

## Verifica delle attrezzature a pressione per carichi diversi dalla pressione: Vento e Sisma

E. Becherini\*, M. Mencacci\*, F. Zichichi\*\*

\*Enerconsulting S.r.l.

\*\*INAIL – UOT CVR Bologna

### Sommario

L'articolo si propone di dare nuovi spunti sui modus operandi atti alla progettazione per carichi diversi dalla pressione, nella fattispecie individuabili nel vento e sisma.

Trascurare o applicare non correttamente i carichi diversi dalla pressione sulle attrezzature, ove necessario, può rendere gli apparecchi a pressione non sicuri, in quanto gli stessi, sia localmente che alle volte in toto, possono risultare sottodimensionati. Si pensi per esempio alle colonne di raffineria [1].

Il calcolo meccanico di un'attrezzatura a pressione è di solito ben definibile da procedure estraibili dai Codici di Calcolo atti allo scopo.

Spesso invece è difficoltoso capire quando si deve considerare nella progettazione dei carichi derivanti dovuti al sisma ed al vento e, se del caso, integrare i codici di calcolo degli apparecchi a pressione con i codici di calcolo normalmente usati nelle costruzioni civili.

In sostanza, proporremo un excursus normativo ragionato per:

- capire quando si dovranno applicare i carichi dovuti al sisma ed al vento ad un apparecchio a pressione;
- capire come le norme per il dimensionamento meccanico indirizzino il calcolo statico sugli apparecchi e quindi come sovrapporre alla pressione interna ed esterna i carichi derivanti da vento e sisma.

### 1. Introduzione

Riferendosi ad un contesto sia europeo che internazionale è di notevole importanza considerare il fatto che sia la Direttiva 97/23/CE - PED, che la normativa americana ASME Boiler and Pressure Vessel Code [2] e molti altri codici extra europei, come ad esempio il Codice Australiano AS1210 [3], etc, impongono che il progetto di un apparecchio a pressione debba tener conto, se necessario, di carichi diversi dalla pressione, quali vento, sisma, carichi imposti sui bocchelli trasmessi dal piping collegato, neve, sollecitazioni dovute al traffico etc.

Infatti molto spesso nella verifica degli apparecchi a pressione sarebbero (sono) da considerare due tipologie di calcolo [4]:

- calcolo meccanico per la resistenza alla pressione (Mechanical Calculation);
- calcolo strutturale per i carichi diversi dalla pressione (Statical Calculation).

La parte inerente al Mechanical Calculation viene in questa sede tralasciata, trattandosi dei classici calcoli meccanici eseguiti tramite formule o mediante analisi FEM per il dimensionamento meccanico delle virole, fondi, aperture, tronchetti, etc, etc.. Il nostro focus invece si concentrerà sullo Statical Calculation inerente ai carichi da vento e sisma. La "traduzione tecnica" dell'Allegato 1 della Direttiva PED per gli apparecchi a pressione non sottoposti alla fiamma, la norma armonizzata EN 13445 [5], nella Parte 3 "Progettazione". Questa riporta, al paragrafo 5.3 i carichi che si debbono prendere in considerazione per una adeguata progettazione (Tabella 1):

Anche, il sopra citato codice americano ASME nella Sezione VIII Division 1 "Rules for Construction of Pressure Vessels" al paragrafo UG-22 "Loadings", impone che il progetto, sia eseguito tenendo presente, i carichi della Tabella 2.

In the design of a vessel the following actions shall be taken into account, where relevant:

- a) internal and/or external pressure;
- b) maximum static head of contained fluid under operating conditions;
- c) weight of the vessel;
- d) maximum weight of contents under operating conditions;
- e) weight of water under hydraulic pressure test conditions;
- f) wind, snow and ice loading;
- g) earthquake loading;
- h) other loads supported by or reacting on the vessel, including loads during transport and installation.
- j) shock loads caused by water hammer or surging of the vessel contents;
- k) bending moments caused by eccentricity of the centre of the working pressure relative to the neutral axis of the vessel;
- l) stresses caused by temperature differences including transient conditions and by differences in coefficients of thermal expansion;
- m) stresses caused by fluctuations of pressure, temperature, and external loads applied to the vessel;
- n) stresses caused by the decomposition of unstable fluids.

Tabella 1

#### **UG-22 LOADINGS**

The loadings to be considered in designing a vessel shall include those from:

(a) internal or external design pressure (as defined in UG-21);

(b) weight of the vessel and normal contents under operating or test conditions;

(c) superimposed static reactions from weight of attached equipment, such as motors, machinery, other vessels, piping, linings, and insulation;

(d) the attachment of:

(1) internals (see Nonmandatory Appendix D);

(2) vessel supports, such as lugs, rings, skirts, saddles, and legs (see Nonmandatory Appendix G);

(e) cyclic and dynamic reactions due to pressure or thermal variations, or from equipment mounted on a vessel, and mechanical loadings;

(f) wind, snow, and seismic reactions, where required;

(g) impact reactions such as those due to fluid shock;

(h) temperature gradients and differential thermal expansion;

(i) abnormal pressures, such as those caused by deflagration;

(j) test pressure and coincident static head acting during the test (see UG-99).

Tabella 2

E così anche nell'ingegneristicamente più spinto codice ASME Sezione VIII Division 2 "Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules" (usato per alte pressioni, da 200 bar-g fino a 689,5 bar-g, al di là delle quali è consigliato usare l'ASME VIII Division

3) vengono indicati i “Design Loads” da considerare, sia per la metodologia di calcolo Design by Formule (Tabella 3), sia per la metodologia Design by Analysis (Tabella 4).

Design Load Parameter	Description
$P$	Internal or External Specified Design Pressure (see paragraph 4.1.5.2(a))
$P_s$	Static head from liquid or bulk materials (e.g. catalyst)
$D$	Dead weight of the vessel, contents, and appurtenances at the location of interest, including the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Weight of vessel including internals, supports (e.g. skirts, lugs, saddles, and legs), and appurtenances (e.g. platforms, ladders, etc.)</li> <li>• Weight of vessel contents under operating and test conditions</li> <li>• Refractory linings, insulation</li> <li>• Static reactions from the weight of attached equipment, such as motors, machinery, other vessels, and piping</li> <li>• Transportation loads (the static forces obtained as equivalent to the dynamic loads experienced during normal operation of a transport vessel [see paragraph 1.2.1.2(b)])</li> </ul>
$L$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appurtenance Live loading</li> <li>• Effects of fluid flow, steady state or transient</li> <li>• Loads resulting from wave action</li> </ul>
$E$	Earthquake loads (see ASCE 7 for the specific definition of the earthquake load, as applicable)
$W$	Wind Loads [see 4.1.5.3(b)]
$S$	Snow Loads
$F$	Loads due to Deflagration

Tabella 3

Loading Condition	Design Loads
Pressure Testing	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Dead load of component plus insulation, fireproofing, installed internals, platforms and other equipment supported from the component in the installed position.</li> <li>(2) Piping loads including pressure thrust</li> <li>(3) Applicable live loads excluding vibration and maintenance live loads.</li> <li>(4) Pressure and fluid loads (water) for testing and flushing equipment and piping unless a pneumatic test is specified.</li> <li>(5) Wind loads</li> </ol>
Normal Operation	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Dead load of component plus insulation, refractory, fireproofing, installed internals, catalyst, packing, platforms and other equipment supported from the component in the installed position.</li> <li>(2) Piping loads including pressure thrust</li> <li>(3) Applicable live loads.</li> <li>(4) Pressure and fluid loading during normal operation.</li> <li>(5) Thermal loads.</li> </ol>
Normal Operation plus Occasional (note: occasional loads are usually governed by wind and earthquake; however, other load types such as snow and ice loads may govern, see ASCE 7)	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Dead load of component plus insulation, refractory, fireproofing, installed internals, catalyst, packing, platforms and other equipment supported from the component in the installed</li> <li>(2) Piping loads including pressure thrust</li> <li>(3) Applicable live loads.</li> <li>(4) Pressure and fluid loading during normal operation.</li> <li>(5) Thermal loads.</li> <li>(6) Wind, earthquake or other occasional loads, whichever is greater.</li> <li>(7) Loads due to wave action.</li> </ol>
Abnormal or Start up Operation plus Occasional (see note above)	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) Dead load of component plus insulation, refractory, fireproofing, installed internals, catalyst, packing, platforms and other equipment supported from the component in the installed position.</li> <li>(2) Piping loads including pressure thrust</li> <li>(3) Applicable live loads.</li> <li>(4) Pressure and fluid loading associated with the abnormal or start up conditions.</li> <li>(5) Thermal loads.</li> <li>(6) Wind loads.</li> </ol>

Tabella 4

Del resto non esiste nessuna regola europea o internazionale che guidi il progettista su quando e/o come poter ritenere trascurabili alcuni carichi rispetto ad altri (almeno che non sia evidente che alcuni di questi carichi non siano del tutto applicabili: un apparecchio fabbricato ad hoc ed installato in un capannone chiuso non sarà certamente soggetto a carichi da vento). Altresì molto spesso i Main Contractor inviano ai Fabbricanti dettagliate specifiche ove è possibile evincere in maniera univoca se alcuni carichi diversi dalla pressione siano da considerare o meno in fase di progetto: comunque appare chiaro che in tutti gli altri casi solo una attenta conoscenza del sito di installazione e quindi di tutte le condizioni al contorno (carichi del piping sui bocchelli, carichi sismici, carichi da vento, etc.) potranno far scaturire una vera analisi dei rischi che non si riduca ad una mera check list da compilare e possa veramente far comprendere quale carico sia applicabile e quale trascurabile. Si fa infine notare che nel calcolo strutturale sono spesso richieste anche le verifiche dei supporti dell'apparecchio (selle, gonne, mensole di supporto, etc.) oltre a scale passerelle, etc.

## 2. La trattazione dei codici di calcolo dei carichi diversi da pressione

Sia le Norme europee che il Codice ASME, come si è visto, obbligano a considerare i carichi da sisma e vento. Sia queste norme sia l'Eurocodice [6] EN 1990, seppure con qualche differenza, suddividono i carichi in:

- Carichi Permanenti (Dead Loads o Permanent Action) –  $G_k$ : che sono i carichi dovuti al peso della struttura, ivi compreso quello delle parti attaccate alla stessa (esternamente e/o internamente), etc.;
- Carichi variabili (Live Loads o Variable Action) -  $Q_k$ : che rappresentano i carichi variabili nel tempo come neve, vento, peso del personale manutentore munito di utensili, vibrazioni, etc.;
- Carichi eccezionali (Accidental Action o Exceptional Loads) – A: come quelli dovuti ad esplosioni, incendi, impatti, etc.;
- Sismici (Seismic Action) -  $E_E$ .

Pertanto, complessivamente, in un apparecchio a pressione possono coesistere molte azioni note a priori o prevedibili:

- pressione di progetto;
- temperatura di progetto;
- pressione esterna (vuoto);
- fatica;
- fatica termica;
- peso proprio;
- battente idrostatico;
- carico da neve;
- carico da vento;
- carico da ghiaccio;
- esplosioni;
- incendi;
- etc.

Tutti questi carichi dovranno essere determinati e quindi tra loro combinati, per trovare azioni globali. In vero, come peraltro intuibile, la maggiore difficoltà si riscontra nelle molteplici combinazioni di carico, che in un apparecchio a pressione si possono verificare e in quelle che è lecito considerare. A tal proposito, molte norme di calcolo, (ma non tutte), come a titolo di esempio, le AD Merkblätter [7] tedesche, piuttosto che le ASME VIII Div.2 , indicano come si devono combinare tra loro i carichi. Lo stesso, dicasi per il calcolo delle sollecitazioni; ossia molte norme indicano come si debbano calcolare le sollecitazioni degli apparecchi assoggettati ad uno o più combinazione di carico.

### 3. L'approccio delle Euronorm EN 13445

La ben nota norma armonizzata alla PED, EN 13445, nella parte terza, tratta i carichi diversi dalla pressione nel capitolo 16 "Additional non-pressure loads".

Le verifiche proposte in detto capitolo sono puntuali ; nel senso che per ogni tipo di carico, tenendo ovviamente anche in considerazione contestualmente l'effetto dovuto alla pressione, accertano che le sollecitazioni o l'instabilità elastica (buckling) locale e/o globale siano ammissibili.

In altre parole detto capitolo permette la verifica delle sollecitazioni locali indotte localmente da carichi (o sommatorie algebriche di carichi) dovuti alla pressione ed azioni esterne (Dead loads, Live Loads, etc.) su fondi, virole, etc. dovuti, per esempio, a:

- orecchie di sollevamento (Lifting Lug);
- selle per apparecchi orizzontali (saddles);
- anelli di supporto (Ring supports);
- supporti a mensola (Brackets);
- gambe (Legs);
- gonne (Skirts);
- etc.

Nel paragrafo 16.14 viene introdotto lo studio di una analisi globale dell'apparecchio: ossia viene mostrato come determinare lo spessore minimo delle virole soggette ad una forza (od una sommatoria algebrica di forze) ed a un momento (od una sommatoria algebrica di momenti) in sezioni lontane dal punto di applicazione dei carichi, nonché da discontinuità geometriche.

La EN 13445/3 al capitolo 16, al momento però sembra essere restrittiva nel senso che:

- la verifica delle sollecitazioni locali è possibile solo se l'apparecchio ha una geometria simile a quella ipotizzata dalla norma;
- sia per le sollecitazioni locali, che per quelle globali, non viene chiarito come si debbano combinare le azioni, dando solo qualche cenno in questo senso.

Altro approccio suggerito dalla EN 13445 è quello innovativo, proposto nell'ANNEX B "Design by Analysis – Direct Route", che mutua i concetti di Stato Limite, che sono ad oggi presenti negli Eurocodici (e quindi in molte Leggi nazionali Europee, come per esempio in Italia il D.M. 14 gennaio 2008 chiamato anche NTC 2008 [8]).

Detto Annex B, introduce il concetto di Stato Limite Ultimo e Stato Limite di Servizio, ove definisce l'uno come condizione strutturale di un componente o del vessel associabile con un fenomeno d'esplosione o con il collasso o con altre forme di rottura, che possono pregiudicare la sicurezza delle persone; l'altro come una condizione strutturale oltre la quale l'uso funzionale dell'apparecchio non è più garantito.

Esempi di Stati Limite Ultimi sono:

- rotture dovute a grandi deformazioni plastiche;
- rotture dovute a fenomeni di fatica;
- rotture dovute all'instabilità dell'apparecchio o di sue parti;
- ribaltamenti dell'apparecchio;
- perdita di fluido potenzialmente letale;
- etc.

Esempi di Stati Limite di Servizio sono:

- deformazioni di parte dell'apparecchio, che causano il suo inutilizzo funzionale;
- perdita di fluido non pericoloso per l'uomo.

Cercando di spiegare nella maniera più sintetica e semplice possibile e scusandoci per le inevitabili semplificazioni; si può affermare che la metodologia di calcolo agli stati limite sposta il ragionamento dalle sollecitazioni ai carichi. In particolare, se nel caso dello studio delle sollecitazioni, si calcolano le sollecitazioni ideali (Tresca o Von Mises) dovute ai carichi agenti sull'apparecchio e si confrontano le stesse con una tensione ammissibile; nel

caso del calcolo agli stati limite si confronta un carico massimo (o meglio un' imposta combinazione di carichi) con un carico massimo sopportabile che è funzione del materiale in uso.

In altre parole, esisteranno azioni di design  $A_d$ , che saranno date da:

$A_d = \gamma_A A$  dove  $A$  è il valore caratteristico dell'azione e  $\gamma_A$  è il *coefficiente di sicurezza parziale applicabile al carico*.

Tali azioni saranno da confrontare con  $RM_d$  che è il valore di design del materiale:

$RM_d = RM / \gamma_R$  ove  $RM$  è il valore caratteristico del materiale usato e  $\gamma_R$  è il coefficiente di sicurezza parziale sul materiale in uso. Il valore  $RM$  del materiale è scelto in funzione dei dettami della norma tra ( $R_{eH}$ ,  $R_{p0.2/T}$ ,  $R_{p1.0/T}$ ,  $R_{m/T}$ , etc.).

Il Paragrafo B.5.2.1. detta le verifiche, che sono da condurre con questa metodologia di calcolo (Tabella 5).

— Gross Plastic Deformation Design Check (GPD-DC), see B.8.2;
— Progressive Plastic Deformation Design Check (PD-DC), see B.8.3;
— Instability Design Check (I-DC), see B.8.4;
— Fatigue Design Check (F-DC), see B.8.5;
— Static Equilibrium Design Check (SE-DC), see B.8.6.

Tabella 5

Mentre al Paragrafo B.5.2.2. la norma detta la procedura da seguire per il calcoli richiesti al punto B.5.2.1 (Tabella 6).

a) At least all of the design checks listed in B.5.1 shall be considered, see NOTE in B.5.1;					
b) For each design check all relevant load cases shall be considered;					
c) For each design check / load case an appropriate application rule shall be selected, if the principle is not used directly;					
d) For each design check / load case the fulfilment of the design check's principle shall be shown, directly or by usage of the selected application rule, and by carrying out the following steps: <ol style="list-style-type: none"> <tr> <td>1) Specification of design check / load case and corresponding actions;</td> </tr> <tr> <td>2) Determination of the actions' characteristic values, or characteristic functions;</td> </tr> <tr> <td>3) Calculation of the actions' design values, or design functions;</td> </tr> <tr> <td>4) Check of the fulfilment of the principle;</td> </tr> <tr> <td>5) Statement confirming whether or not the principle for the load case is fulfilled.</td> </tr> </ol>	1) Specification of design check / load case and corresponding actions;	2) Determination of the actions' characteristic values, or characteristic functions;	3) Calculation of the actions' design values, or design functions;	4) Check of the fulfilment of the principle;	5) Statement confirming whether or not the principle for the load case is fulfilled.
1) Specification of design check / load case and corresponding actions;					
2) Determination of the actions' characteristic values, or characteristic functions;					
3) Calculation of the actions' design values, or design functions;					
4) Check of the fulfilment of the principle;					
5) Statement confirming whether or not the principle for the load case is fulfilled.					

Tabella 6

Le singole azioni, presenti in una combinazioni di carichi, possano avere effetti favorevoli o sfavorevoli (ad esempio nei vessels verticali soggetti al vento, la pressione tende a diminuire la sollecitazione assiale di compressione nelle virole sottovento e pertanto in caso di combinazione col vento ha un effetto favorevole). Ne consegue che per ogni design check (GPD, PD, etc), esistono coefficienti di sicurezza parziali diversi per le azioni favorevoli e per le azioni non favorevoli. Rimane il problema ancora non risolto, in quanto le norme non danno indicazioni precise, sul come eseguire le combinazioni dei carichi per l'analisi agli Stati limiti Ultimi e agli Stati limite di servizio. A questo proposito, possiamo per il momento ipotizzare di adoperare le combinazioni di carico imposte dagli eurocodici EN1990 (oppure le NTC 2008), stando attenti però al fatto che questi non sono nati per gli apparecchi a pressione, e quindi si dovrà sostituire e/o omettere o alcuni carichi (per esempio la precompressione del cemento armato).

Le soluzioni, che noi proponiamo, sono quindi le seguenti:

- utilizzare le combinazioni di carico degli Eurocodici, in Italia sono consigliabili le combinazioni dettate dalla NTC 2008 (vedi oltre);
- alla azione di precompressione sostituire quella della pressione;
- sostituire ai valori dei coefficienti parziali sui carichi e quindi sui materiali quelli prescritti dalla EN 13445 Parte 3 Annex B (vedi oltre);
- eseguire le analisi.

Le combinazioni inerenti gli Stati Limite Ultimi tralasciando gli stati limiti di Servizio indicati dalla EN 1990 sono:

### Combinazione Fondamentale

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

### Combinazione per carichi Accidentali

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

### Combinazione per carichi Sismici

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

dove i simboli  $\Psi_0$ ,  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  sono fattori di combinazione per carichi variabili, che rispettivamente indicano condizioni saltuarie, frequenti quasi costanti, che l'EN 1990 all'ANNEX A1 mostra secondo la seguente tabella 7:

Action	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area, vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, $30\text{kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN 1991-1-3)*			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H > 1000$ m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H \leq 1000$ m a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTE The $\psi$ values may be set by the National annex.			
* For countries not mentioned below, see relevant local conditions.			

Tabella 7

È chiaro che il considerare numerose combinazioni di carico, che ogni design check impone, presuppongono in linea di massima l'uso di software agli elementi finiti.

Inoltre poichè la stessa norma in alcuni punti indirizza sul tipo di elemento da usare nella modellazione (Shell, Beam, Brick, etc.), è sottinteso che il software dovrà essere di "stampo meccanico", e di buon livello. Inoltre bisognerà avere la cautela di fare adoperare questi complessi strumenti software solo da tecnici specializzati, poichè altrimenti l'analisi potrebbe dare dei valori veramente molto falsati. I coefficienti parziali, da adoperare sui materiali  $\gamma_R$  sono funzione di ogni tipologia di design Check. Riportiamo per semplicità solo quelli inerenti alla GPD-DC nelle Operating Loads Cases (mancano i Test Cases), tabelle 8, 9. Concludendo la parte di calcolo inerente all'Annesso B della EN 13445, si possono

proporre due soluzioni. L'una estratta dalla bozza elaborata dal SG "Non Pressure Loads del WG "Design" CEN TC54 della proposta di norma "Static of Tall Vertical Vessel on Skirt" [9], che dovrebbe diventare il capitolo 22 della EN 13445. (Tabella 10), ove D sta per Dead Load, L sta per Live Load ed F sono i carichi trasmessi dal piping. L'altra elaborata dall'Ing. F.Lidonici [12], Tabella 11, cercando di trovare una combinazione di fattori, che portassero tali verifiche anche ad essere conformi alla NTC 2008 che in Italia, si ricorda, è obbligatoria per Legge nelle costruzioni Civili.

Action	Condition	Partial safety factor
Permanent	For actions with an unfavourable effect	$\gamma_G = 1,2$
Permanent	For actions with a favourable effect	$\gamma_G = 0,8$
Variable	For unbounded variable actions	$\gamma_Q = 1,5$
Variable	For bounded variable actions and limit values	$\gamma_Q = 1,0$
Pressure	For actions without a natural limit	$\gamma_P = 1,2$
Pressure	For actions with a natural limit, e.g. vacuum	$\gamma_P = 1,0$
Temperature <sup>a</sup>		$\gamma_T = 1,0$

Tabella 8

Material	RM	$\gamma_R$
Ferritic <sup>1</sup> steel	$R_{eH}$ or $R_{p0,2T}$	1,25 for $\frac{R_{p0,2T}}{R_{m20}} \leq 0,8$ 1,5625 $\left(\frac{R_{p0,2T}}{R_{m20}}\right)$ otherwise
Austenitic steel (30% $\leq A_5 < 35\%$ )	$R_{p1,0T}$	1,25
Austenitic steel ( $A_5 \geq 35\%$ )	$R_{p1,0T}$ (see note)	1,0 for $\frac{R_{p1,0T}}{R_{mT}} \leq 0,4$ $\frac{2,5R_{p1,0T}}{R_{mT}}$ for $0,4 < \frac{R_{p1,0T}}{R_{mT}} \leq 0,5$ 1,25 for $\frac{R_{p1,0T}}{R_{mT}} > 0,5$
Steel castings	$R_{p0,2T}$	19/12 for $\frac{R_{p0,2T}}{R_{m20}} \leq 19/24$ $\frac{2R_{p0,2T}}{R_{m20}}$ otherwise

Tabella 9

Load Case	included Types of Loads	Load combination including weighting factors	Allowable tensile stress for shells	Allowable compressive stress for shells	Allowable tensile stress for anchor bolts	Explanations
LC1	Pi, Dmax, L, F, W	0,9Pi & Dmax & L & F & 1,1W	fd	$\sigma_{c,all}$	fd,anchor	Operation with internal pressure and wind
LC2	Pe, Dmax, L, F, W	Pe & Dmax & L & F & 1,1W	fd	$\sigma_{c,all}$	fd,anchor	Operation with external pressure and wind
LC3	Dmax, L, W, F	Dmax & L & F & 1,1W	fd	$\sigma_{c,all}$	fd,anchor	Operation without pressure but with wind
LC4	Dmax, W	Dmax & 1,1W	fd	$\sigma_{c,all}$	fd,anchor	Shut down (no pressure, contents and thermal reaction)
LC5	Dmin, W	Dmin & 0,7W	fd	$\sigma_{c,all}$	fd,anchor	Installation
LC6	Pi, Dmax, L, E	0,9Pi & Dmax & L & E	f <sub>test</sub>	$\sigma_{c,all, test}$	1,2 fd,anchor	Operation with internal pressure and earthquake
LC7	Pe, Dmax, L, E	Pe & Dmax & L & E	f <sub>test</sub>	$\sigma_{c,all, test}$	1,2 fd,anchor	Operation with external pressure and earthquake
LC8	Dmax, L, E	Dmax & L & E	f <sub>test</sub>	$\sigma_{c,all, test}$	1,2 fd,anchor	Operation without pressure but with earthquake
LC9	P <sub>test</sub> , Dmax, L <sub>test</sub> , W	P <sub>test</sub> & Dmax & L <sub>test</sub> & 0,6W	f <sub>test</sub>	$\sigma_{c,all, test}$	fd,anchor	Test with test pressure, test filling and wind

Tabella 10



Condizione	Combinaz. dei carichi	$\sigma_{amm}$	$\sigma_{c,amm}$	$\sigma_{amm}$ bulloni	Osservazioni
1	$1,2P+1,2G+1,2H$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Press.interna, battente idr.
2	$1,2P+1,2G+1,2H+1,5W$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Press.interna, battente idr. e vento max.
2A	$1,2G+1,2H+1,5W$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Battente idr. e vento max
3	$P+G+H+E$	$f_{test}$	$f_{c, test}$	$0,84 f_{test, b}$	Press.interna, battente idr. e sisma
3A	$G+H+E$	$f_{test}$	$f_{c, test}$	$0,84 f_{test, b}$	Battente idr. e sisma
4	$P+1,2G+1,2H$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Press.esterna, battente idr.
5	$P+1,2G+1,2H+1,5W$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Press.esterna, battente idr. e vento max
6	$P+G+H+E$	$f_{test}$	$f_{c, test}$	$0,84 f_{test, b}$	Press.esterna, battente idr. e sisma
7	$P_{test}+G+H_{test}+1,5W_{test}$	$f_{test}$	$f_{c, test}$	$0,84 f_{test, b}$	Press.di prova, battente idr. e vento prova
8	$P_{test}+G+H_{test}+E_{test}$	$f_{test}$	$f_{c, test}$	$0,84 f_{test, b}$	Press.di prova, battente idr. e sisma prova
9	$G_{min}+1,5W$	$1,2 f$	$1,2 f_c$	$1,2 f_b$	Montaggio e vento massimo

( $f_{test}$  = soll.ammissibile in condizioni eccezionali e di prova –  $f_c$  = a compressione.  $f_{...}$  = per bulloneria)

Tabella 11

Altra maniera di studiare in maniera più classica, ma comunque sempre molto impegnativa tecnicamente un apparecchio a pressione con combinazioni di carico con carichi da vento e sisma, deriva dall'Annex C della EN 13445 Parte 3 "Design By Analysis – Method Base on Stress categories". Tale metodo, usato anche da altre norme (esempio ASME VIII Div.2, AD Merkblätter, etc.), con a volte peculiari differenze, può essere usato in alternativa all' Annex B. Anche questa procedura dovrà essere eseguita con calcoli agli elementi finiti di tipo meccanico, con l'ausilio di software di buon livello e personale tecnico specializzato nell'uso. L'Annex C non dà informazioni nè sui carichi da usare (in caso di sisma e vento), nè tantomeno sulla loro combinazione e si basa sulla categorizzazione delle sollecitazioni [13],:

- Primary stress
- Secondary Stress
- Peak Stress

Trovate quindi le sollecitazioni, che interessano al progettista, suddivise come sopra riportato, attraverso linearizzazioni degli stress o altri accorgimenti; le stesse dovranno essere confrontate secondo la seguente tabella 12.

#### 4. Cenni all'approccio delle norme americane ASME VIII Division 1 e Division 2

L'ASME VIII Div.1 sostanzialmente rimanda, senza citarli esplicitamente, a metodi ingegneristici consolidati (WRC 107/297 Bulletin, WRC 537 bulletin, Metodo Zick, Metodo Brownell & Young, etc.) in grado di calcolare le sollecitazioni dovute ai carichi non da pressione, ma con la clausola che, secondo quanto riportato alla U-2 (G) siano "as safe as", ossia che garantiscano lo stesso livello di sicurezza, il che viene normalmente interpretato dagli Authorized Inspector ASME nel senso che ogni sollecitazione valutata in ogni parte dell'apparecchio debba essere inferiore alla relativa sollecitazione ammissibile di confronto dell'ASME VIII Div.1. L'ASME VIII Div.2, come sopra riportato, norma molto più marcata da un punto di vista ingegneristico, consente due tipologie di analisi:

- Design by Formule (Parte 4)
- Design By Analysis (Parte 5)

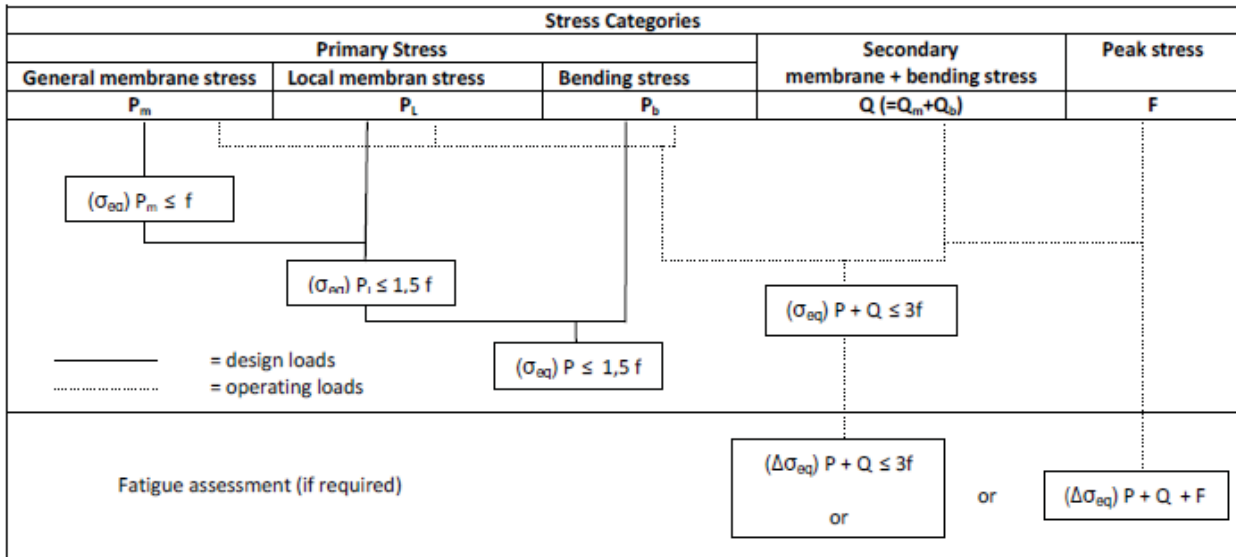


Tabella 12

Tralasciando la parte 4, la parte 5 è indirizzata ad un calcolo, che provvede ad analizzare le seguenti situazioni:

- Protection against Plastic Collapse
- Protection against local failure
- Protection against Collapse from Buckling
- Protection against failure from cyclic loading

Anche l'ASME VIII Div. 2 specifica tutti i carichi applicabili, che devono essere considerati (vedi tabelle 3 e 4) e come devono essere combinati se viene eseguita una analisi elastica, o se viene eseguita una Analisi Limite. Anche nell'uso della parte 5 della norma ASME VIII Div.2 è assolutamente necessario avere un buon strumento di calcolo agli elementi finiti e altresì personale tecnico analista esperto del settore e della metodologia.

## 5. Cenno alla Norma AD 2000 e ad altre norme internazionali

Come accennato, nell'ambito europeo, anche altri codici facenti parti della UE hanno revisionato le loro norme nazionali, per renderle coerenti ai dettami dei Requisiti Essenziali di Sicurezza richiesti dalla Direttiva PED. Entrando nel merito, quindi sia la AD Merkblatter tedesca che la norma inglese PD 5500 o la Francese CODAP, etc., sono state revisionate secondo quanto testè riportato. I carichi diversi della pressione nella norma AD Merkblatter tedesca, codice di calcolo abbastanza completo, sono contemplati e gestiti ai capitoli:

- S3/0 – General Verification of Stability of pressure vessel
- S3/1 – Vessel on Skirt Supports
- S3/2 - Verification of load-carrying capacity for horizontal vessel on saddles supports
- S3/3 - Vessel with domed ends on feet
- S3/4 - Vessel with support brackets
- S3/5 - Vessel with ring support

Tali capitoli riportano metodologie di calcolo atte al design sia degli apparecchi (sforzi agenti su virole, fondi, etc., dai supporti) sia dei supporti stessi in tutte le loro parti: gambe, selle, gonne, etc. I carichi, da tenere in considerazione nonché la loro combinazione, sono riportati nella S3/0, ove viene anche riportata una tavola esplicativa riassuntiva (vedi Tabella13), ove i simboli riportati hanno il seguente significato:

- OC (Operating Case)
- TC (Test Case)
- IC (Installation Case)

➤ SC (Special Case)

Dalla tabella di cui sopra si vedono quali sono i carichi da considerare e le relative combinazioni nel caso del design operativo: peso dell'apparecchio e degli internals, pressione interna ed esterna, temperatura di design, carichi esterni (esempio: forze o momenti trasmessi dai bocchelli alla struttura, etc.), Live Loads (carichi su piattaforme, etc.), carico del vento e della neve. Nei carichi di test sono considerati il peso dell'apparecchio e degli internals, pressione interna o esterna di prova, il vento. Omettendo gli installation case, si nota che negli Special Case (segnatamente nel caso di carico sismico), saranno da considerare il peso proprio, la pressione interna o esterna, e quelli sismici. Altresì è importante evidenziare come negli Special Cases, l'ammissibile di riferimento sia maggiorato di una volta e mezza. Si nota che vento e terremoto non vengono mai combinati (e questo in genere avviene sempre a prescindere dalla norma). Al momento la AD Merkblatter indica che, le norme dalle quali evincere i carichi da vento sono le DIN (in futuro probabilmente gli Eurocodici). Speciali precauzioni sono richieste nella verifica della stabilità alla compressione (buckling), ove si rimanda alle DIN 18800 [14], (in futuro probabilmente agli Eurocodici). Altro modo per verificare gli apparecchi, anche da un punto di vista statico, è quello basato su analisi DBA, ove la AD Merkblatter al Capitolo S4 indirizza ad una analisi lineare elastica con classificazione delle sollecitazioni. Infine si sottolinea, come già accennato prima, che anche altre norme come la PD 5500[15], la CODAP[16], etc., riportano metodologie per poter tener conto in maniera integrata dei carichi diversi dalla pressione come il sisma ed il vento.

Load case <sup>1)</sup> in accordance with 4.2	Load in accordance with									Permissible design stress in accordance		
	4.1.4.1	4.1.4.2			4.1.4.3	4.1.4.4	4.1.4.5	4.1.4.6	4.1.4.8	4.1.4.9	Pressure vessel	Supporting elements
	Inherent load	Internal pressure	Vacuum or external pressure	Local pressure build-up	Temperature <sup>2)</sup>	External loads and load moments (static, dynamic)	Live loads	Wind loads <sup>3)</sup>	Snow loads <sup>3)</sup>	Dynamic loads <sup>3)</sup> , earthquakes		
OC 1	x	x			x	x	x	x	x		f	f
OC 2	x		x	x	x	x	x	x				
...												
TC 1	x	x						x			f <sub>p</sub>	1,1 · f
TC 2	x		x					x				
...												
IC 1	x					x		x			f <sub>M</sub>	1,1 · f
IC 2	x					x		x				
...												
SC 1	x	x				x				x	f <sub>S</sub>	1,5 · f
SC 2	x		x			x				x		
...												

<sup>1)</sup> The load cases given here are examples of allocations and are to be accordingly given for the particular application case.  
<sup>2)</sup> The associated temperature is generally decisive for determining the permissible stresses. Additional thermal stresses shall be allowed for the load cases shown with a cross in this column.  
<sup>3)</sup> The details for load superposition contained in the relevant DIN standards can be taken into account.

Tabella 13

## 6. Bibliografia

- [1] Process Equipment Design, "Brownell & Young", Jhon Willey & Sons, 1959
- [2] Boiler and Pressure Vessel Code, The American Society of Mechanical Engineers, New York, U.S.A., 2013
- [3] Pressure Vessel, AS1210, Standards Australia International LTd, Sidney, Australia, 2010
- [4] Chemical Engineering Design Vol. 6, R.K. Sinnott, Elsevier, 2005
- [5] EN 13445 Parte 3, Recipienti a pressione non esposti a fiamma, CEN, Bruxelles, 2012
- [6] Antonio Cirillo Il Manuale dell'Ingegnere per il Calcolo Strutturale Tomo 1 e Tomo 2, *Sistemi Editoriali Se, Napoli, 2012*
- [7] AD 2000 Code, Technical Rules for Pressure Vessels, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany, 2014
- [8] Il Manuale dell'Ingegnere per il Calcolo Strutturale Tomo 1 e Tomo 2, Antonio Cirillo, *Sistemi Editoriali Se, Napoli, 2012*
- [9] Static of Tall vertical Vessels on Skirt , CEN, Lyon, 2012
- [10] Progettazione apparecchi a pressione e scambiatori di calore, Ing. Fernando Lidonnici, Sant'Ambrogio Servizi Industriali S.r.l., Milano 2012
- [11] Pressure Vessel Design, Springers, Donatello Annaratone, Berlino, 2007
- [12] DIN 18800 Stahlbauten, Stabilitätsfalle, Schalenbeulen, DIN Deutsches Institut für Normung, Germany, 2010
- [13] PD 5500 "Specification for Unfired, fusion welded pressure vessel", BSI Group, England, 2012
- [14] Codap Division 1 e Division 2, "Code de Construction des Appareils a Pression non Soumis a l'action de la flamme", SNCT Publications, Parigi, Francia, 2010