



---

# Verifica sismica delle apparecchiature industriali di processo

---

Metodologie di calcolo della vulnerabilità di impianti  
con riferimento alle norme tecniche e agli standard  
applicabili in Italia

---

**Giorgio Brunelli**

*Società Italiana Costruzioni Industriali*

**Francesco Borgognoni**

*Architetto, libero professionista, Roma*



In un precedente articolo [1] sono stati esaminati e discussi gli effetti sismici sui sistemi di tubazioni degli impianti industriali. In questo articolo vengono discusse le problematiche connesse alla progettazione e alla verifica per azioni sismiche delle apparecchiature di processo cilindriche assisimmetriche tipiche dell'industria chimica, petrolchimica e farmaceutica:

- serbatoi cilindrici verticali od orizzontali;
- tank e sili di stoccaggio;
- torri di distillazione e scrubber;
- camini;
- reattori in fase liquida tipo CSTR (Continuous-flow Stirred-Tank Reactor).

Non rientrano nello scopo del presente articolo i forni a cattedrale, i serbatoi tipo Horton e i serbatoi interrati.

In un recente convegno promosso dall'Enea [2] sono state approfondite le tematiche connesse alla sicurezza sismica degli impianti chimici a Rischio di Incidenti Rilevanti (RIR) soggetti al D.Lgs. 334/99. I diversi interventi hanno evidenziato, tra l'altro:

- l'attuale carenza normativa sismica italiana relativamente agli impianti RIR (Maugeri M.);
- la notevole diffusione sul territorio degli impianti RIR (Dattilo F.) in particolare in regioni a elevata sismicità (Cocina S.);
- l'inadeguatezza dell'approccio probabilistico per la valutazione della pericolosità sismica (PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis) adottato dagli Eurocodici e dalle attuali Norme Tecniche italiane e l'opportunità di un approccio deterministico (NDSHA, Neo-Deterministic Seismic Hazard Scenarios) per la valutazione del "terremoto di progetto" (Peresan A., Panza G.);
- la necessità di una differente definizione degli stati limite di verifica per gli impianti RIR (Clemente P.);
- la necessità di una adeguata valutazione del rischio sismico (Na-Tech) nella redazione dei Rapporti di Sicurezza (Rossini V. e Carli P.) e nella Pianificazione di Emergenza Esterna (Geri F.).

In effetti, il D.Lgs. 334/99 definisce come "incidente rilevante" un evento possibile come incendio, esplosione o rilascio in ambiente di sostanze pericolose e solo in via residuale accenna anche a cause

In effetti, il D.Lgs. 334/99 definisce come "incidente rilevante" un evento possibile come incendio, esplosione o rilascio in ambiente di sostanze pericolose e solo in via residuale accenna anche a cause "esterne" all'impianto per la redazione del Rapporto di Sicurezza [3] ovvero a condizioni "anomale" per il Sistema di Gestione Qualità [4].

"esterne" all'impianto per la redazione del Rapporto di Sicurezza [3] ovvero a condizioni "anomale" per il Sistema di Gestione Qualità [4]. Tuttavia, la nuova Direttiva 2012/18/UE (Seveso III) identifica esplicitamente quello sismico fra i rischi da analizzare [11].

In proposito risulta di

un certo interesse, a livello di ricerca universitaria, lo studio di Iervolino [5], che però è limitato ai grandi tank di stoccaggio di combustibili in considerazione della loro ampia diffusione e delle rilevanti conseguenze di un loro eventuale danneggiamento o collasso e di cui esiste una copiosa documentazione in letteratura. Nel lavoro di Iervolino, inseriti in una più ampia trattazione della valutazione quantitativa del rischio industriale (QRA), sono descritti i criteri di progettazione secondo le norme statunitensi API e AWWA e secondo gli Eurocodici.

Le considerazioni che seguono discendono dall'esperienza professionale diretta degli autori.

## 1. Quadro normativo

In via preliminare si esaminano criticamente le disposizioni legislative, le norme tecniche e gli standard applicabili alle apparecchiature di processo.

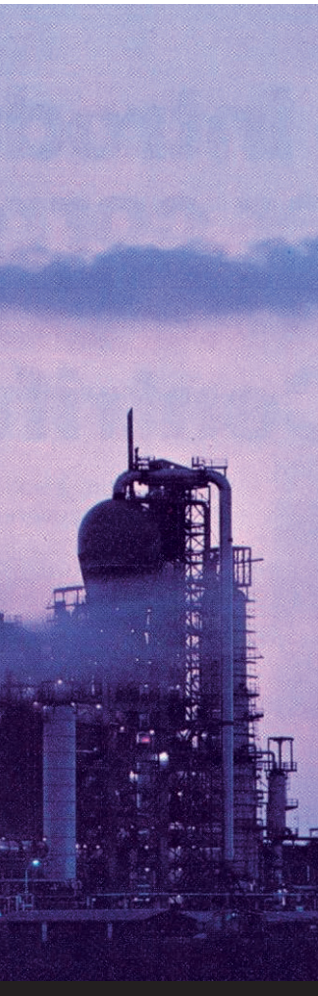
### 1.1 Generale

L'applicabilità delle norme sulle costruzioni ad alcune specifiche apparecchiature di processo viene esplicitamente prevista dalla Circolare M.LL.PP. 14/02/1974 n. 11951 che, per quanto riguarda gli impianti industriali, indica esplicitamente fra le opere soggette alla Legge 5/11/1971 n. 1086 (ora confluita nel Testo Unico DPR 380/2001) "i sili, le torri, le ciminiere, i portali di sostegno dei macchinari e di opere similari".

L'Ordinanza PCM n. 3274 del 20/03/2003, Art. 2, c. 3, prescrive la verifica sismica "degli edifici e delle opere che possono assumere rilevanza in relazione all'eventuale collasso". L'Ordinanza è stata recepita dalle diverse Regioni responsabilizzate della sua attuazione nel senso di includere nella prescrizione gli impianti RIR del D.Lgs. 334/99.

Il D.Lgs. 9/04/2008 n. 81 - *Testo Unico delle norme sulla sicurezza nei luoghi di lavoro*, prescrive in generale che il Documento di Valutazione deve riguardare tutti i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori (Art. 28) e in particolare il rischio di esposizione a sostanze pericolose (Titolo IX), di esposizione ad atmosfere esplosive (Titolo XI) e in generale di incendio. Inoltre, relativamente ai luoghi di lavoro "gli edifici e qualunque altra opera presente devono essere stabili e possedere una solidità che corrisponda al loro tipo di impiego e alle caratteristiche ambientali" (All. IV).

Pur non individuando esplicitamente il rischio sismico fra quelli da prendere in considerazione, non vi è dubbio che questo debba essere incluso nel DVR aziendale fra quelli di tipo emergenziale (Titolo I, Capo III, Sez. VI) in quanto evento primario suscettibile di produrre incendio, esplosioni od esposizione a sostanze pericolose. Invece, le Procedure Standardizzate per la valutazione dei rischi previste dal Decreto (Art. 6.8-f) indicano esplicitamente il terremoto fra i rischi emergenziali. Queste prescrizioni si applicano anche agli impianti non-RIR.



## 1.2 Normativa italiana

### 1.2.1 D.M. 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)

Le NTC 2008, ultimo aggiornamento delle Norme Tecniche elaborate ai sensi della L. 1086/71 per le costruzioni in generale e della L. 64/74 per le costruzioni in zona sismica, sono fondamentalmente il recepimento italiano degli Eurocodici ma limitatamente alle costruzioni intese come edifici, civili o industriali, e non forniscono indicazioni relativamente alle apparecchiature di processo, neanche nei capitoli dedicati alle costruzioni in acciaio.

Per le apparecchiature di processo è quindi necessario fare riferimento direttamente agli Eurocodici pertinenti. Tuttavia, le NTC 2008 in quanto recepimento nazionale degli Eurocodici impartiscono le direttive per la valutazione della Pericolosità Sismica del territorio italiano (Allegati A, B, S e T) secondo l'approccio probabilistico PSHA e quindi, per lo scopo, devono essere osservate anche per la progettazione o verifica sismica delle apparecchiature di processo.

Alcune proposte di revisione e aggiornamento delle NTC 2008 [7] concordano con osservazioni critiche evidenziate nel seguito.

### 1.2.2 D.M. 31/07/2012 - Approvazione delle Appendici nazionali recanti i parametri tecnici per l'applicazione degli Eurocodici

Il Decreto, peraltro pubblicato solo a marzo del 2013, definisce alcuni dei parametri tecnici e delle opzioni lasciate dagli Eurocodici ai National Annexes. Per la parte già oggetto delle NTC 2008 vengono confermate le prescrizioni ivi contenute; per le apparecchiature si veda il par. 1.3.1 successivo.

### 1.2.3 D.Lgs. 25/02/2000 n. 93: Attuazione della direttiva 97/23/CE (PED) in materia di attrezzature a pressione

La Direttiva PED (Pressure Equipment Directive) si applica alla costruzione delle attrezzature sottoposte a una pressione massima ammissibile superiore a 0,5 bar(g) e quindi ricomprende non solamente le apparecchiature di processo a pressione ma anche le tubazioni, oltre certi limiti dimensionali e operativi, e gli insiemi (*skid-mounted packages*).

La messa in servizio delle attrezzature PED è disciplinata dal Regolamento DM 1/12/2004 n. 329. La PED non definisce procedure di calcolo ma si limita a fissare i Requisiti Essenziali di Sicurezza (RES,

Allegato I). La conformità ai RES è certificata dal fabbricante con l'apposizione del marchio CE.

Per quanto riguarda le azioni sismiche la PED indica genericamente di tener conto nella progettazione anche delle sollecitazioni dovute ai terremoti (Allegato I - 2.2.1).

Per quanto riguarda le metodologie di calcolo la PED non fornisce indicazioni dettagliate ma limita solamente le tensioni di membrana ammissibili per carichi prevalentemente statici e le efficienze massime ammissibili per i giunti saldati (All. I - 7.1 e 7.2), la massima accumulazione ammissibile per le valvole di sicurezza (7.3) e la minima pressione di prova idrostatica (7.4).

Per le attrezzature a pressione inferiore a 0,5 bar(g) (non CE) la PED si limita a raccomandare l'adozione di standard di calcolo affidabili.

### 1.2.4 D.P.R. 23/03/1998, n. 126: Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE (Atex) in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva

La Direttiva Atex non è direttamente attratta nella progettazione o nelle verifiche per azioni sismiche delle apparecchiature di processo in esame. Generalmente queste sono non-Atex in quanto prive di sorgenti di innesco proprie, con l'eccezione dei reattori CSTR per l'equipaggiamento elettrico degli agitatori e per i dispositivi meccanici di tenuta sull'asse.

Sta di fatto però che molte apparecchiature degli impianti chimici e la quasi totalità delle apparecchiature e delle macchine degli impianti RIR sono installate in aree classificate Atex. Le apparecchiature sono spesso munite di dispositivi di misurazione e controllo elettromeccanici, analogici o DCS (Distributed Control System).

Prima ancora dell'evento catastrofico del collasso di una apparecchiatura un sisma produce sensibili spostamenti relativi fra questa e i diversi componenti dell'impianto circostanti, che possono condurre a:

- danneggiamento delle condutture dei circuiti di potenza con protezione Ex-d con perdita della capacità di confinamento, possibile tranciamento dei cavi e conseguente innesco di esplosioni;
- danneggiamento dei circuiti di telemisura, segnalazione e controllo con protezione Ex-g o Ex-p con conseguente perdita di controllo del processo.

Pertanto, in una corretta valutazione del rischio sismico per una apparecchiatura di processo è necessario mettere in conto non solo lo stato limite di collasso strutturale e lo stato limite di danno

proprio, con perdita di tenuta e rilascio di sostanze pericolose, ma anche lo stato limite di danno ai dispositivi di servizio ancillari ad essa connessi.

## 1.3 Standard europei

### 1.3.1 Eurocodici

Con riferimento alla progettazione per azioni sismiche delle apparecchiature di processo, costruite in acciaio, i pertinenti Eurocodici sono:

- EN 1998-1 - *Design of structures for earthquake resistance -Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (EC 8-1);
- EN 1998-4 - *Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines* (EC 8-4);
- EN 1998-5 - *Design of structures for earthquake resistance Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects* (EC 8-5);
- EN 1998-6 - *Design of structures for earthquake resistance - Part 6: Towers, masts and chimneys* (EC 8-6).

L'Eurocodice 8 contiene prescrizioni specifiche per le azioni sismiche, integrative delle prescrizioni generali dell'Eurocodice 3 per la progettazione delle strutture in acciaio:

- EN 1993-1-1 - *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EC 3-1-1);
- EN 1993-1-6 - *Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures* (EC 3-1-6);
- EN 1993-1-8 - *Design of steel structures - Part 8 - Design of joints* (EC 3-1-8);
- EN 1993-3-1 - *Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys -Towers and masts* (EC 3-3-1);
- EN 1993-3-2 - *Design of steel structures - Part 3-2: Towers, masts and chimneys - Chimneys* (EC 3-3-2);
- EN 1993-4-1 - *Design of steel structures - Part 4-1: Silos* (EC 3-4-1);
- EN 1993-4-2 - *Design of steel structures - Part 4-2: Tanks* (EC 3-4-2).

L'EC 8-1 contiene prescrizioni generali per strutture costruite sia in acciaio che in conglomerato cementizio, normale o precompresso. Per la valutazione della pericolosità sismica rimanda ai National Annexes e quindi alle NTC 2008. Però, il calcolo delle azioni sismiche è impostato in maniera diversa dalle NTC 2008 come sarà evidenziato in seguito, ma per quanto riguarda le apparecchiature le Appendici Nazionali all'EC 8-4 e all'EC 8-6 riproducono comunque le prescrizioni delle NTC 2008. L'EC 8-4 fornisce inoltre le basi teoriche e le procedure semplificate per il calcolo degli effetti idrodinamici dei fluidi contenuti.

L'EC 3 è specifico per le strutture in acciaio. Per

in una corretta valutazione del rischio sismico per una apparecchiatura di processo è necessario mettere in conto non solo lo stato limite di collasso strutturale e lo stato limite di danno proprio, con perdita di tenuta e rilascio di sostanze pericolose, ma anche lo stato limite di danno ai dispositivi di servizio ancillari ad essa connessi

quanto riguarda le apparecchiature prende in considerazione essenzialmente serbatoi cilindrici verticali assisimmetrici a fondo piano posati direttamente sulla fondazione (EC 3-4-2) o su struttura portante (EC 3-4-1).

Le torri considerate dall'EC 3-3-1 non sono le stesse dell'industria chimica, cioè torri di distillazione e scrubber, bensì strutture normalmente intelaiate a supporto di altre opere (ad esempio pali o tralicci degli elettrodotti). Per le torri di distillazione e similari a struttura cava cilindrica verticale si deve fare riferimento all'EC 3-3-2.

Non sono presi specificamente in considerazione serbatoi cilindrici ad asse orizzontale per i quali però si può fare riferimento all'EC 3-1-6. Non sono previste esplicitamente apparecchiature a pressione anche se la pressione di esercizio è un parametro operativo da mettere in conto nelle verifiche di



resistenza e stabilità.

Il limite degli Eurocodici è che anche apparecchiature come tank, sili e camini sono viste nell'ottica di opere di ingegneria civile (ad esempio serbatoi per acqua) e quindi la loro applicazione alle apparecchiature industriali di processo richiede flessibilità interpretativa e affinamento dei parametri di progettazione.

### 1.3.2 EN 13445-3 - Unfired pressure vessels - Part 3 - Design (Norma Armonizzata)

La EN 13445 si applica ai recipienti a pressione interna o esterna costruiti in acciaio. In particolare, la EN 13445, Part 3, *Design* recepisce le prescrizioni della Direttiva PED per conformità ai RES (Annex ZA). La norma considera recipienti cilindrici assisimmetrici:

- con fondi emisferici, torosferici, conici o piani;
- di tipo verticale supportato da gonna di sostegno o da piedritti applicati al fondo o al fasciame;
- di tipo orizzontale supportati da selle.

Il limite degli Eurocodici è che anche apparecchiature come tank, sili e camini sono viste nell'ottica di opere di ingegneria civile (ad esempio serbatoi per acqua) e quindi la loro applicazione alle apparecchiature industriali di processo richiede flessibilità interpretativa e affinamento dei parametri di progettazione

La EN 13445-3 è impostata essenzialmente per la verifica nei confronti delle sollecitazioni dovute alla pressione. Per quanto riguarda le azioni sismiche, queste sono genericamente elencate come azioni esterne da prendere in considerazione (Clause 5.3.1 e 16.14.9) e per la loro determinazione si rimanda alle normative nazionali (Clause B.6.2, Note 1). Nessuna previsione esiste per gli effetti idrodinamici dei liquidi contenuti.

La norma prevede diversi metodi alternativi di calcolo (Clause 5.4.1):

- *Design by Formulae* (DBF): è il metodo principale basato su formule specifiche per i diversi casi di verifica con metodologia alle tensioni ammissibili;
- *Design by Analysis - Direct Route* (DBA-DR): metodo alternativo uguale al metodo di calcolo agli stati limite;
- *Design by Analysis - Stress Categories*: metodo alternativo peculiare della norma;
- metodi basati su prove sperimentali.

Il metodo DBF è quello normalmente adottato dai costruttori per i casi normali. Per scenari di carico eccezionali, quali quello sismico, il metodo può essere impiegato solo se si ritenga che le azioni possano essere trattate come carichi statici equivalenti (Clause 16.14.9); altrimenti, è necessario impiegare il metodo DBA-DR.

La EN 13445-3 pur essendo specifica per apparecchiature PED può pur sempre essere utilizzata

per apparecchiature a pressione inferiore a 0,5 bar(G); la stessa norma per le verifiche di stabilità all'imbozzamento del fasciame prescrive di considerare una pressione interna nulla.

### 1.3.3 EN 13121 - GRP tanks and vessels for use above ground

La EN 13121 si applica alla costruzione di recipienti e apparecchi in materiale composito (tipicamente poliestere rinforzato con fibre di vetro) disposti fuori terra e che sono di diffuso impiego nell'industria chimica.

La particolarità degli apparecchi costruiti in materiale composito consiste nella anisotropia delle strutture membranali. Negli apparecchi costruiti semplicemente con il metodo Filament Winding (FW) resistenza e modulo elastico sono molto maggiori in direzione circonferenziale piuttosto che in direzione assiale (meridiana) e di conseguenza sono inadatti a resistere a sollecitazioni orizzontali rilevanti. Solo adottando laminati stratificati ad avvolgimento incrociato (EFW) o con rowing unidirezionale assiale (WRUD) gli apparecchi possono essere in grado di resistere ad azioni orizzontali rilevanti.

La EN 13121 - *Part 3 - Design and workmanship* prevede genericamente le azioni sismiche fra i diversi carichi esterni da prendere in considerazione; per la loro determinazione si rimanda alle normative nazionali (Clause 9.2.3).

Nessuna previsione esiste per gli effetti idrodinamici dei liquidi contenuti.

La metodologia di calcolo adottata è specifica in relazione alle caratteristiche particolari del materiale ma può essere sostanzialmente assimilata al metodo delle tensioni ammissibili.

### 1.3.4 EN 13480-3 - Metallic industrial piping - Part 3: Design and calculation (Norma Armonizzata)

La EN 13480 si applica ai sistemi di tubazioni industriali e quindi si cita nel presente articolo in quanto rilevante ai fini della verifica delle tubazioni connesse alle apparecchiature di processo.

## 1.4 Standard statunitensi

Gli impianti petroliferi e petrolchimici presenti in Italia, nazionali e multinazionali, sono prevalentemente progettati con riferimento agli standard statunitensi, che qui si citano per completezza del panorama normativo:

- API 650 - *Welded Steel Tanks for Oil Storage*;
- ASME - *Boiler and Pressure Vessel Code*;
- ASME B 31.3 - *Process Piping Code*.

Le azioni sismiche sono valutate secondo criteri locali (par. 3.1).

## 2. Progettazione per azioni sismiche

Per quanto detto per la progettazione e per la verifica per azioni sismiche delle apparecchiature di processo si deve fare riferimento (si veda anche EC 8-4 Clause 1.1.(4)):

- per la pericolosità sismica del sito di installazione alle NTC 2008;
- per la valutazione delle azioni sismiche all'EC 8-1;
- per la progettazione e la verifica di apparecchiature non-PED previste esplicitamente dagli Eurocodici, agli EC 8-4, EC 8-6, EC 3-3 ed EC 3-4;
- per la progettazione e verifica di apparecchiature PED alla EN 13445-3;
- per la progettazione e verifica di apparecchiature non-PED non previste dagli EC 8-4 ed EC 8-6, alla EN 13445-3 o all'EC 8-1-6;
- per la progettazione e la verifica di apparecchiature in materiale composito alla EN 13121;
- per le apparecchiature non previste dagli EC 8-4 ed EC 8-6 questi possono tuttavia essere utilizzati per le parti non specifiche per le apparecchiature previste; in tal caso non sono applicabili le relative Appendici Nazionali.

### 2.1 Pericolosità sismica

Le NTC 2008 forniscono i parametri necessari per calcolare le azioni sismiche ( $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_c^*$ ) per ogni nodo del reticolo sismico nazionale in funzione del tempo di ritorno  $T_R$  da cui derivare, con le equazioni appropriate i parametri per ogni sito geografico. L'EC 8-1 (Clause 3.2.1.(3)) prende in considerazione il valore di riferimento di picco (PGA) dell'accelerazione del terreno di riferimento (*bedrock*)  $a_{gR}$ , scelto dalle autorità nazionali per ogni zona sismica, corrispondente al periodo di ritorno di riferimento  $T_{NCR}$  dell'azione sismica per il requisito di non-collasso (o equivalente probabilità di riferimento di superamento in 50 anni,  $P_{NCR}$ ) scelto dalle autorità nazionali. A questo periodo di ritorno di riferimento è assegnato un Fattore di Importanza pari a 1,0. Per periodi di ritorno  $T_R$  diversi da quello di riferimento  $T_{NCR}$  l'accelerazione di progetto  $a_g$  in un terreno di tipo A è uguale ad  $a_{gR}$  moltiplicata per il Fattore di Importanza. I Fattori di Importanza dipendono dalla Classe di Importanza dell'apparecchiatura.

Per le apparecchiature Classi e Fattori di Importanza sono definiti nelle EC 8-4 (Clause 2.1.4) ed EC 8-6 (Clause 4.1). Per le apparecchiature degli impianti chimici non-RIR è appropriata la Classe III, per gli impianti RIR la Classe IV; i relativi Fattori di Importanza sono definiti al punto 2.1.4(8). Tuttavia, l'Appendice Nazionale del D.M. 31/07/2012 rimanda alle Classi d'uso delle NTC 2008.

Le NTC 2008 prendono in considerazione un periodo di riferimento  $V_R$  uguale alla vita nominale

della costruzione  $V_N$  moltiplicata per il coefficiente d'uso  $C_U$ , dipendente dalla Classe d'uso della "costruzione". Dal periodo di riferimento  $V_R$  si calcola il tempo di ritorno  $T_R$  in funzione della probabilità di superamento  $P_{VR}$  stabilita per ogni stato limite (Tab. 3.2.1). Per gli impianti di processo la  $V_N$  di una apparecchiatura può coincidere o meno con il suo "tempo di missione" dipendentemente da considerazioni di usura e/o obsolescenza tecnica.

Per gli impianti non-RIR è appropriata la Classe d'uso III, mentre per gli impianti RIR la Classe IV (par. 2.4.2); i valori dei relativi coefficienti d'uso sono dati dalla Tab. 2.4.11.

Peraltro, primarie compagnie di assicurazione internazionali hanno suddiviso l'Italia in zone sismiche in base ai periodi di ritorno dei terremoti, variabili da 50 a 500 anni [8]; per queste zone viene richiesta per progettazioni o verifiche l'adozione di accelerazioni orizzontali (applicate brutalmente a tutta la costruzione e ai suoi componenti secondari), variabili da 0,25g a 1,30g.

### 2.2 Stati limite

Per le apparecchiature in esame l'EC 8-4 definisce due stati limite a cui associare la probabilità di superamento  $P_{VR}$  stabilita dai National Annexes e che sono sostanzialmente diversi da quelli previsti dalle NTC 2008:

- *Damage Limitation State* (DLS), correlato ai requisiti di totale integrità del sistema, inteso come complesso apparecchiatura-accessori ad essa connessi, di tenuta nei confronti di perdite del contenuto (Clause 2.1.3.(2)P) e di mantenimento di un minimo livello di operatività;
- *Ultimate Limit State* (ULS), definito come quello corrispondente al collasso strutturale dell'apparecchiatura ma anche alla perdita di tenuta degli altri elementi del sistema con le sue possibili conseguenze (Clause 2.1.2.(2)P e (3)P) l'avaria degli altri accessori del sistema restando compensata dall'intervento dei dispositivi di protezione passiva.

L'Appendice Nazionale (D.M. 2012, EC 8-Parte 4a) nel par. 3) considera solamente lo stato limite di danno (SLD) con probabilità di superamento  $P_{VR}$  del 63% nel periodo  $V_R$  e lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) con probabilità di superamento  $P_{VR}$  del 10%. Questa prescrizione non coincide con il requisito di non-collasso come previsto dall'ULS dell'EC 8-4.

Lo stato limite ultimo ULS così come definito dall'EC 8-4 (Clause 2.1.2.(3)P) può essere considerato rappresentato dallo SLV delle NTC per apparecchiature che non contengono le sostanze pericolose del D.Lgs. 334/99 in impianti non-RIR. Tuttavia, l'Appendice Nazionale, in conformità all'EC 8-4 (Clause 1.1(4)), prevede che, in relazione ai rischi ambientali e per la popolazione, possano essere adottate prescrizioni aggiuntive rispetto a quelle normali.

Per apparecchiature che contengono sostanze pericolose, ovvero in impianti RIR anche per apparecchiature che non contengono sostanze pericolose ma il cui collasso può innescare una catena di eventi pericolosi per le persone e per l'ambiente circostante, lo stato limite ultimo può quindi essere considerato rappresentato dallo stato limite di non-collasso SLC delle NTC con  $P_{VR}$  del 5%.

Le NTC 2008 sono essenzialmente applicabili alle costruzioni civili, mentre le  $P_{VR}$  indicate per i diversi stati limite possono ancora essere considerate appropriate per gli impianti non-RIR o comunque per apparecchiature di deposito isolate e confinate (*tankfarms*).

Per gli impianti RIR per il terremoto di progetto si dovrebbero adottare stati limite più appropriati in analogia con quanto previsto dalla EN 1473 per gli impianti di rigassificazione LNG (in [2] e come anche previsto dall' EC 8-4 in 1.1(4)) e precisamente:

- *Operational Basis Earthquake* (OBE) per un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 475 anni, limite fino al quale deve essere garantita la completa e totale funzionalità dell'impianto e di ogni suo componente;
- *Safe Shutdown Earthquake* (SSE) per un periodo di ritorno  $T_R$  pari a 5000 anni, assimilabile al "terremoto massimo credibile", limite fino al quale deve essere garantita l'integrità delle apparecchiature e delle strutture essenziali per la sicurezza degli operatori e della popolazione e la possibilità di fermare l'impianto senza conseguenze irreparabili. Il  $T_R$  previsto corrisponde a una  $P_{VR}$  dell'1% in 50 anni. Poiché il massimo  $T_R$  previsto dalla normativa italiana è 2475 anni, corrispondente a una  $P_{VR}$  del 2% in 50 anni, la PGA per un  $T_R$  di 5000 anni deve essere valutata in base alle conoscenze storiche e tettoniche del sito.

In definitiva, in mancanza di prescrizioni normative specifiche per gli impianti RIR la definizione dell'appropriato stato limite resta una scelta aziendale (par. 3).

## 2.3 Azioni sismiche

### 2.3.1 Componenti del moto

Per sili e tank l'EC 8-4 prescrive di considerare le due componenti traslazionali orizzontali consuete e la componente verticale (Clause 3.2.(1)P); qualora l'apparecchiatura sia assisimmetrica come costruzione propria e come carichi esterni portati, può essere considerata una sola componente orizzontale. Per apparecchiature cilindriche verticali snelle autoportanti l'EC 8-6 (Clauses 3.1(1) e 4.2.5) prescrive di mettere in conto anche le componenti rotazionali del moto del terreno (*rocking*) [11].

### 2.3.2 Effetti idrodinamici

Il calcolo degli effetti idrodinamici dei liquidi contenuti nei tank di stoccaggio è trattato nell'Annex A dell'EC 8-4, ove è descritta la metodologia di calcolo analitica e quella semplificata [9] comunemente nota come Spring Mass Model (SMM).

Il metodo di calcolo analitico deve essere impiegato, unitamente a un modello agli elementi finiti, per i tank flessibili di grandi dimensioni [11].

### 2.3.3 Spettri di risposta

Le azioni sismiche sono descritte in termini di spettri di risposta elastici anche per le apparecchiature di processo (EC 8-4, Clause 2.2.(1)P ed EC 8-6, Clause 3.2).

Due diversi tipi di spettri di risposta in accelerazione per le componenti orizzontali sono previsti dall'EC 8-1 (Clause 3.2.2) in dipendenza dalle caratteristiche tettoniche del sito. L'applicazione a livello nazionale è realizzata dalle NTC 2008 (par. 3.2.3) con l'introduzione del fattore  $F_0$  del sito.

Le NTC 2008 forniscono anche gli spettri di risposta elastici in accelerazione per la componente verticale e lo spettro in spostamento orizzontale.

Gli spettri di risposta elastici in rotazione (*rocking*) sono forniti dall'EC 8-6 nell'Annex A. Gli spettri di risposta elastici dipendono, tra l'altro, dal periodo di vibrazione e dallo smorzamento viscoso strutturale, parametri che per l'applicazione alle apparecchiature di processo richiedono una analisi più approfondita [11].

#### 2.3.3.1 Periodi di vibrazione

I periodi di vibrazione da prendere in considerazione dipendono dal metodo di analisi adottato (par. 2.5).

Per i tank cilindrici verticali a fondo piano e ancorati, analizzati con il metodo semplificato SMM, il periodo di vibrazione fondamentale (1° modo) è dato direttamente dal metodo (EC 8-4, Annex A, Clause A.3.2.2.1) per la risposta sia inerziale (cosiddetto *impulsive*) sia dinamica (cosiddetto *convective*, effetto *sloshing*).

Per altre condizioni e per altri tipi di apparecchiature il metodo di calcolo più conveniente è il metodo di Rayleigh-Ritz [11].

#### 2.3.3.2 Smorzamento viscoso

Lo smorzamento viscoso da impiegare nelle equazioni spettrali elastiche deve essere quello composto tra lo smorzamento strutturale e quello del materiale contenuto ed eventualmente quello della fondazione qualora questa non possa essere considerata rigida (EC 8-4, Clauses 2.3.3.1, 2.3.3.2, 2.3.3.3 e 2.3.3.4).

Per apparecchiature in acciaio lo smorzamento strutturale normalmente adottato per lo SLU è il 4%

(EC 8-6, Annex B). Per apparecchiature in composito GRP (Glass Reinforced Plastics) è normalmente adottato uno smorzamento del 5-7%.

Le apparecchiature e per i fluidi di processo è necessario adottare uno smorzamento composto, calcolato in base alla equivalente energia dissipata in funzione della viscosità e della densità del fluido alla temperatura operativa

Per lo smorzamento del materiale contenuto l'EC 8-4 suggerisce il 10% per i materiali granulari e lo 0,5% per i liquidi. Ma lo smorzamento dello 0,5% per i liquidi può essere ritenuto valido per acqua a temperatura ambiente poiché questa è la condizione per la quale sono state sviluppate le esperienze per i tank di stoccaggio. Per le apparecchiature e per i fluidi di processo è necessario adottare uno smorzamento composto, calcolato in base alla equivalente energia dissipata in funzione della viscosità e della densità del fluido alla temperatura operativa [11].

## 2.5 Metodi di analisi

L'EC 8-4 (Clause 2.3.1.(1)) e l'EC 8-6 (Clause 4.3.1.(1)) prevedono come standard il metodo di analisi elastica lineare, statica o dinamica.

I metodi di analisi non lineare dinamici (*time-history*) o statici (*push-over*) non comportano vantaggi particolari per apparecchiature che sono in prevalenza isostatiche e con scarsa capacità dissipativa.

L'analisi lineare statica (metodo delle forze laterali) è sempre ammessa per tutte le apparecchiature la cui risposta non è significativamente influenzata dai modi di vibrare superiori al primo e che rispondono ai criteri di applicabilità specificati negli EC 8-1 (Clause 4.3.3.2.1), EC 8-4 (Clause 2.3.1.(7)) ed EC-8-6 (Clause 4.3.2.1). Quasi tutte le apparecchiature di processo rispondono a tali criteri con la sola possibile eccezione di torri di distillazione e camini di notevole snellezza, ovvero casi particolari con notevole differenza tra il baricentro delle masse e il baricentro delle rigidità.

L'analisi lineare statica è quindi sempre consigliabile per la sua maggiore semplicità e conseguente maggiore affidabilità e per la sua coerenza con il metodo di verifica DBF della EN 13445-3, mentre l'analisi modale è opportuno sia riservata ai casi particolari.

### 2.4.1 Fattori di struttura

Per le verifiche allo stato limite di danno SLD è prescritto l'utilizzo degli spettri di risposta elastici.

Per le verifiche allo stato limite ultimo SLU l'EC 8-4 permette l'uso degli spettri di risposta di progetto derivati da quelli elastici sostituendo il fattore  $\eta$  con

l'inverso del fattore di struttura  $q$  (Clause 2.3.1.(4)). Per strutture non dissipative in acciaio l'EC 8-4 e l'EC 8-6 ammettono un fattore di struttura massimo pari a 1,5 che tiene conto della sovraresistenza del materiale. Ma per sviluppare tale sovraresistenza il materiale deve subire una deformazione oltre il limite elastico, sia pur entro il limite ideale-plastico. Per apparecchiature verticali snelle, autoportanti, isostatiche, quali torri di distillazione con gona di supporto e camini non strallati, che possono raggiungere il limite elastico o peggio il limite di stabilità elastica in corrispondenza della base, una deformazione anche transitoria in campo plastico comporterebbe un notevole incremento degli effetti del secondo ordine con possibile collasso dell'apparecchiatura.

Per tali tipi di apparecchiature e in generale in assenza di zone appositamente previste come dissipative e con appropriata classe di duttilità, è necessario adottare un fattore di struttura  $q = 1$  [11]. Il possibile uso degli spettri di risposta elastici con  $q = 1.0$  anche per le verifiche agli stati limite ultimi è previsto nelle proposte di revisione delle NTC 2008 [7].

### 2.4.2 Distribuzione delle azioni orizzontali

Nel caso di analisi lineare statica le azioni devono essere distribuite in elevazione secondo l'equazione 4.10 dell'EC 8-1 (Clause 4.3.3.2.3.(2)P come richiamata da EC 8-4, Clause 2.3.1.(7)) con  $\lambda = 1$  ovvero, in prima approssimazione, secondo la 4.11, sostituendo le altezze agli spostamenti orizzontali. Questa equazione però è data nella Sez. 4.0 dedicata alle costruzioni e assume una distribuzione discreta delle masse. Nel caso delle apparecchiature di processo con masse distribuite lungo l'altezza queste non possono essere considerate concentrate nel loro baricentro ma è necessario sostituire alla sommatoria l'integrale dei prodotti massa  $\times$  spostamento ovvero massa  $\times$  altezza.

L'EC 8-1 specifica che le altezze devono essere misurate rispetto al piano di fondazione ovvero rispetto all'estradosso di un "basamento" rigido. Questo comporta implicitamente che in caso di "basamento" non rigido è necessario mettere in conto anche le relative massa e azioni. L'EC 8-1 non specifica le condizioni e le caratteristiche di un "basamento" rigido. Ma è necessario chiarire che la parola inglese *basement* ha il significato di piano cantinato o seminterrato e non di basamento o di fondazione a blocco [11].

## 2.5 Verifiche allo stato limite ultimo

Le verifiche richieste per azioni sismiche per tutti i tipi di apparecchiature sono, in generale, le seguenti:



Fig. 1 – Nel caso delle apparecchiature di processo, ad esempio in una tipica torre di distillazione, sono da considerare i seguenti carichi: peso proprio dell'apparecchiatura a vuoto; carico di esercizio; carichi esterni portati (piattaforme, passerelle, tubazioni ecc.); sovraccarichi accidentali; precompressione



- di resistenza del fasciame, dei supporti e degli ancoraggi;
- di equilibrio globale come corpo rigido;
- di stabilità elastica del fasciame e dei supporti.

Per tank, sili, camini e per apparecchiature assimilabili le verifiche sono eseguite con le regole degli EC 3-3 ed EC 3-4, tenendo presente che le azioni sismiche devono essere analizzate in campo elastico lineare e quindi le prescrizioni per le verifiche in campo plastico non sono pertinenti. Per le verifiche del fasciame delle apparecchiature cilindriche, gli EC 3-3 e 3-4 rimandano specificatamente all'EC 3-1-6.

Per le apparecchiature PED, o per altri tipi di apparecchiature diverse da quelle previste esplicitamente dagli Eurocodici, le verifiche possono essere eseguite secondo la EN 13445-3.

Per le apparecchiature in materiale composito GRP si deve fare riferimento alla EN 13121-3.

### 2.5.1 Dimensioni e tolleranze

Nella progettazione e nelle verifiche di apparecchiature cilindriche devono sempre essere messe in conto almeno le seguenti tolleranze sulle dimensioni geometriche nominali rilevanti ai fini del calcolo delle resistenze:

- eventuale sovrasspessore di corrosione;
- tolleranza di fabbricazione sullo spessore dei laminati;
- tolleranza di costruzione sul diametro nominale;
- tolleranza di ovalizzazione;
- tolleranza di eccentricità assiale tra le virole del fasciame;
- imperfezioni locali di costruzione ai fini delle verifiche di stabilità elastica;
- tolleranza di perpendicolarità asse-piano di appoggio per apparecchiature verticali;
- tolleranza di planarità dell'interfaccia appoggi-fondazione.

Le diverse modalità di calcolo degli effetti delle tolleranze e delle imperfezioni di costruzione sono descritte negli EC 3-3, EC 3-4, EC 3-1-6, nella EN 13445-3 e nella EN 13121-3 [11].

### 2.5.2 Effetti del 2° ordine

Per le verifiche di resistenza e di stabilità devono essere presi in considerazione gli effetti del 2° ordine  $P-\Delta$  quando assumono rilevanza significativa, come per le apparecchiature verticali sensibilmente snelle (EC 8-1, Clause 2.2.2.(5)P).

L'EC 3-3-2 fornisce una equazione approssimata per il momento del 2° ordine in condizioni statiche (Clause 5.2.3, eq. 5.6). In presenza di azioni sismiche l'EC 8-6 indica il metodo di calcolo da adottare in funzione degli spostamenti effettivi indotti dall'azione sismica (Clause 4.7.3). Gli effetti del 2° ordine devono essere combinati con quelli del 1° ordine,

calcolati in funzione sia delle eccentricità dei carichi sia della tolleranza totale di verticalità (tolleranza di perpendicolarità + tolleranza di planarità come sopra dette ovvero ancora del valore presunto di deviazione orizzontale (EC 3-3-2, Clause 5.2.2, eq. 5.4).

### 2.5.3 Verifiche di resistenza

Le verifiche di resistenza vengono eseguite rappresentando le azioni sismiche sulle masse inerziali come azioni globali descritte dalle risultanti momento flettente, momento torcente, trazione / compressione assiale e taglio, ciascuna calcolata per le diverse componenti del moto. Gli effetti dei liquidi contenuti vengono descritti dalla distribuzione delle pressioni interne.

Le verifiche sono eseguite con approcci diversi dagli Eurocodici, dalla EN 13445-3 o dalla EN 13121-3. Una analisi approfondita è riportata in [11].

### 2.5.4 Verifiche di equilibrio globale

Le verifiche per equilibrio globale come corpo rigido devono essere eseguite per apparecchiature non ancorate ovvero per la verifica di resistenza dei supporti e dei dispositivi di ancoraggio. Le verifiche di equilibrio sono:

- per ribaltamento;
- per scorrimento nell'interfaccia appoggi-fondazione.

È appena il caso di rilevare che nella combinazione delle azioni ribaltanti, azioni sismiche orizzontali ed eccentricità dei carichi interni o esterni portati, il segno della radice della combinazione SRSS per le azioni sismiche deve essere preso positivo, mentre nella combinazione delle azioni stabilizzanti, carichi permanenti e azioni sismiche verticali il segno di queste ultime deve essere negativo.

Per apparecchiature a fondo piano non ancorate è ammesso, sotto certe condizioni, il parziale sollevamento del bordo inferiore (EC 8-4, Annex A.9). Per la verifica per scorrimento il coefficiente di attrito supporto-fondazione deve essere preso al limite inferiore valido per attrito in condizioni dinamiche.

La verifica di resistenza dei bulloni di ancoraggio è trattata nell'EC 3-1-8 e per l'ancoraggio a basamenti in conglomerato dalla EN 1992-1-1 (EC 2).

### 2.5.5 Verifiche di stabilità elastica

Le verifiche di stabilità all'imbozzamento del fasciame sono previste in tutti gli standard.

Per tank, sili e camini le tensioni critiche di imbozzamento si calcolano con le formule fornite dall'EC 3-1-6 (stato limite LS3, Sez. 8 e Annex D) o l'equivalente EC 3-4-1 (Clause 5.3.2.4).

La EN 13445-3 considera ovviamente l'instabilità all'imbozzamento del fasciame solo come effetto delle azioni diverse dalla pressione interna. La

sola tensione critica considerata è quella meridiana (assiale) per compressione ed è data dalla Sez. 16.14.8.

Per apparecchiature non-PED è comunque opportuno affidarsi all'EC 3-1-6, che considera tutte e tre le tensioni critiche (meridiana, circonferenziale e tangenziale) e fornisce il criterio di composizione delle stesse (eq. 8.19) anche in presenza di pressione interna (par. 3).

Per apparecchiature PED è opportuna la verifica con entrambi i metodi.

La EN 13121-3 prevede la verifica di stabilità per carichi di compressione esterni assiali e circonferenziali (pressione esterna) nelle Sez. 10.3, 10.4, 10.5 e 10.11.

Per la verifica delle strutture di supporto si deve fare riferimento alle applicabili prescrizioni dell'EC 3-1-1.

## 2.5.6 Serbatoi cilindrici orizzontali

I serbatoi cilindrici orizzontali su selle rappresentano un caso particolare per complessità di analisi e di verifica per azioni sismiche.

L'EC 3 e l'EC 8 non prevedono apparecchiature cilindriche ad asse orizzontale. L'EC 8-4 fornisce solamente un metodo di calcolo approssimato per gli effetti idrodinamici dei liquidi contenuti (Annex A, Clause A.5).

La EN 13445-3 prende in considerazione i serbatoi orizzontali su selle nella Sez. 16.8. L'apparecchiatura viene modellata nel piano come trave appoggiata su cerniere, caricata staticamente solo dalla pressione, dal peso proprio e dal peso del fluido contenuto; non viene considerata la spinta sui fondi esercitata dal fluido contenuto. Le verifiche di resistenza e di stabilità del fasciame sono previste solamente in corrispondenza della mezzeria fra due selle e in corrispondenza dell'appoggio sulle selle. Le verifiche in mezzeria prendono in considerazione solo la pressione (interna o esterna), il momento flettente nel piano verticale assiale e il taglio nel piano verticale ortogonale dovuti ai carichi statici. La verifica in corrispondenza dell'appoggio è impostata in funzione della reazione verticale risultante dovuta ai carichi statici e assimilata a un carico lineare circonferenziale (Sez. 16.6).

Questo tipo di modellazione non è assolutamente soddisfacente per la verifica delle apparecchiature di processo. Non può essere ignorata la solidarietà delle selle con il fasciame, con o senza piastra di rinforzo, né la loro rigidità anche solo assiale, né il tipo di vincolo al basamento; inoltre, per la verifica per azioni sismiche è necessario mettere in conto anche le rigidità trasversale e torsionale delle selle. Una analisi approfondita di queste problematiche è riportata in [11].

## 3. Confronti numerici

Per meglio evidenziare i differenti approcci alla



Fig. 2 – Apparecchiatura tipica dell'industria di processo: scrubber installato in un impianto RIR (Rischio di Incidenti Rilevanti), autoportante, su una fondazione isolata profonda del tipo a plinto con solettone in conglomerato cemento armato in prima approssimazione considerato come rigido; i risultati dei calcoli sono riportati nel par. 3

progettazione previsti dalle diverse normative e discussi nei paragrafi precedenti si riportano i risultati dei calcoli eseguiti per una apparecchiatura tipica dell'industria di processo. Si tratta (**figura 2**) di uno scrubber installato in un impianto RIR, autoportante, su di una fondazione isolata profonda del tipo a plinto con solettone in conglomerato in cemento armato in prima approssimazione considerato come rigido.

Nella **tabella 1** sono riportate le dimensioni del complesso apparecchiatura-fondazione. Per semplicità di esposizione i carichi interni e i carichi esterni portati sono stati considerati come uniformemente ripartiti lungo il fasciame e non è stato considerato l'*hold-up* di fondo colonna.

Nella **tabella 2** sono riportati i calcoli della pericolosità sismica secondo le NTC 2008, secondo l'EC 8-1 e per lo stato limite SSE.

Nella **tabella 3**, sulla base della pericolosità sismica NTC e con analisi lineare elastica limitata per semplicità al solo 1° modo di vibrazione, sono confrontate le azioni sismiche e i carichi sismici sulla fondazione nel caso che il plinto sia considerato rigido ovvero elastico. L'analisi è stata ese-

## Tab. 1 - Caratteristiche costruttive

### Fasciame

• diametro interno (mm)	1300
• altezza cilindrica (mm)	13.600 TT
• spessore virole e fondi (mm)	10
• fondi tipo	torosferico semiellittico
• materiale	acciaio al carbonio S 275 ebanitato
• spessore di corrosione (mm)	0
• tolleranza di fabbricazione laminati (mm)	0,25
• tolleranza di costruzione sul diametro (%)	0,3
• tolleranza di ovalizzazione (%)	0,6
• ebanitatura (mm)	5
• densità (kg/m <sup>2</sup> × mm)	1,20
• peso sopra linea di tangenza inferiore (kN)	101,33
• peso fondo inferiore (kN)	5,56

### Gonna di supporto

• diametro interno (mm)	1320
• altezza cilindrica (mm)	1500
• spessore virole (mm)	16
• materiale	acciaio al carbonio S 275
• peso (kN)	16,14

### Plinto di fondazione

• tipo	ottagonale
• diametro inscritto (m)	1,75
• cavedio interno (m)	1.10
• altezza (m)	4,50
• conglomerato classe	C 20/25
• armatura (n)	32 $\Phi$ 20 + 16 $\Phi$ 8
• acciaio	B450C
• peso (kN)	174,97

## Tab. 2 - Pericolosità sismica

• sito di installazione	Italia Centrale
• categoria di sottosuolo	C
• categoria topografica	1
• tempo di missione $V_N$	anni 40

	NTC 2008	EC 8-1	SSE
• stato limite ultimo	SLC	ULS	SSE
• probabilità di superamento $P_V$ (%)	5	5	-
• Classe d'uso	IV	-	-
• Importance Class	-	IV	-
• coefficiente d'uso CU	2,0	-	-
• Importance Factor	-	1,6	-
• periodo di riferimento $V_R$ (anni)	80	40	40
• tempo di ritorno $T_R/T_{NCR}$ (anni)	1559	780	5000
• accelerazione di riferimento $ag_R$ (m/s)	-	1,621	2,479
• accelerazione massima $ag$ (m/s)	2,136	2,594	3,134
• fattore amplificazione spettro $F_0$	2,513	2,56	2,47
• periodo inizio velocità costante $TC^*$ (s)	0,283	0,28	0,29

### Tab. 3 - Azioni sismiche risultanti per complesso fondazione-apparecchio

	<b>fondazione rigida</b>	<b>fondazione elastica</b>
• periodo di vibrazione fondamentale T (s)	0,2487	0,2874
• periodo di vibrazione verticale Tv (s)	0,0173	0,0171
• smorzamento viscoso composto (%)	4,0	4,11
• fattore di struttura $q$	1,0	1,0
• accelerazione spettrale orizzontale Sd(T) (m/s <sup>2</sup> )	7,761	7,715
• accelerazione spettrale verticale Svd(T) (m/s <sup>2</sup> )	2,628	2,596
• fattore $\lambda$	1,0	1,0
• azione sismica globale orizzontale Fh (kN)	98,86	234,36
• parte fondazione (kN)	-	50,71
• parte gonna sostegno (kN)	1,37	10,91
• parte fondo inferiore (kN)	0,875	4,21
• parte fasciame sopra L.T. inferiore (kN)	96,61	183,65
• carichi sismici in fondazione, verticale (kN)	28,66	32,56
• orizzontale (kN)	96,62	183,65
• momento (kN × m)	850,68	1639,82

### Tab. 4 - Azioni sismiche risultanti separate fondazione e apparecchio

	<b>fondazione</b>	<b>apparecchiatura</b>
• periodo di vibrazione fondamentale T (s)	0,0288	0,2487
• periodo di vibrazione verticale Tv (s)	0,0061	0,0173
• smorzamento viscoso composto (%)	5,0	4,0
• fattore di struttura $q$	1,0	1,0
• accelerazione spettrale orizzontale Sd(T) (m/s <sup>2</sup> )	3,781	9,318
• accelerazione spettrale verticale Svd(T) (m/s <sup>2</sup> )	2,288	2,63
• fattore $\lambda$	1,0	1,0
• azione sismica globale orizzontale Fh (kN)	67,44	116,86
• parte fondazione (kN)	67,44	-
• parte gonna sostegno (kN)	-	1,62
• parte fondo inferiore (kN)	-	1,03
• parte fasciame sopra L.T. inferiore (kN)	-	114,20
• carichi sismici in fondazione, verticale (kN)	-	38,98
• orizzontale (kN)	-	116,86
• momento (kN.m)	-	1179,86

guita modellando l'apparecchiatura come *beam* poiché soddisfa ai requisiti dell'EC 8-6. I periodi fondamentali di vibrazione orizzontale e verticale sono stati calcolati con il metodo Rayleigh-Ritz. Il contributo ai periodi di vibrazione e ai momenti in fondazione da parte delle masse distribuite lungo l'altezza è stato calcolato con integrazione numerica (Gauss). La differenza fra i periodi di vibrazione pari al 15,6% è significativa e la fondazione non può essere considerata rigida. Per semplicità di esposizione non è stato considerato l'effetto del *rocking*, peraltro rilevante.

La notevole differenza fra le azioni sismiche nei due casi si spiega con il fatto che, applicando l'equa-

zione 4.11 dell'EC 8-1 il sistema apparecchiatura-fondazione viene considerato con un solo grado di libertà nel piano verticale e il contributo all'azione sismica globale della notevole massa della fondazione viene distribuito lungo tutta l'altezza del complesso. Questo risultato è manifestamente irrealistico, dato che la fondazione ha una massa maggiore dell'apparecchiatura ma un periodo di vibrazione proprio notevolmente inferiore. Paradossalmente tanto più la fondazione è massiccia tanto maggiore è l'effetto sull'apparecchiatura rispetto al caso di fondazione rigida. È quindi necessario considerare il sistema con almeno due gradi di libertà nel piano verticale con l'apparecchiatura come entità sepa-

## Tab. 5 - Compressioni critiche di imbozzamento del fasciame

	EC 3-1-6	EN 13445-3	Timoshenko
• Fabrication Tolerance Quality Class	C	-	-
• Dimple Tolerance Parameter	0,016	0,015	-
• imperfezione meridiana caratteristica $\Delta w_0$ (mm)	4,99	4,83	-
• compressione critica meridiana (N/mm <sup>2</sup> )	173,5	192,54	1892,28
• compressione critica circonferenziale (N/mm <sup>2</sup> )	9,20	-	(*)
• tensione critica tangenziale (N/mm <sup>2</sup> )	82,64	-	(*)

(\*) Timoshenko [10] fornisce le tensioni critiche solo per i casi di pressione esterna uniforme e di torsione uniforme

rata collegata alla fondazione, sia pure elastica, applicando l'approccio del *floor response spectrum* (EC 8-6, Annex D).

Nella **tabella 4** sono riportati i calcoli eseguiti considerando la fondazione autonoma e l'apparecchiatura soggetta all'accelerazione combinata di sottosuolo + fondazione.

Nella **tabella 5** si riporta il confronto fra le compressioni critiche di imbozzamento del fasciame calcolate secondo l' EC 3-1-6 e secondo la EN 13445-3. Si riporta anche per confronto la compressione critica di imbozzamento teorica secondo Timoshenko [11], che però non tiene conto delle imperfezioni locali di costruzione.

## 4. Conclusioni

La vastità e la complessità delle problematiche connesse alla verifica per azioni sismiche delle apparecchiature di processo degli impianti chimici industriali dimostrano ancora una volta la necessità di una stretta collaborazione e coordinamento tra tecnici processisti, meccanici impiantisti, geotecnici e strutturisti.

La completa conoscenza delle caratteristiche costruttive e dei parametri operativi è indispensabile per una corretta modellazione e per una soddisfacente analisi strutturale delle apparecchiature di processo.

## Bibliografia

[1] Brunelli G.: *Verifica degli effetti sismici su tubazioni di impianti industriali* - Impiantistica Italiana, luglio-agosto 2013, pag. 64-70

[2] Enea - Glis: *Giornata di studio sulla sicurezza sismica degli impianti chimici a rischio di incidenti rilevanti* - Roma, 7 febbraio 2013

[3] Decreto Legislativo 17/08/1990, n. 334 - Allegati II - IV

[4] Decreto Ministero Ambiente 9/08/2000 - Art. 7, c. 2

[5] Iervolino I.: *Analisi quantitativa di rischio sismico nell'industria di processo* - Tesi in Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2003

[6] Piccini N., Galvagni R., Ciarambino C. e I.: *L'Analisi dei Rischi* - E. Aidic Servizi Srl, 2011

[7] Consiglio Nazionale degli Ingegneri - Tavolo tecnico per le Nuove NTC2008 - *Osservazioni "Progettazione per Azioni Sismiche"*

[8] Factory Mutual Insurance Company: *FM Global Property Loss Prevention Data Sheets - 1.2 - Earthquakes*, 2011

[9] Malhotra P.K.: *Seismic Analysis of Liquid-Storage Steel Tanks* - Structural Engineering International, 1997

[10] Timoshenko S.: *Theory of Elastic Stability* - McGraw-Hill Book Company - 2nd Ed., 1961

[11] Brunelli G., Borgognoni F.: [www.sicimpianti.com/documents/seismicequipments.pdf](http://www.sicimpianti.com/documents/seismicequipments.pdf)



## Giorgio Brunelli

Giorgio Brunelli è laureato in Ingegneria Chimica presso l'Università di Roma "La Sapienza" nel 1964. Dopo diverse esperienze professionali in importanti società italiane e straniere dal 1972 è Direttore Tecnico e Consigliere di Amministrazione della SICI (Società Italiana Costruzioni Industriali a.r.l.),

con specifica responsabilità per la progettazione di processo, per la termotecnica e per la direzione e supervisione dei cantieri.

Accanto alle attività professionali, Giorgio Brunelli ha svolto anche attività didattica presso l'Università "La Sapienza" di Roma e altre istituzioni.



## Francesco Borgognoni

Laureato in Architettura presso l'Università Roma "La Sapienza", è abilitato all'esercizio della professione di Architetto nel 1992.

Tra le varie esperienze professionali si evidenziano: nel 1999 coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione e di esecuzione nel Comitato Territoriale Paritetico per la prevenzione infortuni, igiene e ambiente di lavoro di Roma e Provincia; dal 1992 al 2000 collaborazione con la Prof. Ing. Antonio Michetti & Figli Srl di Roma per la progettazione strutturale complessa e direzione dei lavori di edifici di culto, biblioteche, ospedali e impianti

sportivi; consulente per le società Con.Fa.Ro. Costruzioni, Cogeim, Galileo; responsabile della Area Tecnica della Geim, Gruppo immobiliare e impresa di costruzioni; dal 1996 a oggi partner della Società Italiana Costruzioni Industriali con responsabilità per la progettazione strutturale complessa di edifici industriali e opere civili.

È assistente volontario e membro di commissione di esami del Corso di Tecnica delle Costruzioni I presso la facoltà di Architettura dell'Università di Roma.

## Seismic design of industrial process plant equipments

A broad and detailed survey is carried out of the various Italian and European Codes and Regulations as relevant for the seismic design of industrial process plants main equipments. Italian national Annexes to the Eurocodes apply only to some type of process equipment of the chemical industry. For the equipment types not provided for in the Italian national Annexes reference is to be made directly either to the Eurocodes or to the Pressure Equipment Directive when binding. Coordination between different code provisions is also outlined for High Risk plants and for GRP built equipment.

Differing approaches and somewhat conflicting provisions are examined and discussed along with related numerical results for a case example of an existing item.

