

Analisi non lineare dei recipienti in pressione

La valutazione dell'integrità strutturale mediante un approccio non-lineare

FRANCESCO PALLONI – SmartCAE srl
STEFANO MILANI – Ener Consulting srl

Durante la verifica strutturale di un recipiente in pressione capita spesso che l'approccio Design-by-Analysis, basato sulla categorizzazione delle sollecitazioni, porti a un sovradimensionamento del componente. Ciò è legato al fatto che la procedura in questione, sicuramente consolidata e di facile applicazione, è conservativa e pertanto tende a sovradimensionare i componenti sotto analisi. Inoltre dobbiamo tenere conto del fatto che la procedura di linearizzazione risulta particolarmente articolata e onerosa se applicata su geometrie complesse. In questi casi le principali normative sui recipienti in pressione prevedono la possibilità di applicare una tipologia di analisi più accurata dell'approccio succitato attraverso l'esecuzione di calcoli non lineari.

COSA INTENDE LA NORMATIVA ASME PER ANALISI NON LINEARE?

La normativa ASME, permette la verifica dei recipienti in pressione utilizzando una legge costitutiva non-lineare. Questo tipo di modello costitutivo, che permette la modellazione dello snervamento e della conseguente plasticizzazione, tipica degli acciai e delle leghe duttili in genere, da una parte costringe l'analista a introdurre nel modello matematico una legge costitutiva più complessa, da un'altra richiede che il solutore permetta questo tipo di analisi.

VANTAGGI DELL'APPROCCIO NON LINEARE

Come abbiamo già accennato prima, l'approccio non lineare offre un range di ammissibilità maggiore. Questo comporta che, a parità di geometria e materiali, il componente è in grado di offrire prestazioni superiori rispetto a quelle ottenibili con una verifica lineare elastica. Un secondo vantaggio, è dato da una fase di post-processing che risulta più immediata, come vedremo fra breve.

SVANTAGGI DELL'APPROCCIO NON LINEARE

D'altro canto, l'analisi non lineare presenta una serie di svantaggi rispetto alla procedura di categorizzazione delle sollecitazioni. I tempi di calcolo di una analisi non-lineare sono sicuramente superiori a quelli di una analisi statica lineare, a parità di mesh e condizioni al contorno. La fase di preparazione del modello matematico risulta più complessa, in quanto è necessario ricavare la legge costitutiva del materiale.

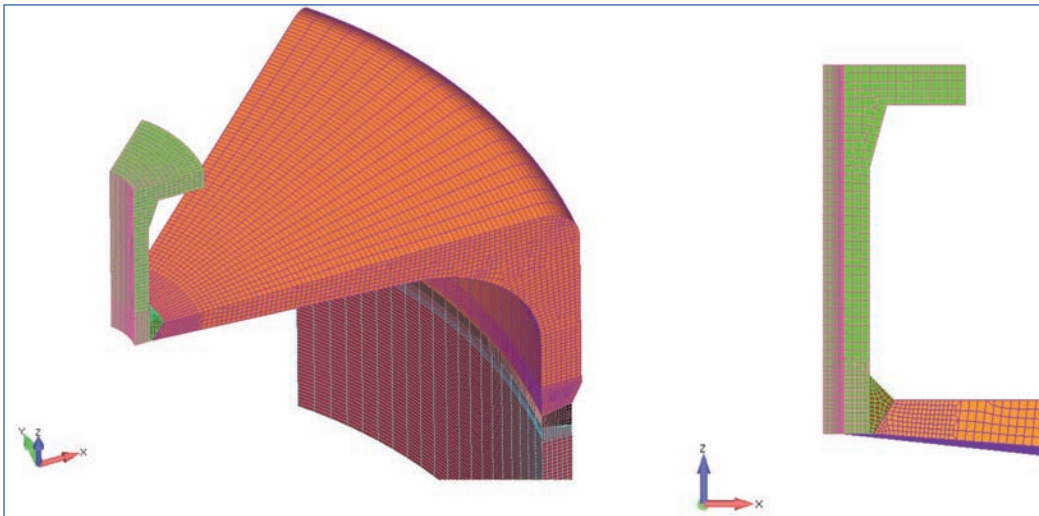


Figura 1 – Caso di esempio

L'approccio non-lineare porta a margini di sicurezza inferiori, pertanto si deve prestare maggiore attenzione all'impostazione della verifica (carichi di progetto, condizioni al contorno, mesh ad elementi finiti, dati del materiale, ...) per non incorrere in errori di valutazione. Dobbiamo infatti considerare sempre che eventuali errori commessi dall'analista nella definizione matematica dell'analisi, nel caso della procedura di linearizzazione tendono, entro certi limiti, ad esser compensati, mentre nel caso di un'analisi elasto-plastica, avendo margini di

Action	Unit	Design Value
Pressure pd	MPa	4.15
Temperature To	[°C]	450

Figura 2 – Condizioni di progetto

sicurezza ridotti, tali errori possono portare a criticità strutturali.

UN ESEMPIO DI CALCOLO

Per confrontare la procedura di categorizzazione delle sollecitazioni con l'analisi non-lineare, facciamo riferimento a un caso di studio nel

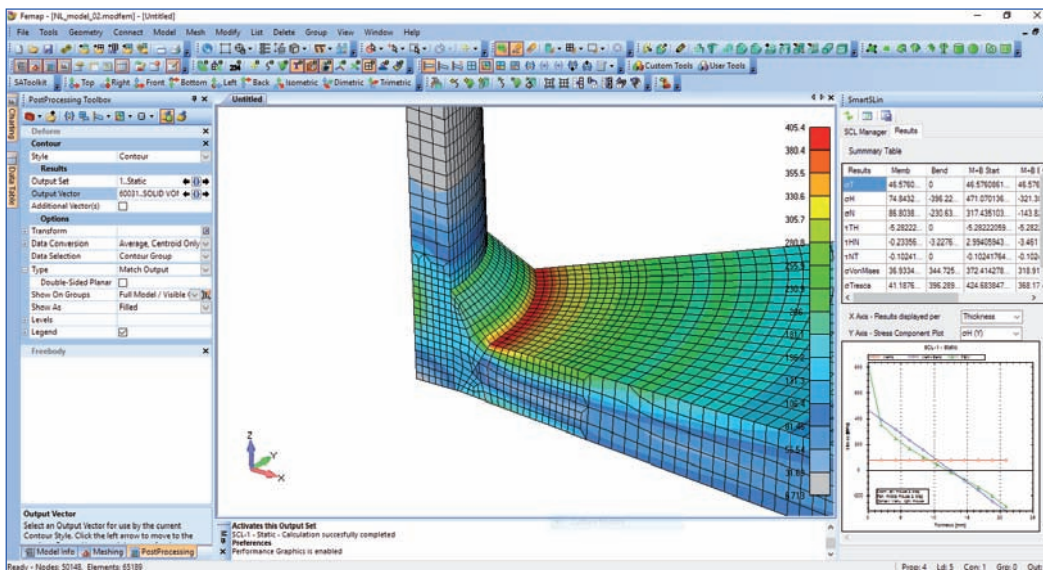


Figura 3 – Linearizzazione delle sollecitazioni con FEMAP e SCL-analyzer

SCL	Membrane Stress [MPa]		Membrane + Bending Stress [MPa]	Bending Stress Classification [MPa]		Allowable Stress [MPa]	Allowable Stress Component [MPa]				Safety Factor				MIN SF
	General	Local		Primary P	Secondary Q		General Membrane	Local Membrane	Membrane + Secondary Stress	Primary + Secondary Stress	SF _{GM}	SF _{LM}	SF _{M+B (Primary)}	SF _{P+Q}	
	P _m	P _l					P _m	1.5S	1.5S	3S					
1	N.A.	37	372	N.A.	X	106	106	159	159	318	N.A.	4.3	N.A.	0.85	0.85

Figura 4 – Verifica mediante linearizzazione

Figura 5 – Limit Analysis
– load combination

Table 5.4 Load Case Combinations and Load Factors for a Limit Load Analysis	
Criteria	Required Factored Load Combinations
Design Conditions	
Global	$(1) 1.5(P + P_s + D)$ $(2) 1.3(P + P_s + D + T) + 1.7L + 0.54S_s$ $(3) 1.3(P + P_s + D) + 1.7S_s + (1.1L \text{ or } 0.54W)$ $(4) 1.3(P + P_s + D) + 1.1W + 1.1L + 0.54S_s$ $(5) 1.3(P + P_s + D) + 1.1E + 1.1L + 0.21S_s$
Local	See 5.3.1.2
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable; see Table 5.5
Hydrostatic Test Conditions	
Global	$\max \left[1.43, 1.25 \left(\frac{S_T}{S} \right) \right] \cdot (P + P_s + D) + 2.6W_{pt}$
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable
Pneumatic Test Conditions	
Global	$1.15 \left(\frac{S_T}{S} \right) \cdot (P + P_s + D) + 2.6W_{pt}$
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable
GENERAL NOTES:	
(a) The parameters used in the Design Load Combination column are defined in Table 5.2.	
(b) See 5.2.3.4 for descriptions of global and serviceability criteria.	
(c) S is the allowable membrane stress at the design temperature.	
(d) S_T is the allowable membrane stress at the pressure test temperature.	
(e) Loads listed herein shall be considered to act in the combinations described above; whichever produces the most unfavorable effect in the component being considered. Effects of one or more loads not acting shall be considered.	

Figura 6 – Elastic-
plastic analysis – load
combination

Table 5.5 Load Case Combinations and Load Factors for an Elastic-Plastic Analysis	
Criteria	Required Factored Load Combinations
Design Conditions	
Global	$(1) 2.4(P + P_s + D)$ $(2) 2.1(P + P_s + D + T) + 2.7L + 0.86S_s$ $(3) 2.1(P + P_s + D) + 2.7S_s + (1.7L \text{ or } 0.86W)$ $(4) 2.1(P + P_s + D) + 1.7W + 1.7L + 0.86S_s$ $(5) 2.1(P + P_s + D) + 1.7E + 1.7L + 0.34S_s$
Local	$1.7(P + P_s + D)$
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable; see 5.2.4.3(b)
Hydrostatic Test Conditions	
Global and Local	$\max \left[2.3, 2.0 \left(\frac{S_T}{S} \right) \right] \cdot (P + P_s + D) + W_{pt}$
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable
Pneumatic Test Conditions	
Global and Local	$1.8 \left(\frac{S_T}{S} \right) \cdot (P + P_s + D) + W_{pt}$
Serviceability	Per User's Design Specification, if applicable
GENERAL NOTES:	
(a) The parameters used in the Design Load Combination column are defined in Table 5.2.	
(b) See 5.2.4.3 for descriptions of global and serviceability criteria.	

quale applichiamo entrambi i criteri di verifica. Il "case study" è un serbatoio a fondo piano con spessore variabile, illustrato in Figura 1, mentre in Figura 2 sono riportate le condizioni di progetto.

Una prima osservazione che possiamo fare in merito alla procedura non lineare è che in questo caso si devono necessariamente modellare tutti i dettagli (ad esempio i cordoni di saldatura). A tal proposito si è provveduto a ridurre

la dimensione degli elementi in corrispondenza della saldatura tra fondo e bocchello, al fine di ottenere una migliore approssimazione dello stato tensionale-deformativo.

Le Figure 3 e 4 illustrano la verifica del cordone di saldatura in corrispondenza della giunzione tra fondo e bocchello attraverso la procedura di linearizzazione.

La sollecitazione Membranale è categorizzabile come Locale, mentre quella Flessionale risul-

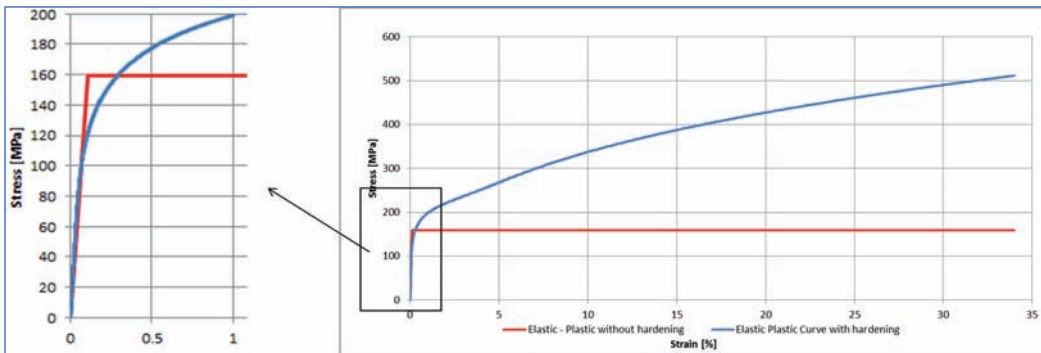


Figura 7 – Curve di materiale non lineare

ta di tipo secondario. Ciò nonostante, la componente flessionale supera comunque i valori massimi definiti dalla normativa e, pertanto, il componente non risulta verificato, come indicato nella Figura 4.

LIMIT LOAD ANALYSIS VS. ELASTIC PLASTIC ANALYSIS

Facciamo un breve confronto tra le due procedure non lineari a cui fa riferimento la normativa ASME: Limit Load Analysis (Figura 5) e Elastic-Plastic Analysis (Figura 6). La procedura “Direct Route” della EN 13445-3 è concettualmente simile a queste. Dobbiamo infatti considerare che, sia nella normativa EN che in quella ASME, i carichi di progetto vengono maggiorati mediante un opportuno coefficiente dipendente dalla sua natura (meccanico, termico, ambientale ecc.).

Si tenga sempre presente che, per eseguire una analisi dei rischi completa, si devono valutare necessariamente tutti i fenomeni che possono portare al collasso strutturale del componente (Fatica, creep, buckling ecc...) purché questi siano applicabili.

PROCEDURA LIMIT LOAD

Con la procedura Limit Load Analysis si può eseguire la verifica a collasso plastico globale, il materiale viene modellato come elastico-perfettamente plastico, trascurando pertanto l’incrudimento. Inoltre si fa riferimento alla meccanica dei corpi poco deformabili: questo è uno dei punti che differenzia la procedura limit load a quella elasto-plastica.

PROCEDURA ELASTO-PLASTICA

Nella procedura elasto-plastica invece si possono eseguire verifiche sia a collasso plastico glo-

bale che locale, la legge costitutiva tiene conto dell’incrudimento, ed in questo caso si passa dalla curva stress-strain ingegneristica a stress-strain vera. La normativa fornisce la procedura per determinare le leggi costitutive del materiale, in funzione della sua tipologia (acciaio al carbonio, basso legato ecc) e delle caratteristiche meccaniche di resistenza (snervamento e rottura). In questo caso, visto che stiamo facendo riferimento ad una legge costitutiva che tiene conto dell’incrudimento, i coefficienti di amplificazione dei carichi sono maggiori rispetto al caso precedente.

LEGGE COSTITUTIVA NON-LINEARE

In Figura 7 è riportato l’andamento delle due leggi costitutive previste dai due diversi approcci non-lineari. In Figura 8 sono riportate le caratteristiche del materiale alla temperatura di progetto. Il valore dello snervamento da utilizzare per il calcolo deve essere ricavato mediante la relazione $S_y = 1.5S$, indipendentemente dal valore tabellato nella normativa ASME II part.D. Nel caso in questione la differenza tra il valore di snervamento tabellato e quello calcolato

Material	Data at 450°C [MPa]		Sm [MPa]
	E	Sy	
SA 387 Gr12 cl.1	180000	160	106

Legenda: E: Young’s modulus, Sy : yield strength, Su: ultimate strength, S: max allowable stress

Figura 8 – Caratteristiche meccaniche del materiale

dalla precedente formula è minima (1 MPa). Vi sono tuttavia materiali in cui questa differenza diventa più marcata, soprattutto se operanti ad elevate temperature.

La curva in rosso riporta l’andamento della legge elasto-plastica non incrudente prevista dalla Limit Load Analysis, mentre con la curva in blu

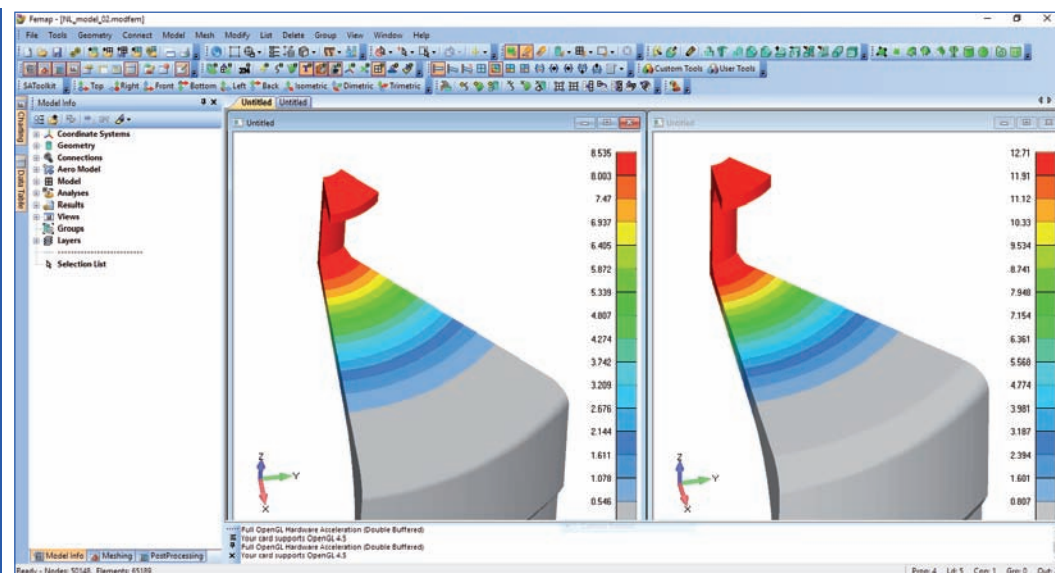


Figura 9 – Deformazione limit load e elasto-plastic

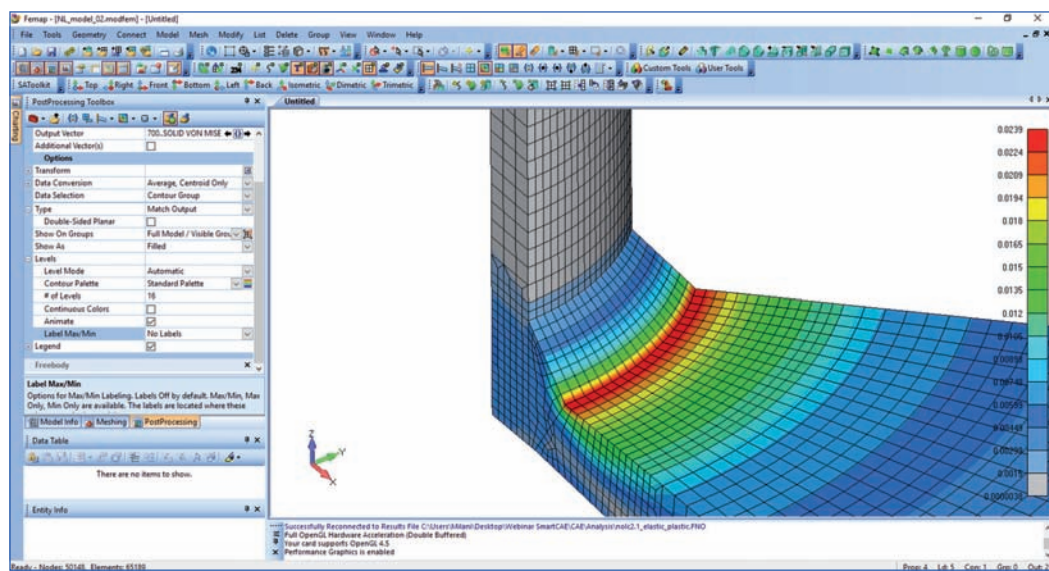


Figura 10 – Deformazione equivalente elasto-plastica

viene mostrato l'andamento della legge costitutiva tensione-deformazione ricavata secondo ASME per la verifica Elasto-Plastica.

COLLASSO PLASTICO GLOBALE E LOCALE

Con la verifica a collasso plastico globale si valutano eventuali cedimenti macroscopici del componente, infatti è sufficiente che l'analisi raggiunga la convergenza per poter considerare la verifica superata. Non andiamo pertanto a valutare alcuna grandezza tensionale o deformativa. Quando il solutore FEM raggiunge la convergenza vuol dire che il sistema ha raggiunto una

configurazione di equilibrio tra le forze interne (tensioni) e le forze esterne (carichi). Questa verifica è possibile sia con l'approccio Limit Load che con quello Elasto-Plastico.

In Figura 9 sono mostrate le deformate della struttura utilizzando i due approcci: a sinistra è illustrato l'approccio "Limit Load", a destra quello "Elastic-Plastic". A causa dei diversi fattori di amplificazione dei carichi e la diversa curva del materiale, le deformate risultano diverse. In entrambi i casi il sistema raggiunge una configurazione di equilibrio, pertanto la struttura risulta verificata al collasso plastico Globale.

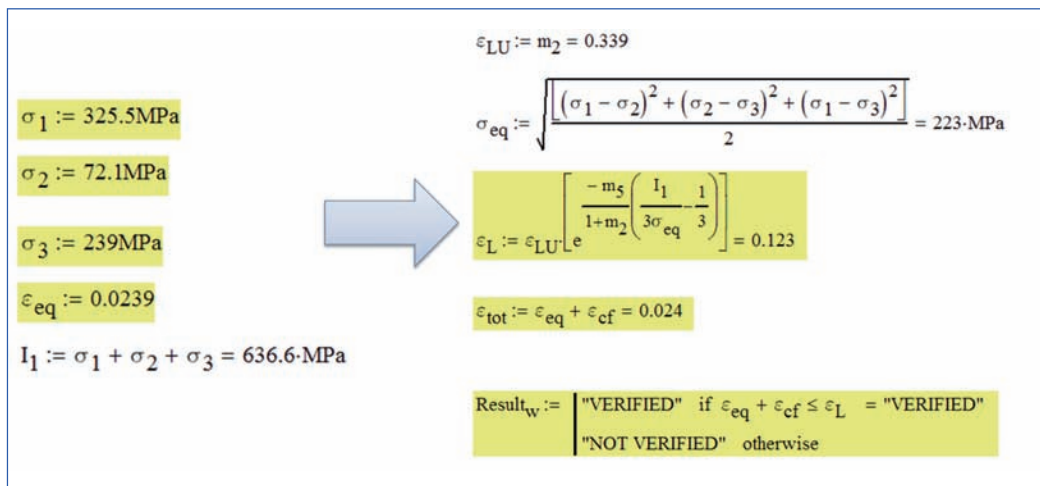


Figura 11 – Verifica a collasso plastico locale

Con la verifica a collasso plastico locale andiamo a controllare che, nelle zone critiche del nostro componente, non vengano a generarsi deformazioni che possano portare a criticità strutturali. Questa verifica è possibile soltanto con l'analisi Elasto-Plastica.

La Figura 10 mostra l'andamento delle deformazioni equivalenti elasto-plastiche nella zona di massima critica.

Per la verifica a collasso plastico locale, occorre verificare che la deformazione plastica equivalente risulti inferiore alla deformazione limite ϵ_L , termine che dipende non solo dal materiale, ma anche dallo stato tensionale in corrispondenza della zona sotto analisi.

I termini che legano la deformazione limite con lo stato tensionale sono " I_1 ", cioè il primo invariante del tensore di Cauchy e la tensione equivalente secondo Von Mises.

Tali valori, possono essere ricavati direttamente dagli output prodotti dal calcolo FEM, durante la fase di post-processing.

Il risultato di questa post-elaborazione è riportato in Figura 11. Il valore calcolato risulta inferiore a quello limite, pertanto la struttura è verificata anche a collasso plastico locale.

Nella deformazione totale è presente il termine ϵ_{cf} , col quale si tiene conto dell'eventuale presenza di deformazioni plastiche residue legate a precedenti lavorazioni di deformazione plastica a freddo. Questo valore può essere omesso soltanto nel caso in cui il prodotto subisca dei trattamenti termici di distensione prima della messa in opera.

Si noti infine che, nel caso di stati di tensione triassiali di compressione, il primo invariante principale dello stato di tensione (la somma degli autovalori) è negativo, e la deformazione

triassiale limite aumenta in maniera esponenziale. Ciò trova riscontro nel fatto che uno stato di tensione triassiale di trazione presenta un limite al di sopra del quale si ha il cedimento del componente per frattura fragile, mentre uno stato di tensione triassiale di compressione non comporta tale tipologia di collasso.

CONCLUSIONI

Questo lavoro ha permesso di mettere in evidenza alcuni limiti dell'approccio lineare nella verifica dei recipienti in pressione. Non di rado infatti la presenza di rilevanti carichi di progetto, combinati all'applicazione della procedura di linearizzazione delle sollecitazioni, determina una non accettabilità del design, con la conseguente necessità di modificare la geometria iniziale o ridurre i carichi di progetto per rientrare all'interno del range ammissibile.

Per contro l'approccio non lineare, benché risultati computazionalmente più oneroso rispetto al calcolo lineare, e richieda una maggiore attenzione per la verifica a collasso plastico, permette una verifica più immediata dell'integrità strutturale del recipiente in pressione.

Nel nostro caso di studio, il componente analizzato, che non risultava verificato in campo elastico utilizzando la procedura di linearizzazione, supera la verifica utilizzando l'approccio dell'analisi non-lineare.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ASME VIII Div.2 – Ed. 2015 ASME Boiler and pressure Vessel - Alternative Rules
- ASME II D - Ed. 2015 ASME Boiler and pressure Vessel - Material Properties