccanica di profilati ORP HP formati a freddo di produzione Profilumbra che sono stati classificati nella prima parte delle attività relative alla convenzione *"Caratterizzazione teorica, numerica e sperimentale di profilati metallici a freddo nell'ambito delle normative vigenti"*.

Lo studio ha l'obiettivo di simulare prove sperimentali di flessione su quattro punti di due profili ORP HP derivanti da modifiche della sezione dei profili ORP EV per esigenze commerciali e architettoniche già esistenti e in produzione.

2. Descrizione dei profili analizzati

I profili analizzati nella presente relazione appartengono alla famiglia ORP HP, derivanti da modifiche delle sezioni ORP EV, e in particolare i profili i profili ORP HP 220 con spessore 2.5 mm e ORP HP 280 con spessore 3 mm.

Il profilo ORP HP 220 presenta due bugne di irrigidimento nella flangia superiore e una bugna su ciascuna anima, mentre l'ORP HP 280 ha una tripla bugna nella flangia superiore e una per ciascuna anima. In Figura 1 sono riportate le due sezioni in oggetto con indicate le proprietà geometriche principali.

In Tabella 1 sono indicate le proprietà geometriche di ciascun profilo, utili anche all'esecuzione di una stima di resistenza mediante analisi elastica.

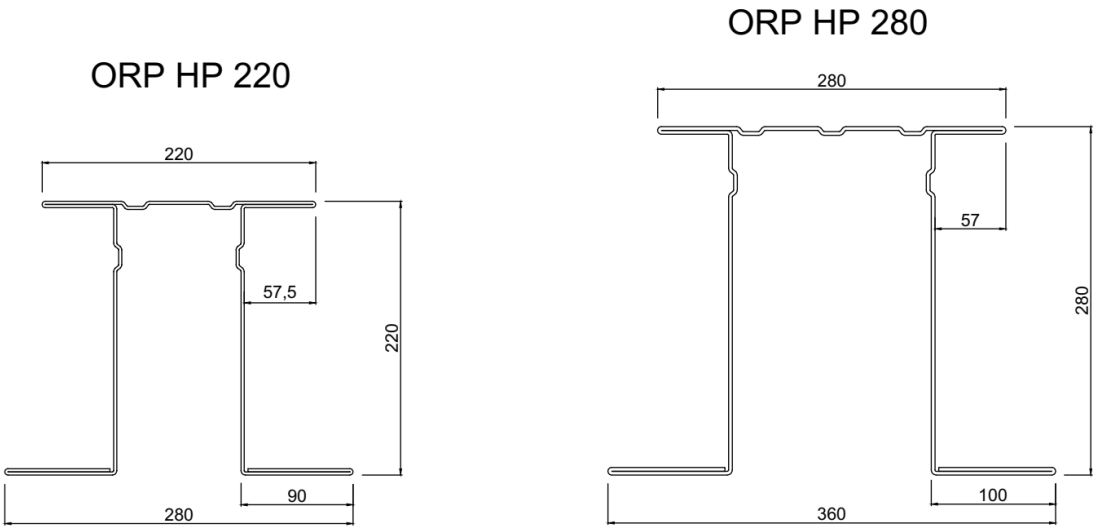


Figura 1. Profili ORP HP 220 e ORP HP 280 oggetto di analisi.

Tabella 1. Proprietà geometriche dei profili analizzati.

ORP HP 220	
Area	2796.4 mm^2
Distanza fibra inferiore - baricentro	109.6 mm
Distanza fibra superiore - baricentro	110.4 mm
Momento Inerzia (asse baric. orizz.)	23907139.58 mm^4
Momento Inerzia (asse baric. vert.)	15512070.31 mm^4

ORP HP 280

Area	4009.4 mm^2
Distanza fibra inferiore - baricentro	142.0 mm
Distanza fibra superiore - baricentro	138.0 mm
Momento Inerzia (asse baric. orizz.)	54503516.10 mm^4
Momento Inerzia (asse baric. vert.)	41452546.41 mm^4

3. Analisi elastica

La stima del momento resistente ultimo M_u può essere effettuata mediante analisi elastica, con l'ipotesi di mantenimento delle sezioni piane in campo di piccoli spostamenti. Essendo f_y la tensione di snervamento e W il modulo di resistenza, il momento resistente è dato da

$$M_u = f_y W$$

Utilizzando questo approccio, si ottengono i seguenti valori di momento resistente per entrambi i profili e per le diverse classi di acciaio S235, S275 e S355.

Profilo ORP HP 220
$W = I_x/110.4 = 216550\ \text{mm}^3$
$M_u^{S235} = 50.89\ \text{kNm}$
$M_u^{S275} = 59.55\ \text{kNm}$
$M_u^{S355} = 76.87\ \text{kNm}$

Profilo ORP HP 280
$W = I_x/142 = 383828\ \text{mm}^3$
$M_u^{S235} = 90.20\ \text{kNm}$
$M_u^{S275} = 105.55\ \text{kNm}$
$M_u^{S355} = 136.26\ \text{kNm}$

4. Simulazione delle prove sperimentali

4.1 Introduzione

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle analisi numeriche svolte per simulare prove di carico sperimentali sui profili ORP HP 220 e OPR HP 280. Nell'analisi non si tiene conto dei fenomeni di instabilità globale della trave, perché non di interesse nella classificazione oggetto della convenzione in premessa e che andrebbero impediti in un'eventuale prova sperimentale di laboratorio.
La modellazione numerica agli elementi finiti è stata eseguita mediante il software Abaqus v 6.14, prodotto da Simulia Dessault.

4.2 Schema di carico e modellazione numerica

Le simulazioni numeriche delle prove sperimentali sono state eseguite ipotizzando uno schema di carico a flessione su quattro punti come riportato in Figura 3, in cui si è considerato $a = L/4$, a cui poi corrisponde un valore di momento costante nel tratto di trave DE pari a $M_{DE} = FL/4$

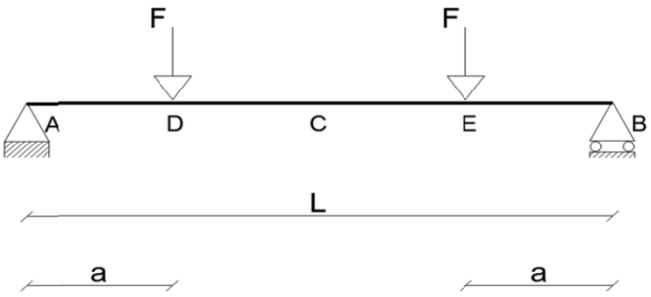


Figura 2. Schema statico della prova di carico.

Nello specifico, considerando appoggi di lunghezza finita, i valori delle grandezze utilizzate nel modello sono le seguenti (Figura 3)

$L = 3.50$ m	luce netta della trave a filo degli appoggi
$a = L/4 = 0.875$ m	
$d = 0.25$ m	lunghezza del tratto di trave in appoggio
$L_{tot} = 4.00$ m	lunghezza totale della trave

Essendo a parete sottile, la trave è stata modellata mediante elementi shell a 4 nodi con rigidezza flessionale, a cui è associato l'effettivo spessore della trave a cui il modello si riferisce. È stata poi eseguita una discretizzazione adeguata al fine di ottenere elementi finiti quadrangolari a basso grado di distorsione, tenendo

conto delle dimensioni delle bugne. In Figura 4 viene illustrato un particolare della sezione trasversale solida e discretizzata.

Al fine di evitare lo sviluppo di grandi deformazioni e l'attivazione di fenomeni di instabilità globale, in corrispondenza delle sezioni di applicazione del carico sono stati modellati fazzoletti di irrigidimento come illustrati in Figura 5.

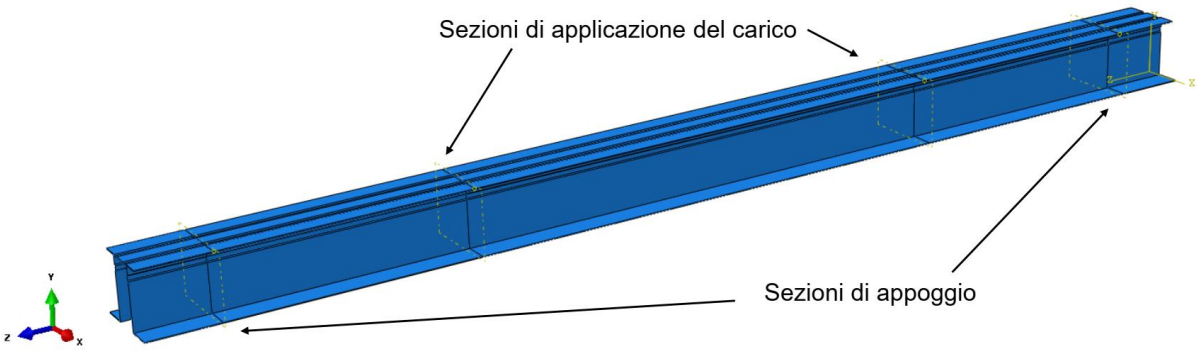


Figura 3. Modello solido della trave tipo oggetto di studio con indicazione delle sezioni di appoggio e di applicazione del carico.

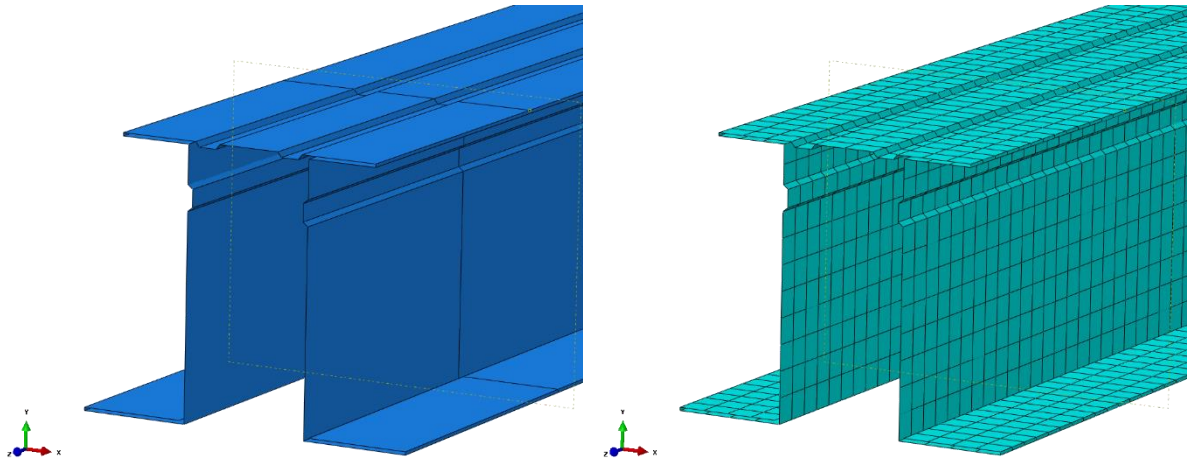


Figura 4. Particolare della sezione della trave, modellata mediante superfici piane connesse, e della relativa discretizzazione.

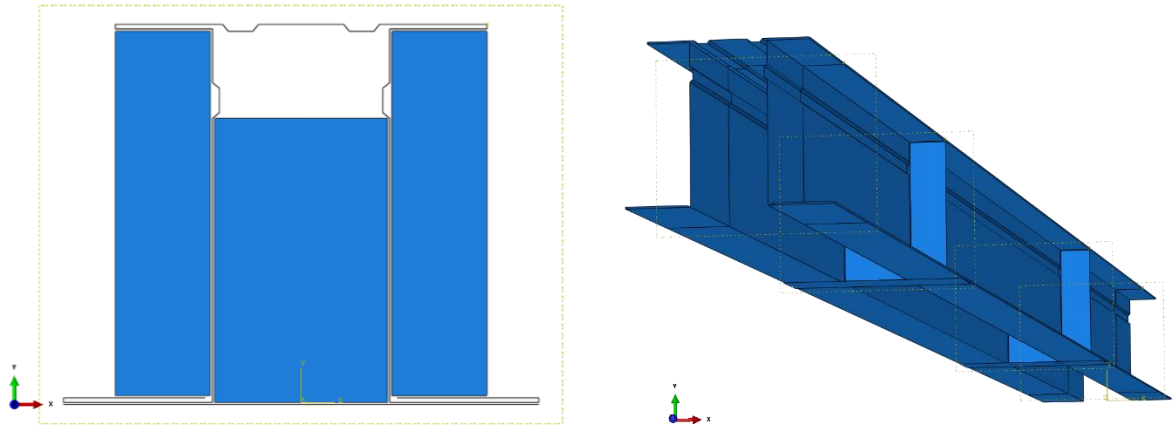


Figura 5. Particolare dei fazzoletti di irrigidimento modellati in corrispondenza delle sezioni in cui è stato applicato il carico.

I vincoli applicati nelle sezioni indicate in Figura 3 ad una distanza di 0.25 m dalle estremità della trave, sono stati modellati in modo da riprodurre condizioni di semplice appoggio in fase di prova sperimentale (Figura 6). In particolare, in entrambe le sezioni sono stati impediti spostamenti verticali e orizzontali in direzione ortogonale al piano della flessione, mentre sono stati permessi spostamenti orizzontali lungo la direzione dell'asse della trave, come indicato nello schema di Figura 2.

Al fine di evitare concentrazioni di tensioni e deformazioni localizzate, il carico è stato applicato mediante dei blocchi rigidi di ripartizione delle pressioni, aventi spessore pari a 10 cm, su cui sono stati imposti spostamenti verticali crescenti (Figura 7). La prova è stata quindi eseguita a controllo di spostamenti in modo da poter cogliere effetti di non linearità dovuti alla plasticizzazione della sezione o ad altri fenomeni di instabilità.

Il modello costitutivo associato al materiale è un modello elasto-plastico perfetto con uguale comportamento a trazione e compressione, idoneo a descrivere il comportamento dell'acciaio. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il materiale in condizioni più gravose, ovvero la classe S355, la quale, avendo una tensione di snervamento più elevata, è quella che si presta a lavorare a sollecitazioni maggiori e quindi più soggetta a fenomeni di instabilità locale.

Figura 6. Illustrazione delle condizioni di vincolo applicate alla trave.

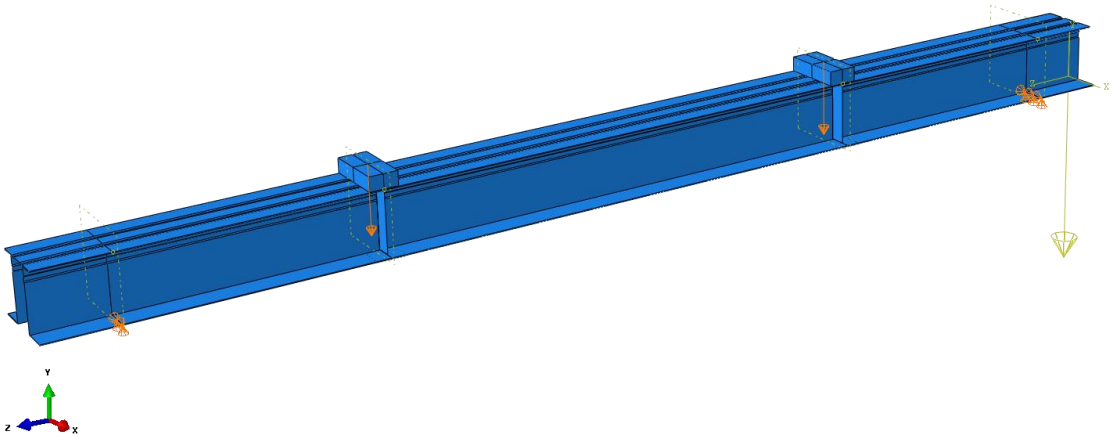


Figura 7. Illustrazione della modalità di applicazione del carico, con modellazione di blocchetti rigidi di ripartizione delle pressioni.

4.3 Analisi dei risultati per il profilo ORP HP 220

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di carico relativa al profilo ORP HP 220.

In Figura 8 si riporta la curva di equilibrio che mette in relazione lo spostamento verticale di un punto di intradosso della sezione di mezzeria della trave (espresso in mm) e il momento flettente del tratto di trave DE, secondo lo schema di Figura 2 (espresso in kNm). La curva di equilibrio evidenzia una risposta lineare della trave fino ad un valore di poco inferiore a 80 kNm, in cui si cominciano a manifestare le prime plasticizzazioni localizzate nell'intorno dei vincoli e delle sezioni di applicazione del carico. In Figura 9 viene illustrata la mappa delle deformazioni plastiche equivalenti con valore soglia della mappa dei colori fissato al 3‰. In Figura 10a si riporta la configurazione deformata della trave al limite elastico, mentre nelle Figure 10b-d vengono mostrate le relative mappe di tensione longitudinale presenti in ciascuna anima e nelle flange superiore e inferiore, rispettivamente.

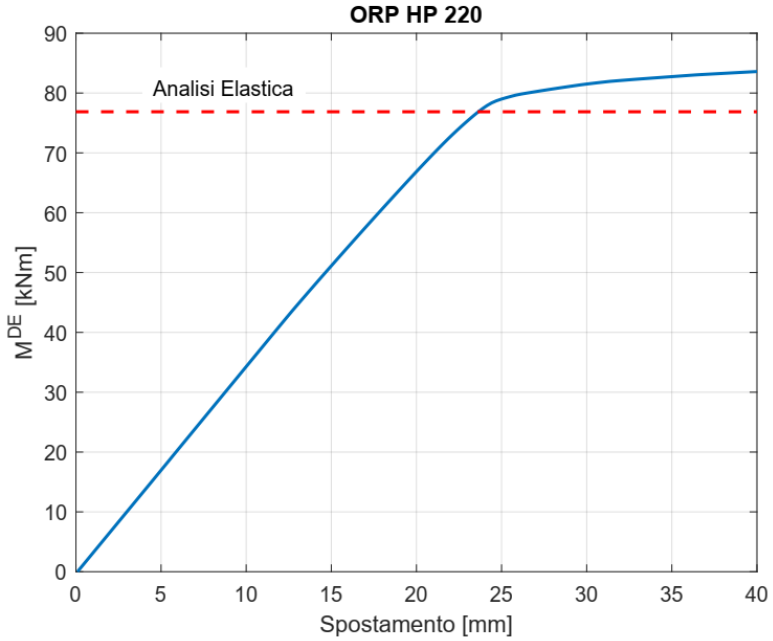


Figura 8. Curva di equilibrio Momento-Spostamento relativa alla prova di carico della trave con profilo ORP HP 220.

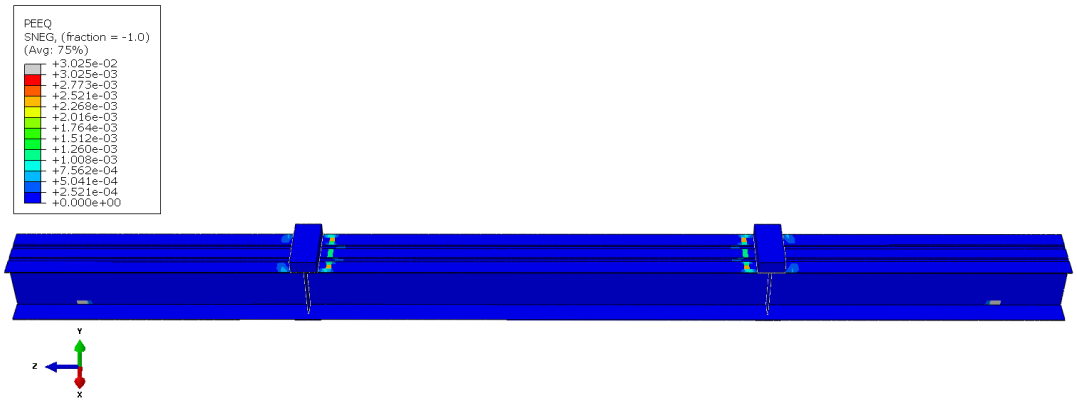
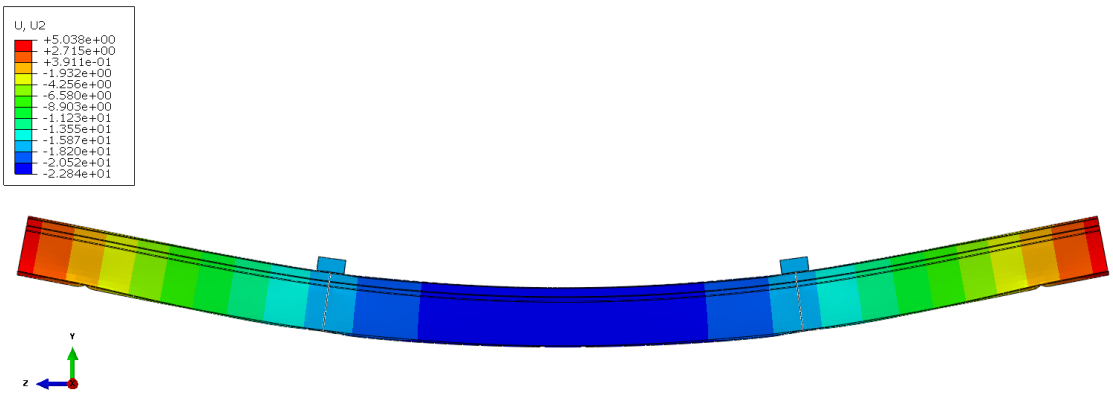
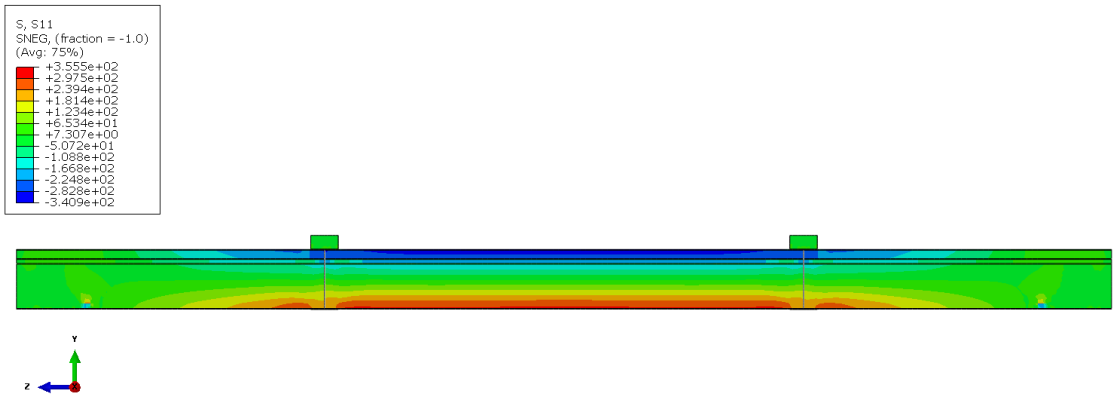


Figura 9. Mappa delle deformazioni plastiche equivalenti al raggiungimento del limite elastico.

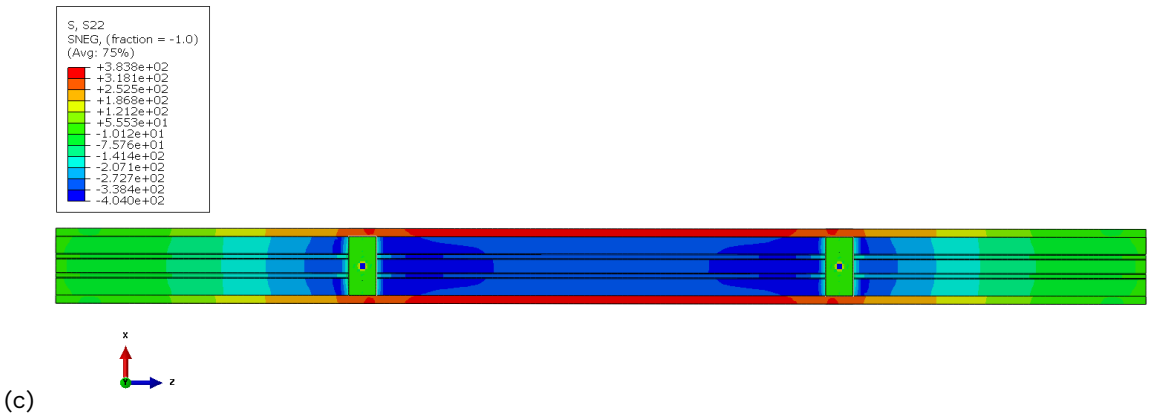


(a)

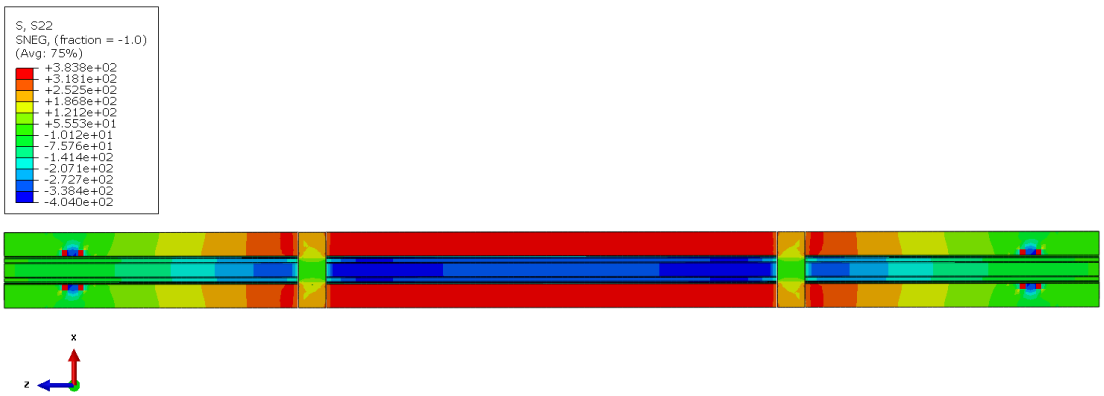


(b)

Figura 10. *segue*



(c)



(d)

Figura 10. Profilo ORP HP 220 in condizioni al limite elastico. (a) Configurazione deformata. Mappa delle tensioni longitudinali ottenute nelle pareti d'anima (b) e nelle flange superiori (c) e inferiori (d).

In Figura 11 si riportano le mappe ad uno stato avanzato di plasticizzazione, relativo ad un abbassamento verticale di circa 30 mm a cui corrisponde un valore del momento pari a circa 81.5 kNm. Mantenendo fissato un valore soglia di rappresentazione della mappa delle deformazioni plastiche equivalenti al 3‰, si nota come le flange inferiori e superiori siano arrivate a completa plasticizzazione. Focalizzando l'attenzione in una sezione di applicazione del carico rappresentata in configurazione deformata, si possono notare anche la presenza di deformazioni plastiche localizzate nelle flange superiori e inferiori (Figura 12).

In Figura 13a si riporta la configurazione deformata della trave, mentre nelle Figure 13b-d vengono mostrate le relative mappe di tensione longitudinale presenti in ciascuna anima e nelle flange superiore e inferiore, rispettivamente.

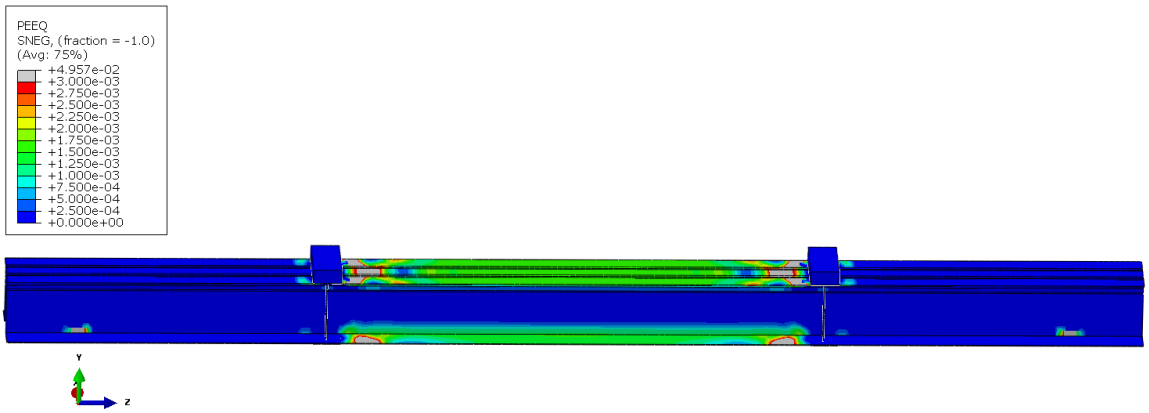


Figura 11. Mappa delle deformazioni plastiche equivalenti in fase avanzata di plasticizzazione.

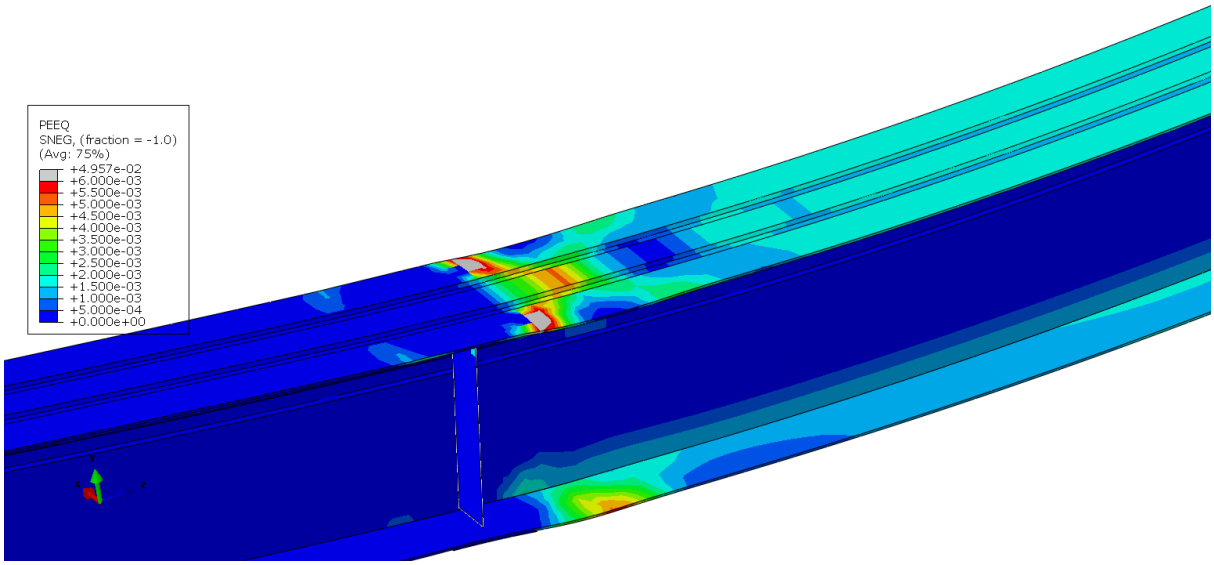
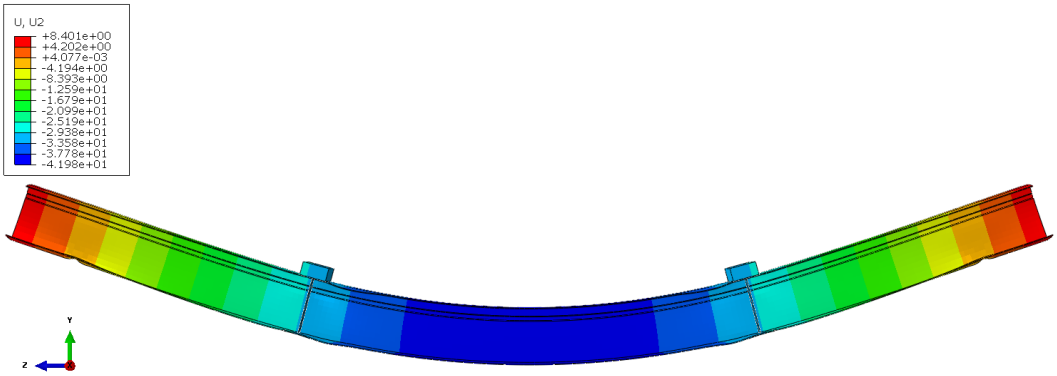
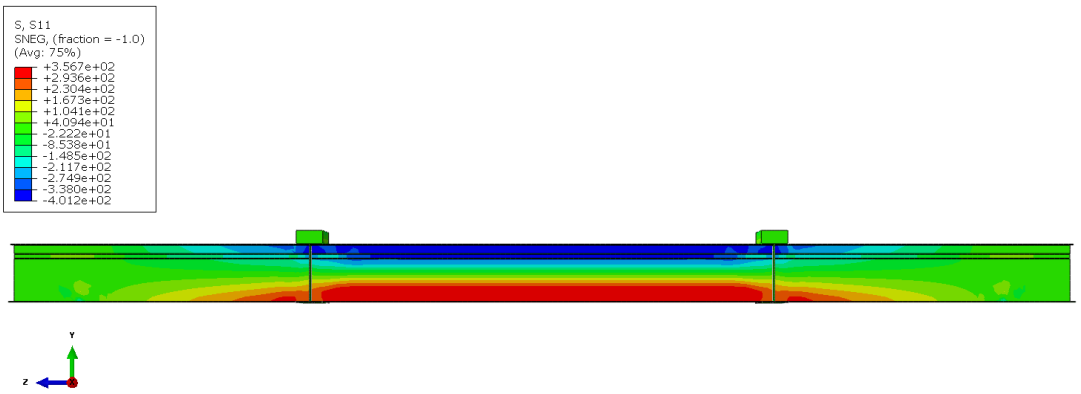


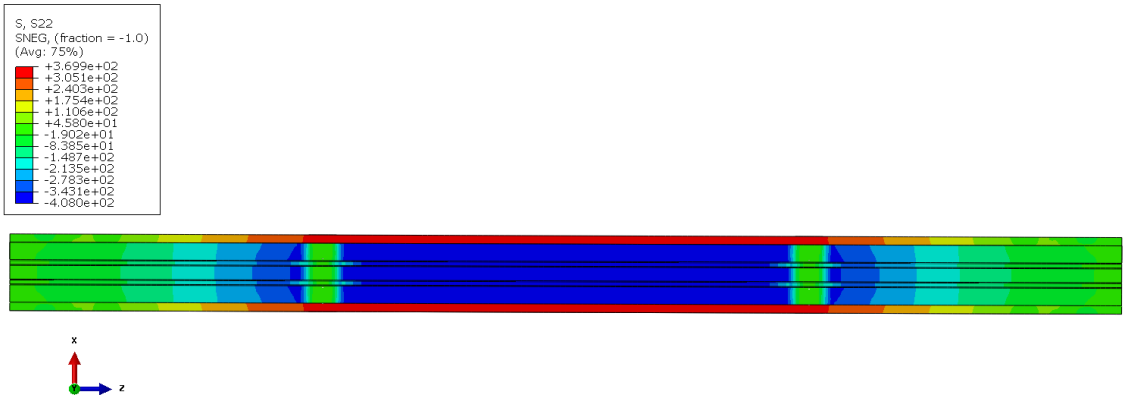
Figura 12. Particolare di una delle sezioni di applicazione del carico in condizioni deformate.


U, U2
+8.401e+00
+4.202e+00
+4.077e-03
-4.194e+00
-8.393e+00
-1.259e+01
-1.679e+01
-2.099e+01
-2.519e+01
-2.938e+01
-3.358e+01
-3.778e+01
-4.198e+01
Y
Z

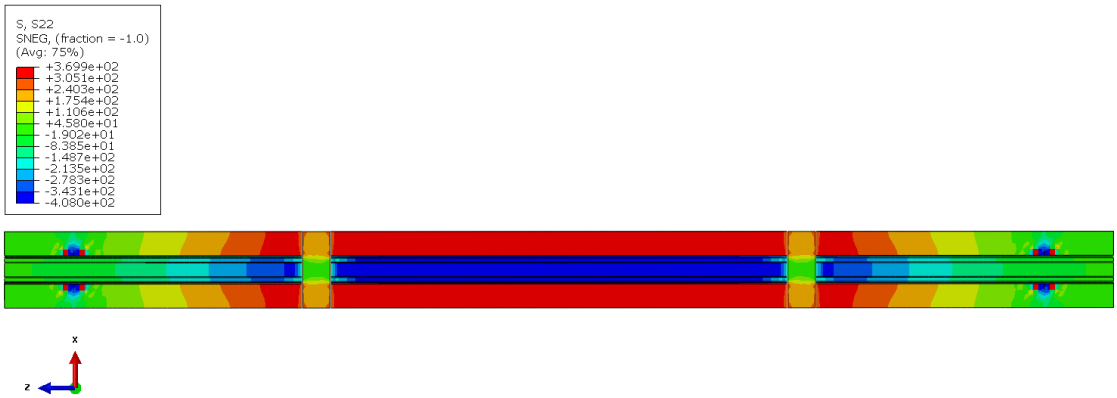
(a)


S, S11
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)
+3.567e+02
+2.936e+02
+2.304e+02
+1.673e+02
+1.041e+02
+4.094e+01
-2.222e+01
-8.538e+01
-1.485e+02
-2.117e+02
-2.749e+02
-3.380e+02
-4.012e+02
Y
Z

(b)


S, S22
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)
+3.699e+02
+3.051e+02
+2.403e+02
+1.754e+02
+1.106e+02
+4.580e+01
-1.902e+01
-8.385e+01
-1.487e+02
-2.135e+02
-2.783e+02
-3.431e+02
-4.080e+02
X
Z

(c)



(d)

Figura 13. Profilo ORP HP 220 in condizioni di avanzata plasticizzazione. (a) Configurazione deformata. Mappa delle tensioni longitudinali ottenute nelle pareti d'anima (b) e nelle flange superiori (c) e inferiori (d).

Al fine di valutare la manifestazione di instabilità locali, che possono generarsi per imbozzamento localizzato di alcune parti dell'anima e/o della flangia soggetta a compressione, sono state condotte anche analisi considerando effetti di non linearità geometrica, ovvero deformazioni in grandi spostamenti. In questo caso, la manifestazione di meccanismi di instabilità è riconducibile alla impossibilità di ottenere la convergenza dell'equilibrio durante l'analisi numerica.

Nel caso del profilo ORP HP 220 si è ottenuta una curva di equilibrio simile a quella riportata in Figura 8, ma con mancata convergenza al raggiungimento del limite elastico (Figura 14).

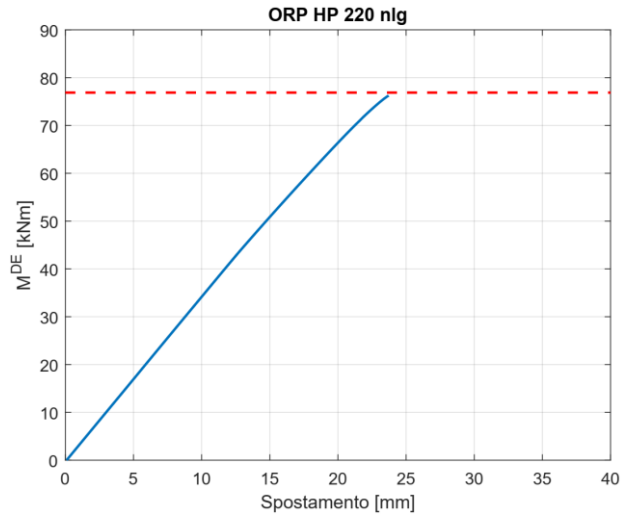


Figura 14. Curva di equilibrio Momento-Spostamento per il profilo ORP HP 220 ottenuta considerando effetti di non linearità geometrica.

La mancata convergenza nella curva di equilibrio è verosimilmente dovuta alla presenza di instabilità dovute alla plasticizzazione locale della trave, come mostrato in Figura 15, in cui si riporta un particolare dello stato deformativo della trave nell'intorno della sezione di carico. La mancata manifestazione di problemi di convergenza in fase antecedente il raggiungimento del limite elastico, può essere considerata come assenza di instabilità locali prima del raggiungimento della plasticizzazione. E' importante osservare che la sezione interessata dai fenomeni locali, che determinano l'assenza di convergenza dell'equilibrio, è quella in corrispondenza dell'applicazione del carico e non quella di mezzeria dove è plausibile che gli stessi effetti potrebbero manifestarsi per valori del momento flettente superiori a quello di plasticizzazione.

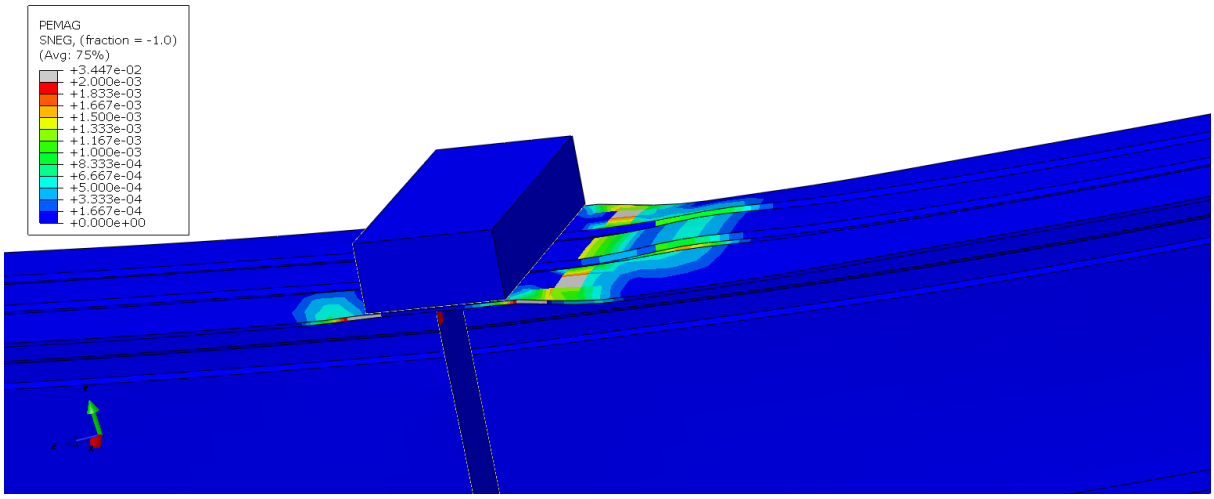


Figura 15. Particolare della plasticizzazione localizzata nella sezione di carico ottenuta dall'analisi considerando effetti di non linearità geometrica.

4.4 Analisi dei risultati per il profilo ORP HP 280

Nel presente paragrafo si riportano i risultati della simulazione di carico relativa al profilo ORP HP 280.

In termini di modellazione, a differenza del profilo ORP HP 220, si è reso necessario introdurre piastre di irrigidimento anche in corrispondenza delle sezioni di appoggio (Figura 16), in quanto le maggiori sollecitazioni che la struttura è in grado di sopportare rispetto al profilo ORP HP 220 determinano concentrazioni di tensione all'appoggio troppo elevate, con conseguente plasticizzazione delle flange inferiori.

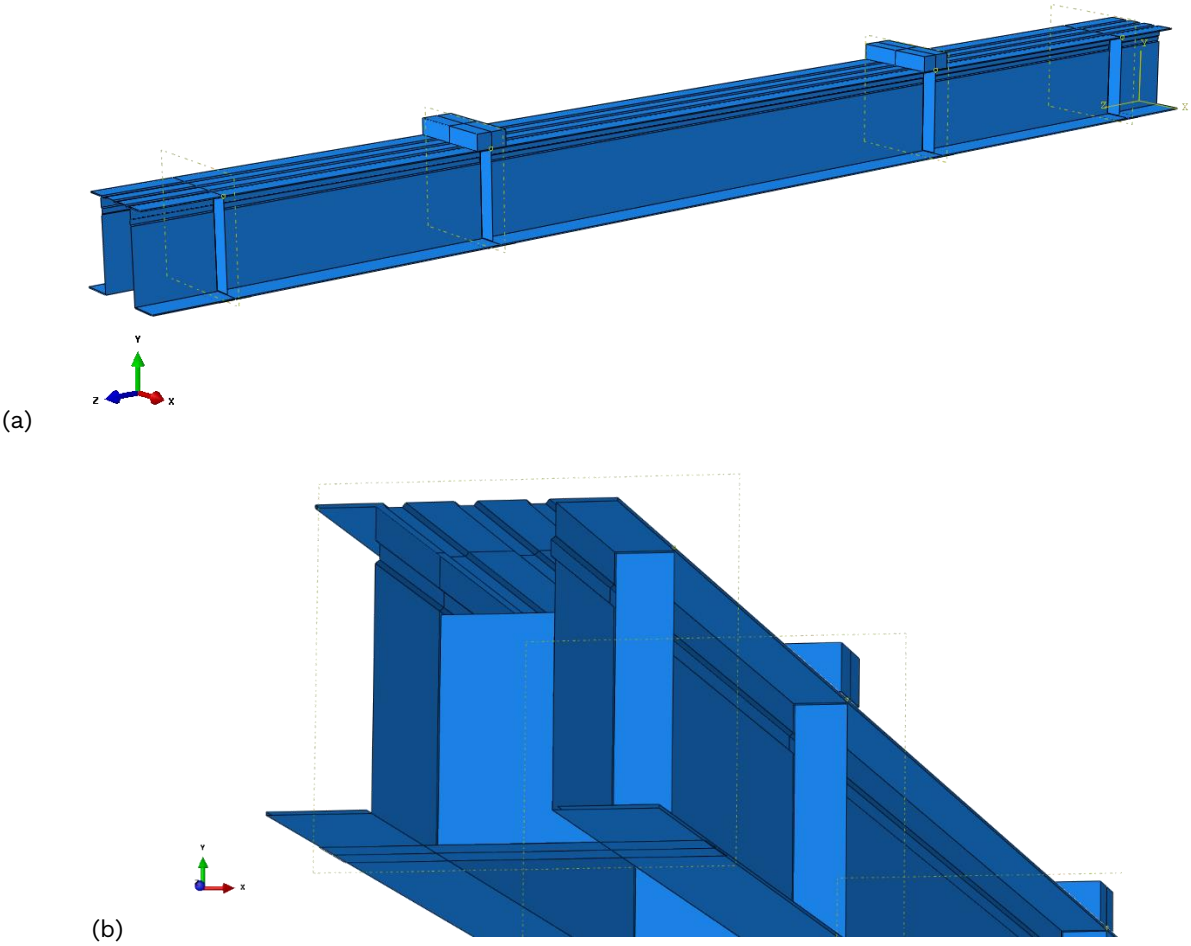


Figura 16. (a) Modello solido 3D della trave con profilo ORP HP 280. (b) Particolare di una sezione di appoggio con piastre di irrigidimento.

In Figura 17 si riporta la curva di equilibrio che mette in relazione lo spostamento verticale di un punto di intradosso della sezione di mezzeria della trave (espresso in mm) e il momento flettente del tratto di trave DE, secondo lo schema di Figura 2 (espresso in kNm). Come osservato nel caso precedente, la curva di equilibrio evidenzia una risposta lineare della trave fino ad un valore di poco inferiore a circa 140 kNm, in cui si cominciano a manifestare le prime plasticizzazioni localizzate nell'intorno dei vincoli e delle sezioni di applicazione del carico. In Figura 18 viene illustrata la mappa delle deformazioni plastiche equivalenti, in corrispondenza del punto di raggiungimento del limite elastico, con valore soglia della mappa dei colori fissato al 3‰. L'analisi numerica è stata estesa oltre il limite elastico, mostrando accumulo di deformazioni plastiche specialmente nelle flange inferiori e superiori della trave. In Figura 19a si riporta la configurazione deformata della trave al limite elastico, mentre nelle Figure 19b-d vengono mostrate le relative mappe di tensione longitudinale presenti in ciascuna anima e nelle flange superiore e inferiore, rispettivamente.

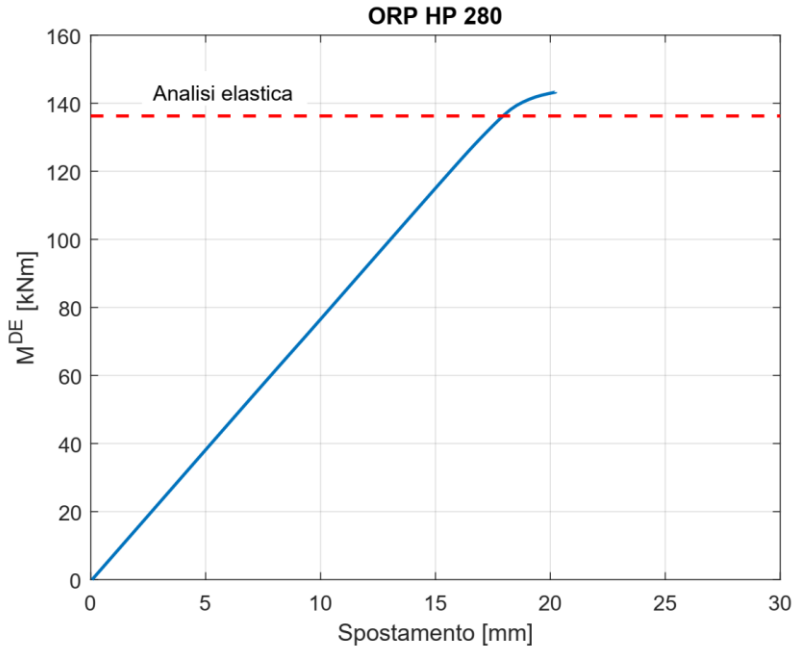


Figura 17. Curva di equilibrio Momento-Spostamento relativa alla prova di carico della trave con profilo ORP HP 280.

Figura 18. Curva di equilibrio Momento-Spostamento relativa alla prova di carico della trave con profilo ORP HP 280.

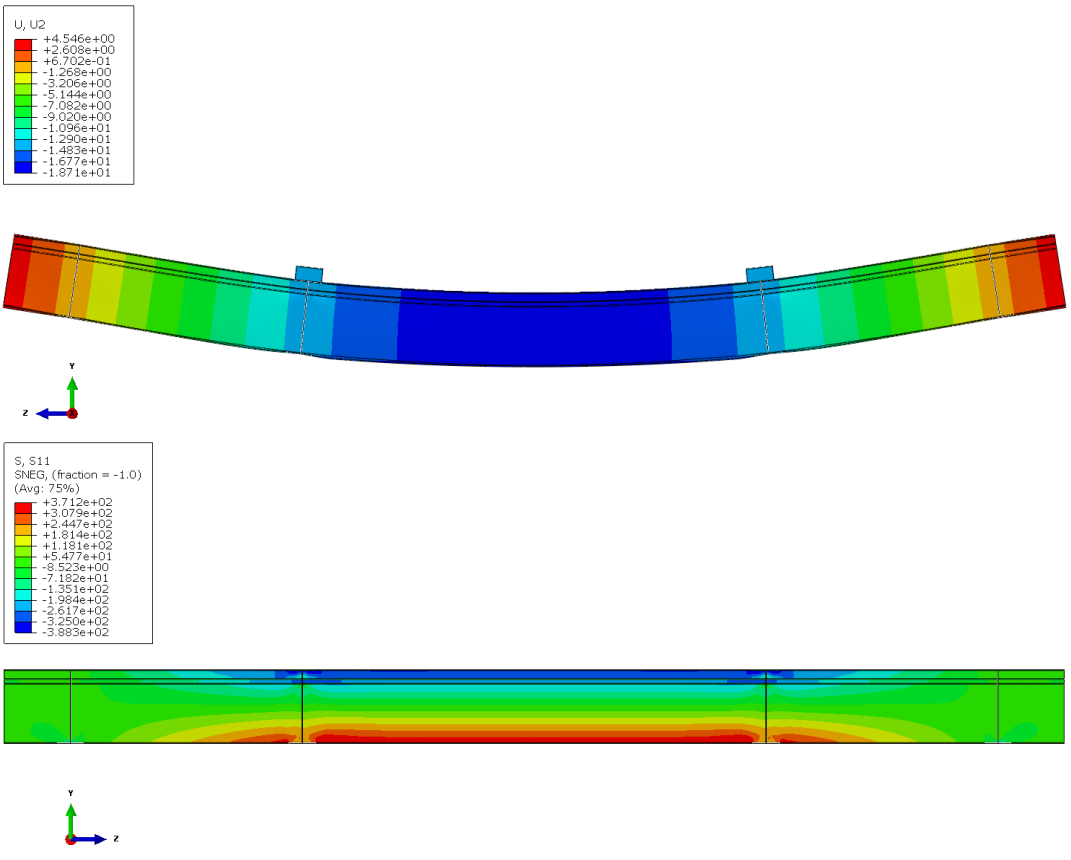


Figura 19 *segue*

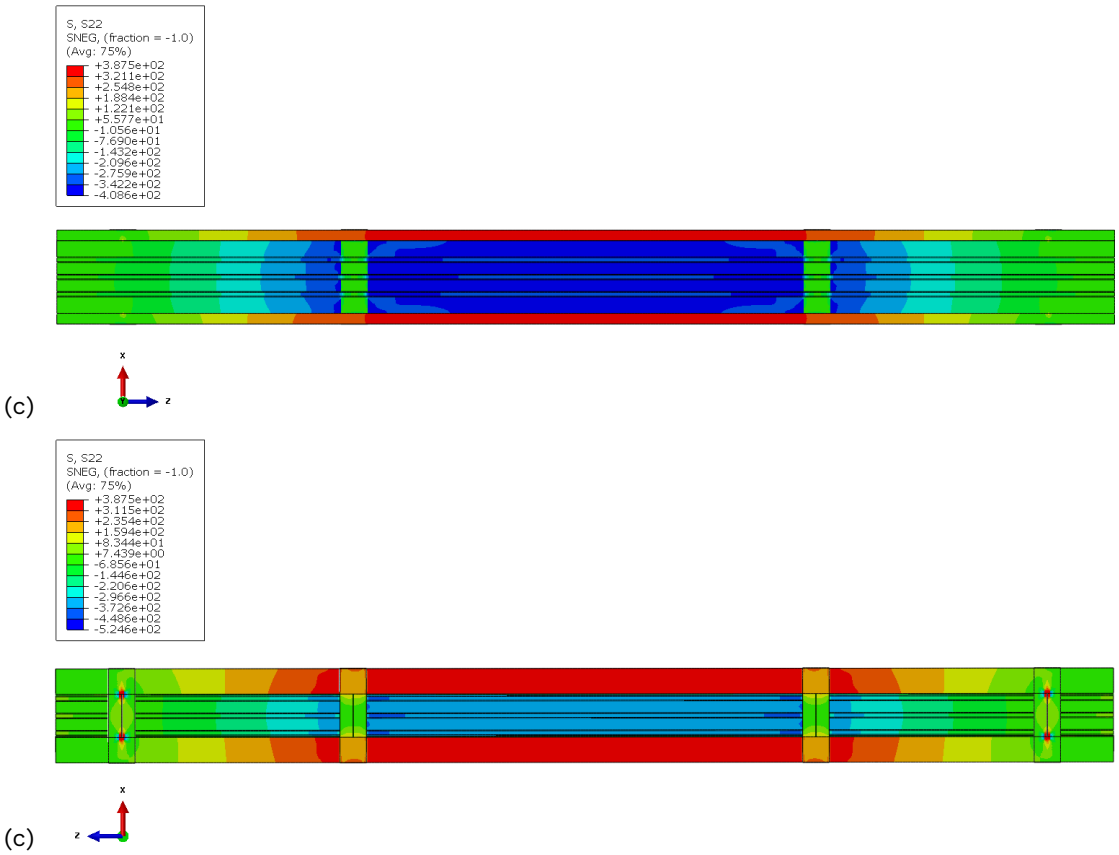


Figura 19. Profilo ORP HP 280 in condizioni al limite elastico. (a) Configurazione deformata. Mappa delle tensioni longitudinali ottenute nelle pareti d'anima (b) e nelle flange superiori (c) e inferiori (d).

Anche in questo caso è stata eseguita un'ulteriore analisi considerando gli effetti di non linearità geometrica. Come nel caso del profilo ORP HP 220, l'analisi si è interrotta al raggiungimento del limite elastico, come mostrato in Figura 20, da cui si può dedurre che durante la fase elastica non si manifestino effetti di instabilità locale che determinano la mancata convergenza numerica dell'equilibrio.

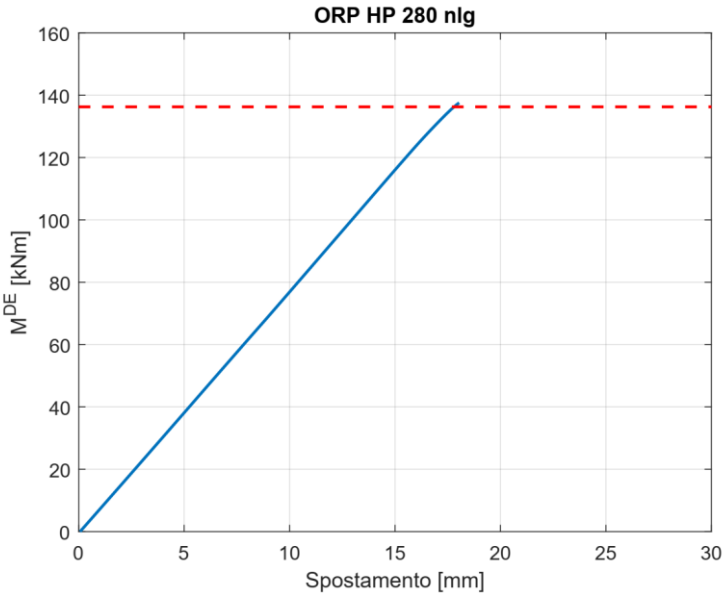


Figura 20. Curva di equilibrio Momento-Spostamento per il profilo ORP HP 280 ottenuta considerando effetti di non linearità geometrica.

5. Conclusioni

Nel presente report sono stati illustrati i risultati delle simulazioni numeriche di prove di carico a flessioni su quattro punti condotte su travi con profili ORP HP 220 e ORP HP 280. Di seguito si riportano le curve di equilibrio ottenute dall'analisi numerica, anche con effetti di non linearità geometrica, ovvero effettuando analisi in grandi spostamenti (Figura 21).

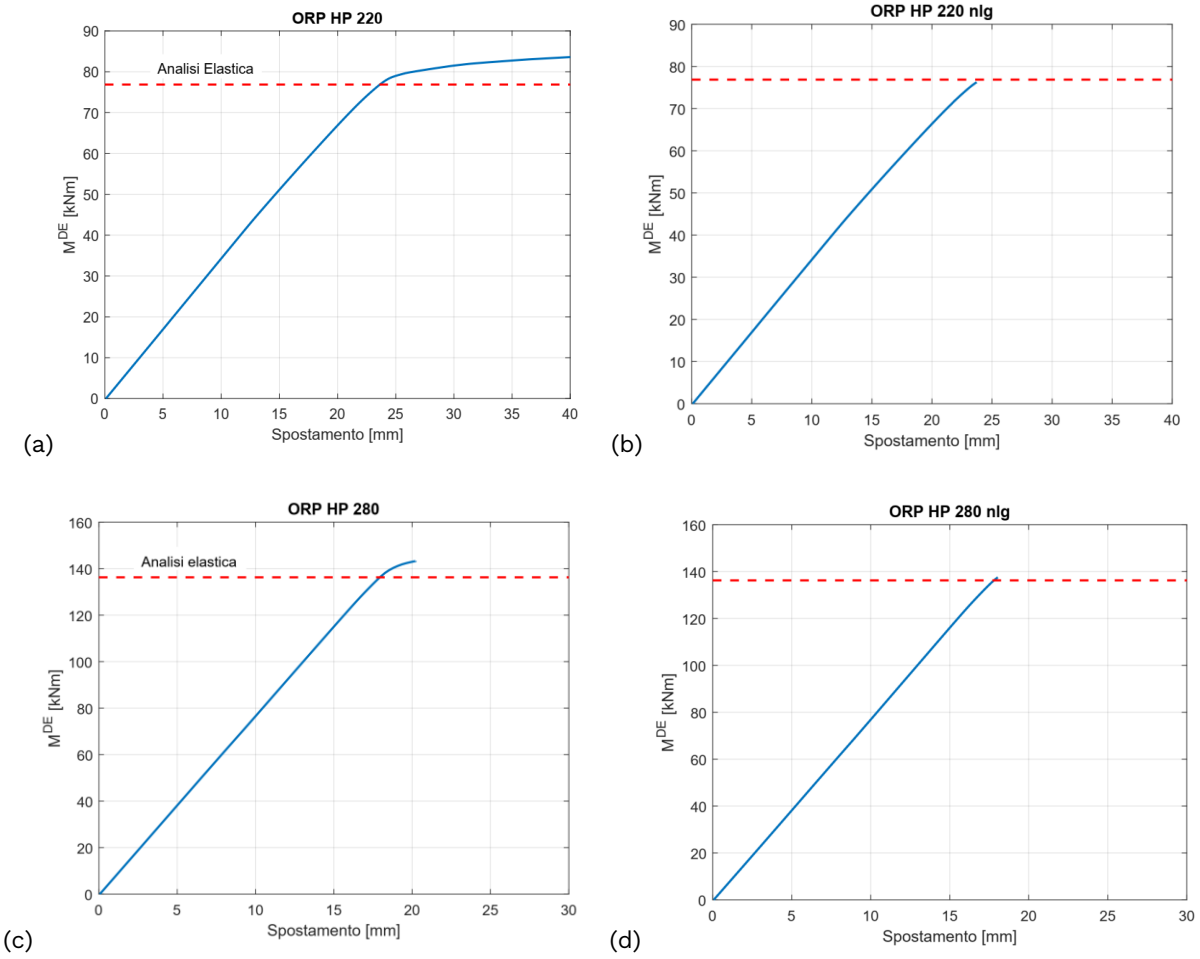


Figura 21. Curve di equilibrio ottenute dalle simulazioni delle prove di carico, senza (a-c) e con effetti di non linearità geometrica (b-d), su profili ORP HP 220 (a-b) e ORP HP 280 (c-d).

Dai risultati emerge che tutte le simulazioni hanno raggiunto il valore del limite elastico nominale. Le analisi condotte senza considerare effetti di non linearità geometrica hanno permesso di studiare la risposta strutturale anche oltre il limite elastico, mentre i modelli con non linearità geometrica, oltre a quella del

materiale, hanno mostrato il verificarsi di situazioni di non convergenza dell'equilibrio appena raggiunto il limite elastico. Tale risposta è generalmente dovuta al manifestarsi di instabilità locali, che nei casi in oggetto sono in relazione a plasticizzazioni localizzate nell'intorno delle sezioni di carico. L'assenza di problemi di convergenza durante la fase elastica può considerarsi come mancata insorgenza di instabilità locali prima del raggiungimento del limite elastico.

I responsabili scientifici

Prof. Massimiliano Gioffrè _____

Prof. Marco Mezzi _____