

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare



*ANALISI COMPARATIVA TRA I CODICI ASME SECTION VIII ED  
EN-13445 PER LA PROGETTAZIONE DI RECIPIENTI A PRESSIONE*

Relatore

Prof. Andrea Mura

Candidato

Riccardo Ferrara

Anno Accademico 2020/2021



A Maria Carmen, la metà migliore di me.

## **ABSTRACT**

Questo elaborato di tesi nasce durante il periodo di tirocinio curriculare presso uno studio ingegneristico di Torino. Il lavoro svolto verteva sulle verifiche di conformità ed integrità delle apparecchiature industriali, in particolar modo quelle che elaborano fluidi a pressione diversa da quella atmosferica. Una delle commissioni seguite mi ha permesso di conoscere da vicino una realtà industriale, nell'ambito automotive, di studiarne i processi produttivi e le condizioni di lavoro degli impianti a pressione.

Si è presentata la necessità di approfondire la conoscenza del complesso campo delle normative che disciplinano la progettazione, la messa in opera e la verifica di funzionamento dei recipienti e delle tubature in pressione. A livello della Comunità Europea è in vigore la PED (Pressure European Directive) che è una direttiva che stabilisce dei requisiti essenziali, mentre le normative armonizzate che indicano le regole che sovrintendono alla realizzazione delle parti in pressione sono le EN 13445. Tuttavia, in campo internazionale la normativa più utilizzata è la ASME di derivazione USA. Nei capitoli che seguiranno saranno analizzate le principali differenze tecniche, commerciali e di utilizzo tra ASME Sezione VIII ed EN 13445, con approfondimenti sullo stato tensionale di un componente a pressione e gli effetti che contribuiscono sul costo complessivo di realizzazione.

Vedremo l'esistenza di diversi approcci al problema per il progettista, che spesso sceglie in base alla propria esperienza o familiarità con la norma, più che per reali vantaggi costruttivi.

## INDICE

ABSTRACT .....	IV
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1. PARAMETRI COSTRUTTIVI.....	3
1.2. PRIMI PASSI NORMATIVI.....	6
1.3. PRINCIPALI CODICI.....	7
1.4. PRESSURE EUROPEAN DIRECTIVE (PED) .....	9
1.2.1 Generalità .....	9
1.2.2 Campo di applicazione.....	10
1.2.3 Classificazione e categorie .....	10
1.2.4 Procedure per la valutazione di conformità – Soggetti preposti .....	12
1.2.5 I requisiti essenziali di sicurezza – Analisi dei rischi .....	16
1.2.6 Fascicolo tecnico .....	17
1.5. PRINCIPALI APPROCCI AL PROGETTO .....	18
1.6. CALCOLI A CODICE ( <i>Design by formula</i> ) .....	19
1.7. METODI NUMERICI ( <i>Design by analysis</i> ) .....	26
2. NORMATIVA ASME.....	30
2.1. GENERALITA' .....	30
2.2. SCHEMI PRINCIPALI PER LE REGOLE DI PROGETTAZIONE .....	31
2.1.1 La divisione 1 .....	31
2.1.2 La divisione 2 .....	32

2.1.3	La divisione 3 .....	33
2.3.	METODO DEGLI ELEMENTI FINITI (DBA) .....	34
2.3.1	Classificazione delle tensioni .....	35
2.3.2	Analisi a fatica .....	40
2.3.3	Limiti delle tensioni .....	41
2.4.	CALCOLI A CODICE (DBF) .....	47
3.	COMPARAZIONE TRA IL CODICE ASME SEZIONE VIII E LA NORMA EN 13445 .....	49
3.1.	INTRODUZIONE .....	49
3.2.	PROPRIETA' DEL MATERIALE .....	50
3.2.1	Acciai ferritici bassolegati al carbonio .....	51
3.2.2	Acciai inossidabili austenitici .....	52
3.3.	REGOLE DI PROGETTAZIONE .....	54
3.4.	STRUTTURA FUNZIONALE DEI COSTI .....	56
3.5.	INDAGINE DI MERCATO .....	61
4.	ESEMPI DI CALCOLI A CODICE E CONFRONTO TRA LE NORMATIVE .....	64
4.1.	NOMENCLATURA .....	65
4.2.	CODICI DI CALCOLO .....	67
4.2.1	Corpi cilindrici soggetti a pressione interna .....	67
4.2.2	Fondi curvi .....	68
4.2.3	Fogli di calcolo .....	70
5.	CONCLUSIONI .....	73

INDICE DELLE FIGURE .....	79
INDICE DELLE TABELLE .....	81
BIBLIOGRAFIA .....	82

# 1. INTRODUZIONE

Un recipiente in pressione è un recipiente progettato per contenere gas o liquidi ad una pressione solitamente maggiore rispetto a quella esterna. Tubazioni, recipienti e apparecchiature di questo tipo trovano larga applicazione nel settore industriale ed energetico. Alcuni esempi di recipienti in pressione sono: polmoni smorzatori per compressori alternativi, colonne di distillazione in raffinerie e impianti petrolchimici, recipienti di reattori nucleari, serbatoi di gas e di liquidi etc.<sup>1</sup>

Com'è facile intuire i recipienti in pressione devono essere progettati in modo da essere eserciti in sicurezza ad una determinata pressione. La differenza di pressione tra interno ed esterno, infatti, crea uno stato di tensione nel materiale con cui il recipiente è costruito. Il progettista deve realizzare un recipiente che resista a questo stato di tensione senza sollecitazioni che possano causare perdite, rotture o situazioni di pericolo per persone e cose. La pressione è il parametro operativo più importante, ma ve ne sono altri che non possono essere trascurati. La temperatura di esercizio, ad esempio, influenza le proprietà meccaniche del materiale e può provocare deformazioni permanenti, come i fenomeni di scorrimento a caldo.

---

<sup>1</sup> Nella figura 1 è schematizzato in modo semplificato il funzionamento di un reattore per centrale nucleare di tipo BWR. Una centrale di questo tipo è caratterizzata dal fatto che la produzione del vapore avviene direttamente nel recipiente di acqua bollente in pressione.

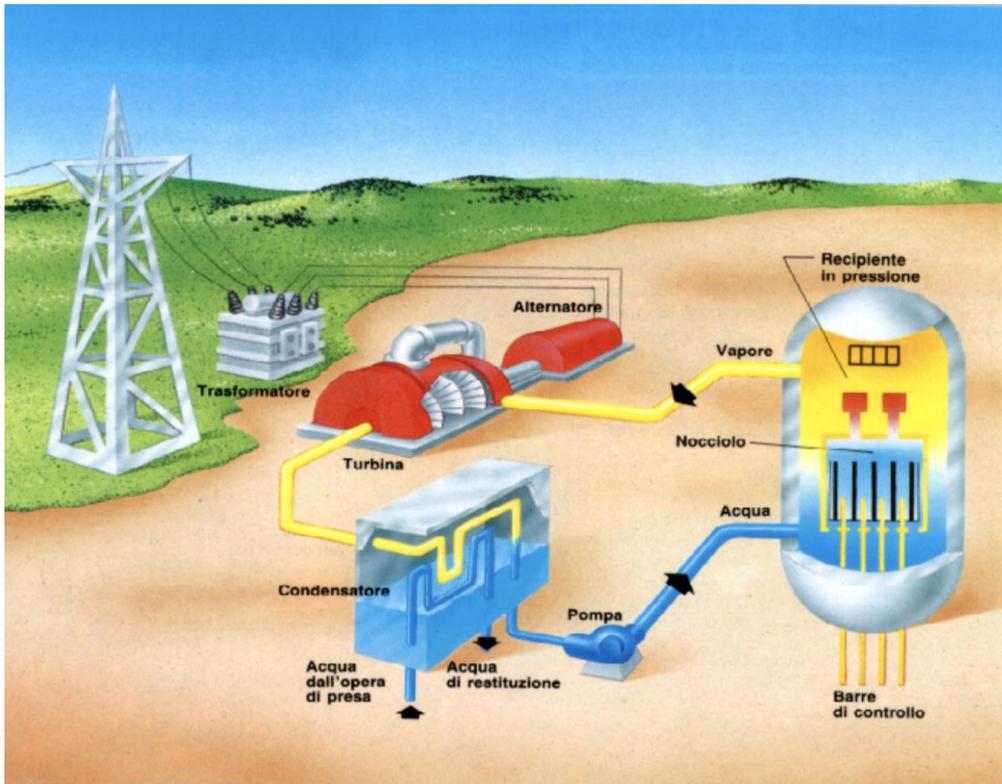


Figura 1 - Schema semplificato del funzionamento di un reattore per centrale nucleare di tipo BWR

I fluidi a contatto con il recipiente sono un altro parametro dimensionante, in quanto possono determinare attacchi chimici ai materiali, tali da causare fenomeni di corrosione o di fragilizzazione. Infine, è importante valutare le condizioni di esercizio del recipiente, in quanto variazioni cicliche della pressione e della temperatura (sollecitazioni a fatica) tendono a ridurne la vita residua. Nel paragrafo successivo verranno brevemente analizzati quei parametri costruttivi dei quali è fondamentale tener conto in sede di progetto, prima di passare alle regole di progettazione proposte dai vari codici vigenti in materia di apparecchiature a pressione.

## 1.1. PARAMETRI COSTRUTTIVI

I parametri su cui il progettista può agire, compatibilmente con i vincoli di costo e di progetto (ingombri massimi, necessità di bocchelli, etc.), sono:

- Forma del recipiente
- Spessore delle pareti
- Selezione del materiale
- Controlli non distruttivi in sede di costruzione
- Verifiche in esercizio

La forma più conveniente per minimizzare la tensione nel recipiente è quella sferica. In tal caso la tensione vale:

$$\sigma = \frac{pr}{2s}$$

Nella formula  $\sigma$  è la tensione,  $p$  la pressione,  $r$  il raggio e  $s$  lo spessore del recipiente. Tuttavia, viste le difficoltà pratiche che si incontrano nel costruire un recipiente di forma sferica, la forma più comunemente adottata è quella cilindrica.

In tal caso, si avrà anche la tensione circonferenziale nel tratto lineare:

$$\sigma_c = \frac{pr}{s}$$

Ulteriore accorgimento relativamente alla forma è la necessità di ridurre le discontinuità geometriche, come spigoli, brusche variazioni di spessore, intagli, etc. Le formule sopra menzionate derivano da una teoria semplificata, denominata *teoria della membrana*, e valgono nel caso che lo spessore sia trascurabile rispetto

al raggio. Si considerano applicabili se lo spessore è inferiore a circa 7-10% del raggio.

Una volta scelto il materiale di costruzione, la tensione ammissibile sarà fissata automaticamente dato che è strettamente correlata alle caratteristiche meccaniche del materiale. Il parametro che può essere modificato è lo spessore che occorre aumentare quando, come si può vedere dalle formule precedenti, crescono la pressione di funzionamento e il raggio del recipiente. A questo punto, se lo spessore non è più trascurabile rispetto al raggio, le formule sopra menzionate non sono più abbastanza precise, quindi è necessario valutare lo stato di tensione in ogni punto del recipiente. Tuttavia, fissato il raggio interno del recipiente, non è più conveniente dal punto di vista economico, aumentare lo spessore oltre un certo limite, per le difficoltà ed i costi che si presentano nella costruzione di recipienti di forte spessore.

Per la costruzione di recipienti che resistono a pressioni molto alte, dunque, vengono adottate soluzioni costruttive particolari come i recipienti multistrato o i recipienti fasciati. Per la prima tipologia anziché realizzare un recipiente con un'unica parete destinata a resistere ad elevate pressioni, si utilizzano uno o più recipienti concentrici. Per garantire uno stato di tensione adeguato i cilindri devono essere montati con interferenza, ovvero il cilindro interno deve essere più grande della cavità del cilindro esterno. Ovviamente sarebbe impossibile accoppiare i due cilindri a temperatura ambiente, ma occorre scaldare il cilindro esterno fino a quando si dilata e permette l'inserimento del cilindro interno.

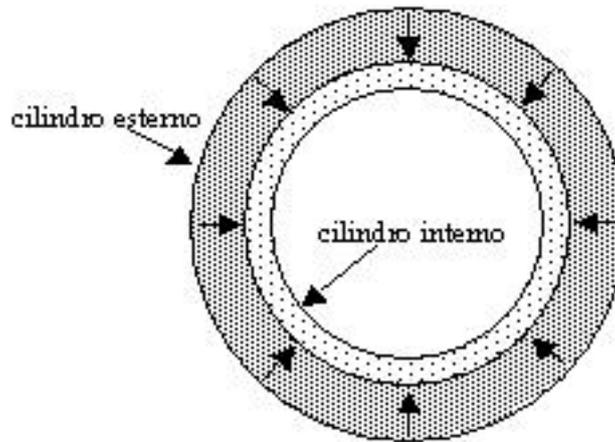


Figura 2 - Schematizzazione delle tensioni che agiscono su un recipiente multistrato

Dopo l'accoppiamento, il cilindro esterno raffreddandosi torna alle dimensioni originarie e quindi comprime il cilindro interno. Lo stato di tensione dovuto alla compressione è opposto a quello indotto dal fluido in pressione durante l'esercizio e quindi migliora la resistenza del recipiente. I recipienti fasciati invece, sfruttano lo stesso principio di quelli multistrato, ma sono più semplici perché costituiti da un unico cilindro, sulla cui parete esterna sono avvolti alcuni nastri che comprimono il cilindro. Anche in questo caso i nastri sono avvolti e fissati a caldo.

Tra i parametri costruttivi abbiamo anche i controlli non distruttivi. Dato che i recipienti a pressione sono costruiti per saldatura di lamiere, è necessario certificare che la presenza di giunti saldati non deprima le caratteristiche meccaniche del materiale di base. Le verifiche e i controlli sono dunque necessarie per garantire che la qualità del recipiente sia quella richiesta dalle normative.

## 1.2. PRIMI PASSI NORMATIVI

Il lavoro dei tecnici che si occupano della progettazione e della costruzione dei componenti in pressione è sempre stato guidato da una serie di prescrizioni volte a renderne più sicuro il funzionamento. In seguito a rotture ed esplosioni nei primi apparecchi a vapore agli inizi del 1800, nacquero le prime rudimentali regole costruttive.

Da allora le regolamentazioni si sono sviluppate ed estese a tal punto da coprire ogni campo costruttivo dell'industria meccanica attuale. La costruzione degli apparecchi in pressione deve avvenire rispettando una sequenza di prescrizioni e di regole, che definiscono in modo univoco le diverse fasi della progettazione e della fabbricazione.

Questo insieme di indicazioni costituisce il corpo della Normativa che stabilisce quindi i metodi per garantire una costruzione sicura ed affidabile nel tempo. Lo stato giuridico di una Normativa varia da nazione a nazione, dove in alcune sono Leggi dello stato come per esempio l'Italia, in altre sono Regole di Delega che devono essere rispettate per installare sul territorio nazionale degli apparecchi così costruiti.

Esistono infine nazioni che accettano l'utilizzo di più normative e sono in genere i paesi in via di sviluppo che non hanno ancora predisposto una propria regolamentazione. In questo caso la scelta viene effettuata sulla base di criteri di tipo economico e di sicurezza del componente da costruire.

### 1.3. PRINCIPALI CODICI

Il progetto, la costruzione, le prove e gli esami in sede di fabbricazione, la messa in servizio e le ispezioni periodiche delle attrezzature a pressione sono, nei vari paesi, regolamentati a termini di legge.

A livello della Comunità Europea è in vigore la PED (Pressure European Directive) che è una direttiva che stabilisce dei requisiti essenziali, mentre le normative armonizzate che indicano le regole che sovrintendono alla realizzazione delle parti in pressione sono le EN 13445 per i recipienti a pressione generale, esclusi i piccoli recipienti, le EN 12952 per i generatori di vapore a tubi d'acqua e le EN 12953 per i generatori di vapore a tubi di fumo.

In ogni caso ciascuno dei paesi della Comunità Europea ha tuttora norme proprie, le principali sono la AD Merkblätter per la Germania, le PD 5500 per la Gran Bretagna, CODAP per la Francia, Stoomwesen per l'Olanda etc.

In Italia esistono: la raccolta VSR (per le verifiche strutturali dei recipienti in generale), la Raccolta VSG (per le verifiche strutturali dei generatori di vapore), la Raccolta S (relativa alle saldature), la Raccolta M (relativa ai materiali). Tutte queste raccolte vanno applicate integrandole con le indicazioni del documento "Raccomandazione del Comitato Termotecnico Italiano per l'uso delle Raccolte ISPEL Revisione 1995 nell'ambito della direttiva CE 97/23"

A livello internazionale le norme di gran lunga più importanti sono le ASME, di derivazione USA, universalmente applicate con le varie sezioni, in particolare per i

generatori di vapore la Sezione I e, per i recipienti in generale, la sezione VIII, questa è suddivisa nelle Divisioni 1 e 2.

In generale ogni Normativa si compone di sezioni ben definite, che trattano argomenti specifici quali regole di progettazione, di fabbricazione, di ispezione e controllo, la scelta dei materiali, i procedimenti di saldatura ed altro ancora. Queste parti sono intimamente connesse in quanto le formule ed i procedimenti proposti sono validi, a patto di utilizzare i materiali indicati dalla stessa Normativa e di effettuare tutti i controlli previsti durante la sequenza costruttiva.

## **1.4. PRESSURE EUROPEAN DIRECTIVE (PED)**

### **1.2.1 Generalità**

Tutte le attrezzature a pressione che vengono installate nei paesi della comunità Europea (UE) devono rispettare i requisiti stabiliti nella PED, che è la direttiva del Parlamento Europeo n.97/23/CE del 29 maggio 1997.

La PED è stata recepita in Italia con il Decreto Legislativo numero 93 del 25 febbraio 2000 e la sua applicazione è divenuta obbligatoria dal 29 maggio 2002.

Scopo della PED è quello del riavvicinamento delle legislazioni degli stati membri e della rimozione degli ostacoli alla libera commercializzazione, nell'ambito UE, delle attrezzature a pressione, ostacoli conseguenti ai vincoli imposti dalle particolari legislazioni che vigevano nei vari paesi.

In accordo con la PED tutte le attrezzature a pressione installate in un paese UE devono essere marcate CE, a meno che non sussistano le condizioni, cui si farà cenno nel seguito, che lo esonerano da tale obbligo.

La marcatura è condizionata al fatto che la particolare attrezzatura a pressione sia stata assoggettata ad una valutazione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza stabiliti nella PED, relativamente a progettazione, materiali, costruzione, prove e collaudi; è da rimarcare che la PED non impone l'applicazione di una normativa particolare, l'unico obbligo è, appunto, il rispetto dei suddetti requisiti essenziali di sicurezza.

## **1.2.2 Campo di applicazione**

Come regola generale la PED si applica a tutte le attrezzature a pressione ed a tutti gli insiemi la cui pressione massima ammissibile (pressione massima per la quale l'attrezzatura o insieme è progettato) è superiore a 0.5 bar relativi.

Sono escluse dall'applicazione delle PED parti che presentano caratteristiche diverse sotto il profilo della sicurezza (es. condotte idriche) o sono incluse nel campo di applicazione di altre direttive europee. Per una lista completa delle esclusioni si rimanda all'Articolo 1 punto 3 della PED.

## **1.2.3 Classificazione e categorie**

La PED attribuisce ad ogni attrezzatura a pressione una categoria, che è correlata al suo grado di pericolosità e la valutazione di conformità viene eseguita secondo una procedura più o meno severa a seconda della categoria in cui rientra l'attrezzatura.

Le categorie sono la I, II, III e IV elencate in senso crescente del grado di pericolosità. I limiti di ciascuna categoria sono definiti nell'Articolo 3 e nell'Allegato II della PED. Le attrezzature che hanno caratteristiche non superiori al meno severo di tali limiti sono esonerate dalla marcatura CE e rientrano nei casi previsti dal punto 3 del suddetto Articolo 3.

Nelle tabelle seguente vengono indicati, in forma riassuntiva, i limiti per l'appartenenza alle varie categorie, limitatamente ai recipienti, generatori di vapore e tubazioni, mentre, per un quadro più esauriente si rimanda al testo della PED.

**Tabella 1 - Classificazione in categorie dei recipienti a pressione**

Contenuto	Gruppo del fluido (nota 2)	Categoria (nota 1)				
		Punto 3	I	II	III	IV
gas, gas liquefatti, gas dissolti sotto pressione, vapori e liquidi con tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile sopra 0.5 bar relativi	1 (nota 3)	$V \leq 1 + PS \leq 200$ o $V > 1 + PS \cdot V \leq 25$	$V > 1 + 25 < PS \cdot V \leq 50$	$V > 1 + 50 < PS \cdot V \leq 200$	$V > 1 + 200 < PS \cdot V \leq 1000$ o $V \leq 1 + 200 < PS \leq 1000$	$V > 1 + 1000 < PS \cdot V$ o $1000 < PS$
	2	$V \leq 1 + PS \leq 1000$ o $V > 1 + PS \cdot V \leq 50$	$V > 1 + 50 < PS \cdot V \leq 200$	$V > 1 + 200 < PS \cdot V \leq 1000$	$V > 1 + 1000 < PS \cdot V \leq 3000$ o $V \leq 1 + 1000 < PS \leq 3000$ o $V > 750 + PS \leq 4$	$V > 1 + 3000 < PS \cdot V$ o $3000 < PS$ o $V > 750 + PS > 4$
liquidi con tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile $\leq 0.5$ bar relativi	1	$V \leq 1 + PS \leq 500$ o $V > 1 + PS \cdot V \leq 200$	$V > 1 + 200 < PS \cdot V$ + $0.5 < PS \leq 10$	$V > 1 + 200 < PS \cdot V + 10 < PS \leq 500$ o $V \leq 1 + 500 < PS$	$V > 1 + 500 < PS$	Non applicabile
	2	$V \leq 10 + PS \leq 1000$ o $V > 10 + PS \cdot V \leq 10000$ o $V > 1000 + 0,5 < PS \leq 10$	$V > 10 + PS \cdot V > 10000$ + $10 < PS \leq 500$ o $V \leq 10$ + $1000 < PS$	$V > 10 + 10000 < PS \cdot V$ + $500 < PS$	Non applicabile	Non applicabile
Attrezzature a pressione a focolare od altro tipo di riscaldamento, con rischio di surriscaldamento, per la produzione di vapore od acqua surriscaldata con temperature superiori a 110 °C		$V \leq 2$	$V > 2 + PS \cdot V \leq 50$	$V > 2 + 50 < PS \cdot V \leq 200$ + $PS \leq 32$	$V > 2 + 200 < PS \cdot V \leq 3000$ + $PS \leq 32$	$V > 2 + PS > 32$ o $V \geq 2 + 3000 < PS \cdot V$ o $V > 1000$

**Tabella 2 - Classificazione in categorie delle tubazioni a pressione**

Contenuto	Gruppo del fluido (nota 2)	Categoria (nota 1)				
		Punto 3	I	II	III	IV
gas, gas liquefatti, gas dissolti sotto pressione, vapori e liquidi con tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile sopra 0.5 bar relativi	1 (nota 3)	$DN \leq 25$	$25 < DN < 100 + PS \cdot DN \leq 1000$	$PS \leq 10 + 100 < DN \leq 350$ o $10 < PS \leq 35 + 1000 < PS \cdot DN \leq 3500$ o $35 < PS + 1000 < PS \cdot DN + 25 < DN \leq 100$	$PS \leq 10 + 350 < DN$ o $10 < PS \leq 35 + 3500 < PS \cdot DN$ o $35 < PS + 100 < DN$	Non applicabile
	2 (nota 4)	$DN \leq 32$ o $32 < DN + PS \cdot DN \leq 1000$	$PS \leq 31,25 + 1000 < PS \cdot DN \leq 3500$ o $31,25 < PS \leq 35 + 32 < DN + PS \cdot DN \leq 3500$ o $35 < PS + 32 < DN \leq 100$	$PS \leq 20 + 3500 < PS \cdot DN \leq 5000$ o $20 < PS \leq 35 + 3500 < PS \cdot DN + DN \leq 250$ o $35 < PS + 100 < DN \leq 250$	$PS \leq 20 + 5000 < PS \cdot DN$ o $20 < PS + 250 < DN$	Non applicabile
liquidi con tensione di vapore alla temperatura massima ammissibile $\leq 0.5$ bar relativi	1	$DN \leq 25$ o $25 < DN + PS \cdot DN \leq 2000$	$25 < DN + 0,5 < PS \leq 10 + 2000 < PS \cdot DN$	$10 < PS \leq 80 + 2000 < PS \cdot DN$ o $80 < PS \leq 500 + 25 < DN$	$500 < PS + 25 < DN$	Non applicabile
	2	$PS \leq 10$ o $DN \leq 200$ o $10 < PS \leq 25 + PS \cdot DN \leq 5000$	$10 < PS \leq 25 + 5000 < PS \cdot DN$ o $25 < PS \leq 500 + 200 < DN$	$500 < PS + 200 < DN$	Non applicabile	Non applicabile

Nota 1 – Nella tabella, V è il volume espresso in litri, PS è la pressione massima ammissibile espressa in bar, DN è il diametro nominale espresso in mm; il simbolo "+" viene usato per indicare condizioni che devono essere tutte verificate, la lettera "o" le condizioni alternative che determinano l'appartenenza ad una determinata categoria.

Nota 2 – Il gruppo 1 comprende i fluidi pericolosi (esplosivi, infiammabili, tossici, comburenti), il gruppo 2 tutti gli altri fluidi

Nota 3 – I recipienti e le tubazioni appartenenti alle categorie I e II devono essere classificati nella categoria III se contengono un gas instabile

Nota 4 – Le tubazioni appartenenti alla categoria II devono essere classificate nella categoria III se contengono un fluido a temperatura superiore a 350 °C

## 1.2.4 Procedure per la valutazione di conformità – Soggetti preposti

A seconda della categoria in cui rientra la particolare attrezzatura a pressione sono possibili una o più procedure, definite Moduli, per la valutazione di conformità. Tali moduli sono descritti nelle tabelle 4-5-6 e le categorie cui sono applicabili sono le seguenti:

**Tabella 3 - Categorie e Moduli**

Categoria	I	II	III	IV
Moduli applicabili	A	A1, D, E1	B1+D, B1+F, B+E, B+C1, H	B+D, B+F, G, H1

Nelle tabelle successive sono richiamati due soggetti, il fabbricante e l'Organismo Notificato, cui sono attribuiti ben precisi obblighi e responsabilità in relazione all'accertamento della conformità ai requisiti essenziali di sicurezza stabiliti dalla PED.

Per fabbricante si intende il costruttore dell'attrezzatura a pressione oppure il suo mandatario stabilito dalla Comunità Europea o, ancora, il soggetto responsabile dell'immissione dell'attrezzatura a pressione nel mercato comunitario. L'Organismo Notificato è il soggetto cui sostanzialmente compete l'attività di verifica e sorveglianza circa l'applicazione, da parte del fabbricante, dei requisiti previsti nei vari Moduli. Esso viene scelto dal fabbricante tra i vari Organismi Notificati riconosciuti a livello della Comunità Europea; questi vengono designati da ogni stato membro sulla base di ben precisi criteri stabiliti nella PED, e quindi notificati alla Commissione Europea ed agli altri stati membri.

**Tabella 4 - Procedure di valutazione della conformità (A)**

	Modulo	Obblighi del fabbricante	Compiti dell'Organismo Notificato (1)
A	Controllo di fabbricazione interno Procedura con la quale il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apporre la marcatura CE</li> <li>- redigere la dichiarazione di conformità</li> <li>- preparare la documentazione tecnica</li> <li>- conservare copia della dichiarazione di conformità e la documentazione tecnica per 10 anni</li> </ul>	
A1	Controllo di fabbricazione interno e sorveglianza della verifica finale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visita finale (oltre a soddisfare i requisiti del Modulo A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso</li> </ul>
B	Esame CE del tipo Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che un esemplare della Produzione considerata soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE del tipo</li> </ul>
B1	Esame CE della progettazione Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che la progettazione di un'attrezzatura a pressione soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE della progettazione</li> </ul>
C1	Conformità al tipo Procedura con cui il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione sono conformi al tipo oggetto dell'attestato CE del tipo e soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scelta di un Organismo Notificato</li> <li>- controllo che il processo di fabbricazione assicuri la conformità al tipo di cui all'attestato CE del tipo e soddisfi i requisiti della direttiva</li> <li>- esecuzione della verifica finale</li> <li>- apposizione della marcatura CE su ciascuna attrezzatura a pressione accompagnata dal numero di identificazione dell'Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della dichiarazione di conformità</li> <li>- conservare copie sulla dichiarazione di conformità per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso per controllare che la verifica finale sia svolta in accordo ai requisiti della direttiva</li> <li>- controllare esemplari delle attrezzature a pressione</li> </ul>

**Tabella 5 - Procedure di valutazione della conformità (B)**

	Modulo	Obblighi del fabbricante	Compiti dell'Organismo Notificato (1)
A	Controllo di fabbricazione interno Procedura con la quale il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apporre la marcatura CE</li> <li>- redigere la dichiarazione di conformità</li> <li>- preparare la documentazione tecnica</li> <li>- conservare copia della dichiarazione di conformità e la documentazione tecnica per 10 anni</li> </ul>	
A1	Controllo di fabbricazione interno e sorveglianza della verifica finale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visita finale (oltre a soddisfare i requisiti del Modulo A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso</li> </ul>
B	Esame CE del tipo Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che un esemplare della Produzione considerata soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE del tipo</li> </ul>
B1	Esame CE della progettazione Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che la progettazione di un'attrezzatura a pressione soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE della progettazione</li> </ul>
C1	Conformità al tipo Procedura con cui il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione sono conformi al tipo oggetto dell'attestato CE del tipo e soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scelta di un Organismo Notificato</li> <li>- controllo che il processo di fabbricazione assicuri la conformità al tipo di cui all'attestato CE del tipo e soddisfi i requisiti della direttiva</li> <li>- esecuzione della verifica finale</li> <li>- apposizione della marcatura CE su ciascuna attrezzatura a pressione accompagnata dal numero di identificazione dell'Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della dichiarazione di conformità</li> <li>- conservare copie sulla dichiarazione di conformità per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso per controllare che la verifica finale sia svolta in accordo ai requisiti della direttiva</li> <li>- controllare esemplari delle attrezzature a pressione</li> </ul>

**Tabella 6 - Procedure di valutazione della conformità (C)**

	Modulo	Obblighi del fabbricante	Compiti dell'Organismo Notificato (1)
A	Controllo di fabbricazione interno Procedura con la quale il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apporre la marcatura CE</li> <li>- redigere la dichiarazione di conformità</li> <li>- preparare la documentazione tecnica</li> <li>- conservare copia della dichiarazione di conformità e la documentazione tecnica per 10 anni</li> </ul>	
A1	Controllo di fabbricazione interno e sorveglianza della verifica finale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visita finale (oltre a soddisfare i requisiti del Modulo A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso</li> </ul>
B	Esame CE del tipo Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che un esemplare della Produzione considerata soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE del tipo</li> </ul>
B1	Esame CE della progettazione Procedura con cui un Organismo Notificato accerta e dichiara che la progettazione di un'attrezzatura a pressione soddisfa le disposizioni della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domanda di esame ad un Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della documentazione tecnica</li> <li>- conservazione della documentazione tecnica e degli attestati di esame CE del tipo per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verifica della documentazione tecnica</li> <li>- effettuare o far effettuare esami e prove per verificare l'effettiva applicazione delle norme</li> <li>- rilascio dell'attestato di esame CE della progettazione</li> </ul>
C1	Conformità al tipo Procedura con cui il fabbricante si accerta e dichiara che le attrezzature a pressione sono conformi al tipo oggetto dell'attestato CE del tipo e soddisfano i requisiti della direttiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- scelta di un Organismo Notificato</li> <li>- controllo che il processo di fabbricazione assicuri la conformità al tipo di cui all'attestato CE del tipo e soddisfi i requisiti della direttiva</li> <li>- esecuzione della verifica finale</li> <li>- apposizione della marcatura CE su ciascuna attrezzatura a pressione accompagnata dal numero di identificazione dell'Organismo Notificato</li> <li>- preparazione della dichiarazione di conformità</li> <li>- conservare copie sulla dichiarazione di conformità per 10 anni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ispezioni senza preavviso per controllare che la verifica finale sia svolta in accordo ai requisiti della direttiva</li> <li>- controllare esemplari delle attrezzature a pressione</li> </ul>

In corrispondenza di alcuni moduli la conformità delle attrezzature a pressione può essere valutata dagli utilizzatori attraverso un proprio ispettorato, in tal caso l'attrezzatura a pressione non recherà la marcatura CE.

### 1.2.5 I requisiti essenziali di sicurezza – Analisi dei rischi

I requisiti essenziali di sicurezza sono dettagliatamente descritti nell'Allegato I della PED, essi coinvolgono tutti gli aspetti attinenti alla relazione di una attrezzatura o insieme a pressione, quindi la progettazione, la scelta dei materiali, la fabbricazione, i controlli e le prove finali.

In accordo con ciò un documento fondamentale che deve essere prodotto dal fabbricante è quello denominato “Analisi dei rischi” in cui, a fronte dei singoli requisiti stabiliti in tale Allegato I, corrispondenti a condizioni e/o situazioni potenzialmente pericolose, si deve indicare se il conseguente rischio esiste e come esso sia stato analizzato e, quindi, eliminato o ridotto, indicando altresì le azioni che competono in merito all'utente della apparecchiatura.

Tra i requisiti previsti in tale Allegato I sono da rimarcare quelli che definiscono i valori delle pressioni di prova e quelli relativi alle caratteristiche dei materiali. Quanto ai primi la PED stabilisce che la pressione di prova idraulica deve essere il più elevato tra i due seguenti valori:

- Pressione massima ammissibile PS moltiplicata per 1,43
- Carico massimo che può sopportare l'attrezzatura tenuto conto della pressione massima ammissibile e della temperatura massima ammissibile moltiplicato per 1,25 (le raccomandazioni CTI indicano  $\frac{PS \times f_0}{f \times 1,25}$ , essendo  $f_0$  la sollecitazione ammissibile a freddo ed  $f$  quella a caldo).

Quanto ai materiali la PED richiede che essi posseggano adeguate caratteristiche di duttilità, in accordo a ciò devono presentare un allungamento a rottura par almeno

al 14% e devono avere una resilienza KV di almeno 27 J eseguita a temperatura non superiore a quella minima di progetto, ma in ogni caso non superiore a 20°C.

### **1.2.6 Fascicolo tecnico**

Il fascicolo tecnico è il documento che raccoglie e i vari elaborati di progetto, l'analisi dei rischi, il Piano di Fabbricazione e dei Controlli, la certificazione dei materiali, il quaderno di saldatura, la certificazione degli esami, prove e collaudi in corso di costruzione ed alla fine della stessa.

Per quanto riguarda gli elaborati di progetto è da notare che essi dovranno includere non solo quelli relativi alle verifiche nei confronti di pressione (di progetto e prova) e temperatura, ma il fascicolo tecnico dovrà anche contenere le verifiche relative alle sollecitazioni che si instaurano nelle fasi di movimentazione, trasporto e montaggio, le verifiche relative agli sforzi sui bocchelli, le verifiche nei confronti delle eventuali azioni del sisma e del vento.

Il fascicolo dovrà, inoltre, includere il Manuale Operativo, tale documento è fondamentale e deve essere consegnato, assieme alla Dichiarazione di Conformità, all'atto della consegna dell'apparecchio.

## 1.5. PRINCIPALI APPROCCI AL PROGETTO

La direttiva PED rimanda, per la progettazione e costruzione degli apparecchi a pressione, alle Norme Armonizzate (ad es. EN 13445); si intende che i requisiti di sicurezza della PED sono ritenuti soddisfatti se si ottempera ai requisiti di progettazione e costruzione della EN 13445. Ci sono essenzialmente due approcci differenti per la progettazione di un componente a pressione:

- Design by Formula (DFB): il dimensionamento e la verifica del recipiente sono basati su relazioni preconfezionate (formule) ideate per coprire, con adeguati coefficienti di sicurezza, tutte le principali situazioni che si è soliti incontrare nel progetto di un recipiente in pressione; le formule sono solitamente basate su modelli semplici o semi-empirici non molto accurati, per cui i coefficienti di sicurezza tendono ad essere più elevati.
- Design by Analysis (DBA): il dimensionamento e la verifica del recipiente sono basati su analisi accurate dell'effettivo stato di tensione, solitamente ottenibile solo con modelli basati sul Finite Element Method (FEM). L'approccio DBA si rende necessario per i casi non coperti dalle relazioni relative al metodo DBF, ma viene impiegato anche in alternativa a quest'ultimo. Confidando sulla maggiore accuratezza dell'analisi, i coefficienti di sicurezza impiegati tendono ad essere più bassi.

Nei capitoli successivi saranno analizzate nel dettaglio la normativa ASME sezione VIII, che segue nella divisione 1 l'approccio DBF e nella divisione 2 la combinazione di entrambi, e la EN 13445 che segue entrambi gli approcci.

## **1.6. CALCOLI A CODICE (*Design by formula*)**

Ogni Normativa propone nelle sezioni relative alle regole di progettazione, le proprie formule e diversi procedimenti per il dimensionamento delle singole parti dei componenti. Per i dettagli costruttivi più semplici, come i mantelli cilindrici, i fondi e i coperchi piani, le formule fra una Normativa e un'altra sono molto simili se non identiche. Per altri dettagli come le aperture dei bocchelli, le piastre tubiere, le flange e la bulloneria, le procedure sono in genere diverse, perché derivano dalle esperienze costruttive proprie di ogni paese.

Le formule proposte dalla normativa, indicata anche con il termine Codice, forniscono gli spessori minimi da adottare per le singole membrature, valutati in base alle condizioni di progetto ed alle caratteristiche del materiale costruttivo. I dati di progetto principali sono: *temperatura, pressione corrosione, dimensioni caratteristiche* (ad esempio per un mantello il diametro interno da rispettare).

Spesso occorre conoscere anche carichi addizionali, quali pesi aggiuntivi, battenti idrostatici, pressioni differenziali e forze esterne dovute alle tubazioni o ai carichi indotti dal vento o a un sisma. Per quanto riguarda il materiale, occorre estrapolare la tensione ammissibile alla temperatura di progetto dalla tabella appropriata. Ad esempio, per l'ASME VIII Divisione 1, lo spessore minimo di un mantello sferico soggetto a pressione interna vale:

$$t = \frac{pR}{2SE - 0.2p}$$

Nella formula  $p$  è la pressione,  $R$  il raggio interno della sfera considerato come tensione ammissibile (*Allowable Stress*) ed  $E$  l'efficienza dei giunti. La formula è valida quando  $t$  non supera  $0,356 R$  oppure quando  $p$  non supera  $0,665 SE$ .

Ogni codice propone una serie di restrizioni all'uso delle singole formule, per il fatto che ognuna di esse è ritenuta valida nell'ambito di una certa schematizzazione del problema. Nel complesso, comunque, i campi di utilizzo delle espressioni, sono sufficientemente ampi e permettono di dimensionare un componente in ogni sua parte principale.

Per fare un esempio numerico, con  $R=1200$  mm,  $p=10$  MPa,  $S=120,66$  MPa ed  $E=1$  si ottiene dalla formula precedente  $t=50,14$  mm. Si vede che  $t \leq 0,365R = 438\text{mm}$  e  $p \leq 0,665 SE = 80,24$  MPa. Dovrà essere adottato quindi uno spessore di parete di almeno 51 mm.

Questa e le altre operazioni di dimensionamento permettono di definire gli spessori di ogni parte del componente e di procedere con la tracciatura dei disegni costruttivi. Si potrà infine provvedere all'ordinazione dei materiali per la costruzione.

Un altro tipo di calcolo, che può rivestire un ruolo importante per il dimensionamento, riguarda le *azioni delle tubazioni sul componente*, che si concretizzano in carichi esterni agenti sulle connessioni e in addizione ai pesi sugli elementi di supporto. L'insieme di questi carichi e della pressione di progetto può

portare a richiedere, nelle singole membrature in vicinanza delle connessioni, spessori maggiori di quelli richiesti utilizzando solo le formule del Codice.

Si risolve il problema, se possibile, ponendo dei rinforzi oppure adottando tratti di membratura rinforzata. La valutazione di queste azioni combinate viene effettuata con calcoli specialistici utilizzando alcune trattazioni di tipo semi-sperimentale. Risulta possibile valutare, mediante formule e grafici semi-sperimentali, le tensioni dovute alle azioni combinate di pressione e carichi esterni e di decidere sull'accettabilità dei dettagli costruttivi. In questo caso si sconfinava spesso dai campi di validità dei metodi semi-analitici ed è frequente ricorrere ad un'analisi di tipo numerico.

*Le azioni esterne dovute al vento e al terremoto* vengono valutate utilizzando le indicazioni prescritte dalle nazioni, per i siti di costruzione che ospitano gli impianti. Comunque, nella maggior parte dei paesi in via di sviluppo, dove sono frequenti questo tipo di costruzioni, non si dispone ancora di normative specifiche e ci si attiene frequentemente a quelle di altri paesi, relativamente a zone climatiche e geologiche simili.

Il calcolo degli *elementi di supporto* viene eseguito per lo più con metodi analitici, anche molto raffinati, utilizzando i fondamenti della Scienza delle Costruzioni. Le azioni dei carichi dovuti al peso del componente, integrate con quelle sulle connessioni e del vento e del terremoto, permettono di dimensionare gli elementi di sostegno e di ancoraggio con maggiore sicurezza. Viceversa, se è richiesto uno studio dettagliato della zona di giunzione fra supporto e componente, occorre ancora una volta affidarsi ai calcoli speciali che comportano quasi sempre l'analisi numerica.

Infine, il calcolo dei dettagli costruttivi di un apparecchio tratta anche una serie di problemi relativi ai calcoli per le parti “*non a pressione*” dove, se non diversamente specificato, si può omettere l’utilizzo delle regole specifiche del codice. È il caso degli elementi di sostegno, di movimentazione, di sollevamento e di trasporto. In questi casi si può fare riferimento ancora alle regole della scienza delle costruzioni ed ai metodi di valutazione delle tensioni riconosciuti tipici dell’ingegneria meccanica, come per esempio quelli riportati nel manuale AISC (*American Institute for Steel Construction*).

Come esempio consideriamo l'apparecchio in figura:

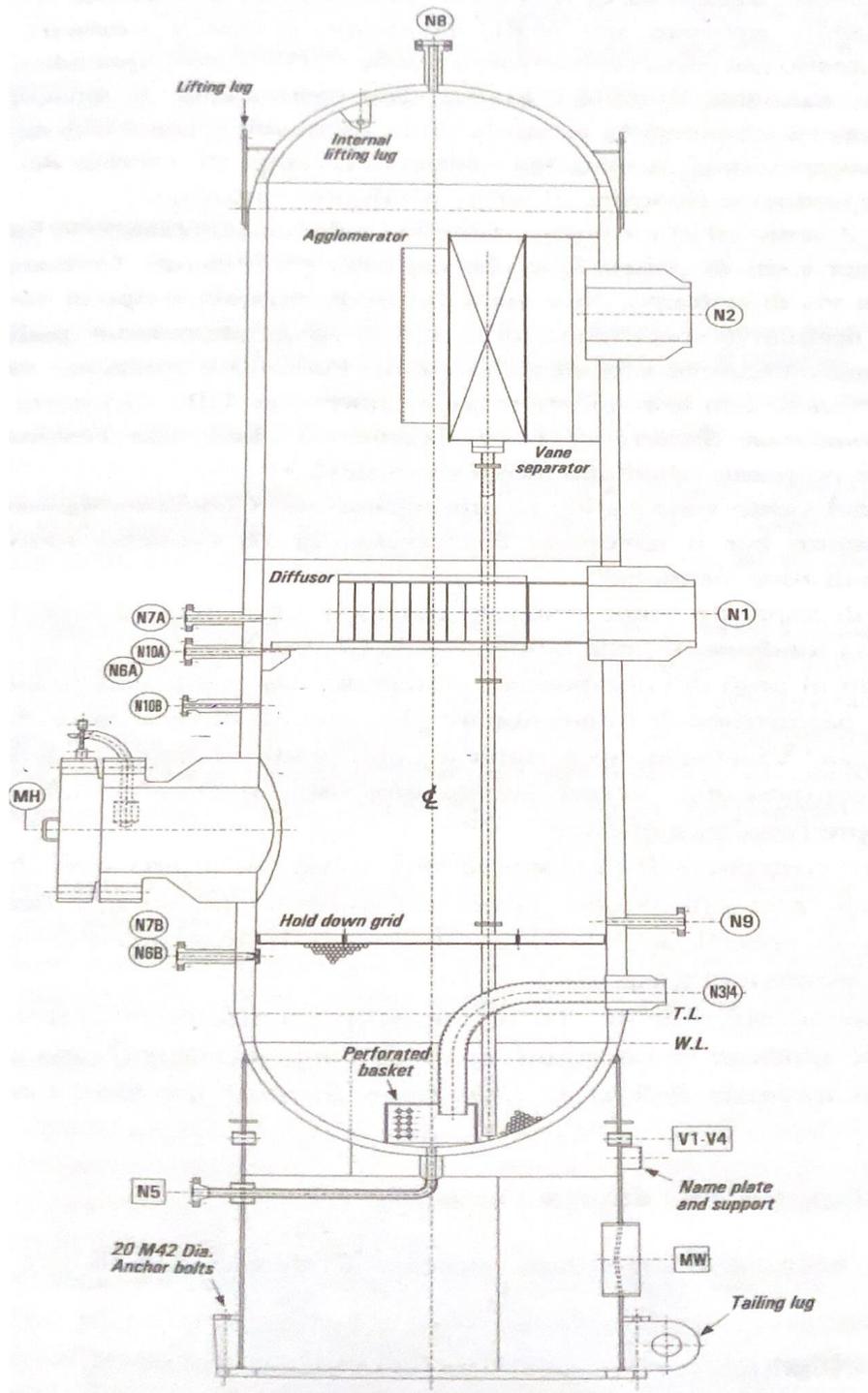


Figura 3 - Disegno d'insieme di un componente ad asse verticale

Per il dimensionamento è necessario effettuare secondo Codice, i calcoli per i seguenti dettagli.

Parti a pressione:

- Mantello cilindrico
- Fondo superiore
- Fondo inferiore
- Apertura rinforzata per il passo d'uomo MH
- Aperture rinforzate di servizio N1 ed N2
- Aperture rinforzate di servizio N3 ed N4
- Aperture di drenaggio, tubo di collegamento e flangia N5
- Aperture per la strumentazione N6...N10, se non standard
- Aste, flangia e coperchio del passo d'uomo, se non standard

Pressione e carichi esterni:

- Aperture rinforzate di servizio N1 ed N2
- Aperture rinforzate di servizio N3 ed N4
- Apertura rinforzata di drenaggio N5 sul fondo inferiore

Parti non a pressione:

- Gonna di supporto
- Anelli di base
- Bulloni di ancoraggio
- Supporti interni
- Orecchie di sollevamento interne ed esterne

- Meccanismo di movimentazione coperchio passo d'uomo
- Selle di trasporto (non rappresentate)

Si osserva che si può omettere il calcolo di alcune parti del componente, in particolare delle flange, se si utilizzano dimensioni unificate (standard). Anche il calcolo di alcuni dettagli esterni, come il meccanismo di movimentazione del coperchio del passo d'uomo (*davit*), le “scatole” (*chairs*) dei bulloni di ancoraggio (*anchor bolts*) ed altri accessori può essere omissivo, se si fa riferimento a standard e specifiche riconosciute e previste nel contratto di fornitura del componente. Gli interni vengono in genere calcolati dai costruttori specializzati, piuttosto che da quelli degli apparecchi: devono garantire la stabilità a pesi, corrosioni e pressioni differenziali date dal processo interno (*pressure drop*).

Tutti questi calcoli, così come la valutazione delle sollecitazioni sulla fondazione dovute al peso del componente e all'azione eventuale del vento e del terremoto, devono essere illustrati in un rapporto di calcolo che insieme ai disegni costruttivi dettagliati, costituisce la documentazione che accompagna il componente e ne prova la compatibilità con il codice.

## 1.7. METODI NUMERICI (*Design by analysis*)

Come si è detto, non è possibile definire con precisione un dettaglio costruttivo con i metodi *by formula* proposti dal Codice, sia perché cadono i presupposti che hanno portato ad una certa schematizzazione del problema, sia perché le condizioni di carico di cui tenere conto risultano numerose e complesse.

In molte normative sono comunque presenti sezioni speciali, che si dedicano a problemi ingegneristici particolari, con trattazioni analitiche o semi-analitiche anche molto raffinate.

Spesso oltre al problema ingegneristico, si aggiunge anche un problema di accettabilità di un metodo e di dover comunque giustificare in modo accurato il calcolo nella documentazione del componente. I pregi maggiori di una Normativa sono proprio quelli di fornire molti strumenti di analisi ed al tempo stesso di essere riconosciuti da tutti.

Queste caratteristiche, per quanto riguarda gli apparecchi in pressione sono chiaramente espressi dalle ASME, che oltre che essere note a livello mondiale, si arricchiscono nel tempo di continue precisazioni e metodologie. Anche il discorso dell'analisi numerica è stato trattato principalmente da questa Normativa che ha funzionato da locomotore per tutti gli altri argomenti: il risultato è il criterio di accettabilità degli stati tensionali ottenuti con analisi numeriche proposto dall'ASME è praticamente lo stesso per tutte le altre Normative.

I metodi numerici si prefiggono di stabilire i livelli di tensione nei dettagli costruttivi punto per punto, come in figura 4, e di estrarre da questi dati, le conclusioni che portano a decidere sulla fattibilità del progetto.

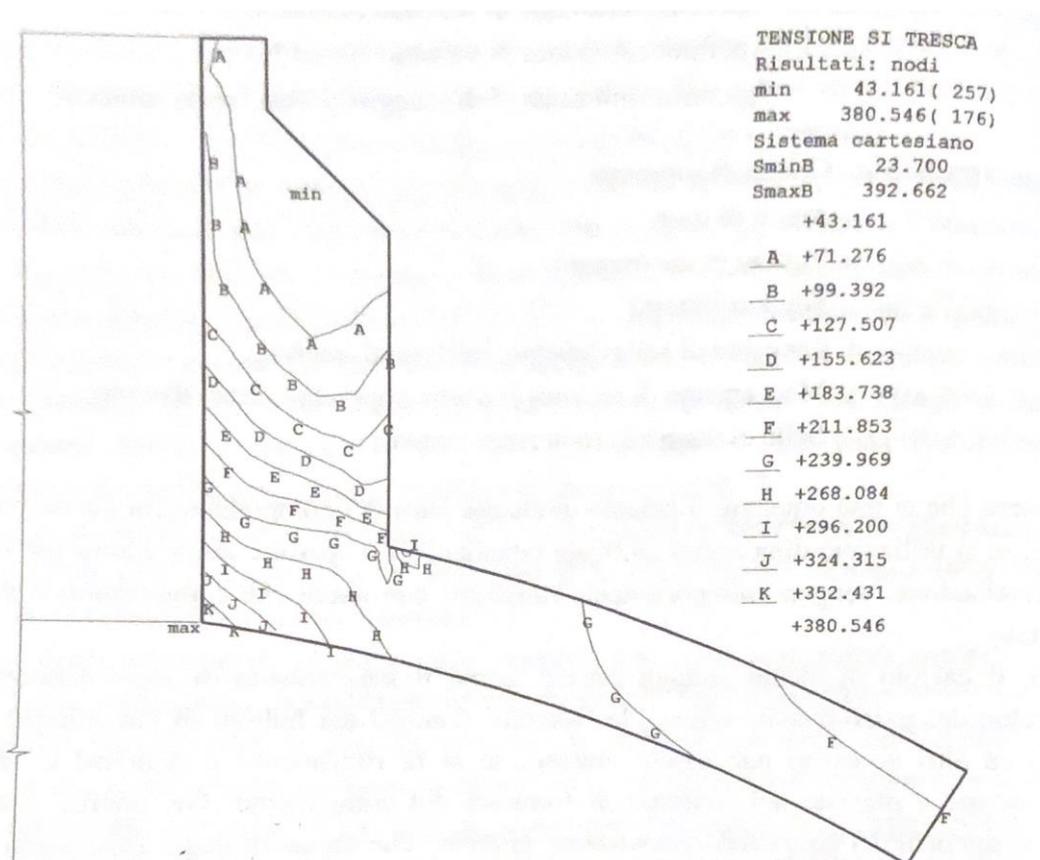


Figura 4 - Tensione equivalente di Tresca in un bocchello su un fondo emisferico

Il metodo più che uno strumento di progettazione, è uno strumento di verifica, in quanto non è possibile applicarlo se non si definiscono a priori le dimensioni geometriche del dettaglio da studiare. Normalmente vengono quindi fatte alcune assunzioni per dare una forma primitiva al particolare da studiare. A valle

dell'elaborazione numerica sarà possibile portare modifiche e migliorie per razionalizzarne, a posteriori, la forma e la dimensione definitiva.

Questi metodi di valutazione delle tensioni sono di origine diversa sia matematico-analitica che sperimentale. La prima comporta l'utilizzo del metodo degli elementi finiti che richiede una rappresentazione simulata del dettaglio al calcolatore, mentre la seconda si basa su procedimenti fotoelastici, estensimetrici ed altri ancora e necessita della preparazione di un prototipo del dettaglio.

Il *metodo degli elementi finiti* è il metodo numerico più utilizzato, per ragioni che vanno dalla rapidità e dalla precisione della risposta, dovuta alla potenza degli elaboratori attuali, alla libertà di non produrre costosi prototipi che si rivelano inevitabilmente obsoleti dopo la prima analisi. Il metodo è riconosciuto a livello mondiale ed i risultati possono essere facilmente riprodotti su altri elaborati e riportati con semplicità nella documentazione.

Per gli apparecchi in pressione, il progetto prevede quasi sempre una valutazione di carico di tipo statico, per cui è sufficiente effettuare analisi strumentali di tipo stazionario. Le condizioni di tipo dinamico sono più frequenti per quel che riguarda gli aspetti termici, dove a volte è necessario stabilire le fluttuazioni di temperatura nel tempo in alcuni dettagli dei componenti, per stimare la resistenza a fatica. Tutte queste problematiche si affrontano molto bene con il metodo degli elementi finiti, che permette di fotografare gli stati tensionali e termici con elevata praticità.

Indipendentemente dal metodo numerico con cui si arriva alla determinazione puntuale delle tensioni in un dettaglio costruttivo, rimane da stabilire il legame con

i parametri che decidono sull'accettabilità del progetto, ovvero con le espressioni tensionali ed i criteri alla base della Scienza delle Costruzioni.

La normativa ASME VIII Divisione 2 Parte 5 riporta chiaramente questo legame, definendo i parametri e stabilendo le regole che legano le tensioni valutate coi metodi numerici con le tensioni ammissibili dei materiali.

Nella tabella che segue sono mostrate le sezioni di alcune Normative che trattano l'argomento dell'analisi numerica definita solitamente come *Stress Analysis*. Se si confrontano le diverse sezioni, si osserva come ogni Codice abbia adottato in definitiva il metodo proposto dalle ASME.

**Tabella 7 - Sezioni di alcune Normative che trattano l'argomento della Stress Analysis**

Normativa	Paese	Sezione
ASME VIII	USA	Division 2, Part 5
BS 5500	Inghilterra	Appendix A
AD Merkblätter	Germania	Special Cases C2
Stoomwezen	Olanda	D 1200 V
CODAP	Francia	Section C10
VSR	Italia	Capitolo 7 A
SFS	Finlandia	SFS3292 : E
EN 13445 - 3	Europa	Annex C

## **2. NORMATIVA ASME**

### **2.1. GENERALITA'**

La American Society of Mechanical Engineers “Associazione americana degli ingegneri meccanici”, più nota come ASME, a livello internazionale è riconosciuta leader nello sviluppo di codici di calcolo, procedure, norme e standard per tutte le applicazioni e sviluppi nell’ingegneria meccanica.

Il Codice ASME nacque negli Stati Uniti d'America a seguito delle crescenti richieste in tema di sicurezza per le attrezzature a pressione ed alla necessità di uniformare gli standard esistenti relativamente alla progettazione, alla costruzione ed all'ispezione delle stesse.

A partire dalla prima emissione del suo leggendario codice” Boiler & Pressure Vessel” nel 1914, i codici e le standard ASME sono aumentati superando il numero di oltre 600 e coprono una vasta gamma di argomenti: tecnologie della pressione e impianti nucleari, ascensori e scale mobili, strutture, telai, costruzioni, macchinari etc. Lo sviluppo e la revisione dei codici e degli standard ASME sono continui e gli aggiornamenti sono pubblicati durante tutto l’arco dell’anno.

A questo si dedicano volontariamente più di 4.700 ricercatori: ingegneri, scienziati, funzionari governativi, esperti in ogni settore; essi contribuiscono con le loro competenze tecniche alla periodica revisione con il fine di migliorare regolarmente gli standard e soprattutto informare continuamente in merito alle migliori applicazioni nell’industria, testando le prestazioni per la garanzia del rendimento.

Il risultato della loro continua attività di ricerca, svolta in oltre cento nazioni, determina lo sviluppo e l'evoluzione del codice in tutto il mondo.

I loro contributi permettono a ASME di presentare standard che migliorino la sicurezza pubblica, la salute e la qualità della vita e facilitino innovazione, competitività e commercio. ASME inoltre sviluppa e aggiorna gli standard in base alle esigenze del mercato con un continuo processo di revisione attraverso comitati pubblici di consenso. I comitati di consenso ASME sono composti da esperti che hanno interessi diversi e includono produttori, utenti, governo e organi competenti.

## **2.2. SCHEMI PRINCIPALI PER LE REGOLE DI PROGETTAZIONE**

La Normativa ASME Section VIII propone tre schemi principali per le regole di progettazione, la Divisione 1, la Divisione 2 e la Divisione 3.

### **2.1.1 La divisione 1**

La divisione 1 è basata sul criterio della massima tensione principale. Pertanto, le regole di progettazione sono più semplici, mantenendo margini di sicurezza più elevati considerando la resistenza del materiale inferiore al valore reale, in pratica utilizzando fattori di sicurezza maggiori.

La tensione ammissibile viene definita con la lettera S (*Maximum Allowable Stress*) e viene determinata, a parte il campo dello scorrimento viscoso (*creep*), in base ai

valori di rottura  $S_u$  e di snervamento  $S_y$  del materiale. I valori dipendono dai materiali e sono sempre ricavabili da specifici tabulati.

$$S = \min\left(\frac{S_u}{3,5}, \frac{S_y}{1,5}\right)$$

I componenti che nascono con questi criteri presentano spessori di parete più elevati rispetto a quelli ottenuti con procedimenti di calcolo più accurati, ma non necessitano di studi approfonditi per la valutazione degli stati tensionali.

Questa filosofia di progettazione è accettabile, quando il costo del materiale utilizzato per l'apparecchio non è elevato, ad esempio se si usano acciai al carbonio. Viceversa, se il costo è una discriminante occorre ricorrere a metodologie di calcolo più raffinate, per dosare al minimo le quantità di materiale necessario.

Questi criteri conservativi sono i più utilizzati quando le temperature di progetto sono elevate e si opera nel campo del creep. Se le regole proposte non sono sufficienti per una valutazione dettagliata degli stati tensionali, si ricorre spesso a metodologie di calcolo più raffinate, che includono la *Stress Analysis*, la *Fatigue Analysis*, la *Buckling Analysis*, la *Plastic Analysis* ed altre ancora.

### **2.1.2 La divisione 2**

La divisione 2 si basava in passato sul criterio della massima tensione tangenziale, valutando la tensione equivalente di **Guest-Tresca** ottenuta per differenza fra le tensioni principali prese a due a due e definita come *Stress Intensity*; dal 2007 si è adottato invece il criterio di **Von Mises**, definito come *Equivalent Stress*. Le regole di progettazione sono meno conservative delle precedenti, nel senso che i valori di

tensione permessa sono più elevati a fronte di una maggiore precisione di calcolo richiesta. La tensione ammissibile viene definita con  $S$  (*Allowable Stress*) vale:

$$S = \min\left(\frac{S_u}{2,4}, \frac{S_y}{1,5}\right)$$

Nell'appendice A della normativa sono poi date le seguenti tabelle:

- U ed Y riportano la tensione di rottura e lo snervamento per una breve selezione di materiali
- 6 e 7 per le tensioni ammissibili a pressione esterna ghiacciai al carbonio e acciai austenitici
- TM del modulo di Young
- TE del coefficiente di dilatazione termica
- TC del coefficiente di conducibilità termica
- TD del coefficiente di diffusività termica
- PRD del coefficiente di Poisson e densità
- P delle proprietà fisiche
- F delle curve a fatica
- K della tenacità a frattura

### 2.1.3 La divisione 3

La divisione 3 è nata con l'edizione del 1° gennaio 1999 ed è relativa alla progettazione di apparecchi con elevata pressione di servizio (circa 70 MPa). I materiali che possono essere utilizzati in questo tipo di progettazione sono molto limitati e hanno valori della tensione di snervamento molto elevata, prossima al valore della rottura. Qui le regole di progettazione *by formula* sono veramente esigue ed il progetto è legato fortemente alle tecniche numeriche. Dopo una breve evoluzione dei coefficienti di sicurezza, oggi si progetta utilizzando un fattore di

sicurezza  $\sqrt{3}$  sulla pressione di collasso plastico calcolata secondo il criterio di Von Mises. Nel complesso si ottengono spessori ancor meno conservativi di quelli ottenuti nella Divisione 2; la lista dei materiali utilizzabili è però molto limitata.

### **2.3. METODO DEGLI ELEMENTI FINITI (DBA)**

Il metodo degli elementi finiti si presta molto bene allo studio dei componenti in pressione in quanto permette di risolvere in dettaglio una vasta gamma di problemi strutturali, utilizzando fondamentalmente sempre lo stesso procedimento.

Il compito dell'esperto è quello di realizzare il modello di calcolo di campo e di inserirvi tutte le condizioni di carico progettuale, quindi di valutare opportunamente i risultati numerici: occorre infatti sempre fare riferimento alla normativa applicabile, per decidere sulla accettabilità degli stati tensionali ottenuti. Abbiamo anticipato come la normativa americana ASME nella parte 5 della divisione 2 definisca in modo generale e preciso le grandezze che devono essere valutate per utilizzare i metodi numerici ed in particolare il metodo degli elementi finiti come strumenti di verifica degli stati tensionali.

In questo capitolo verrà illustrata la linea guida del metodo e verranno inoltre elencate le principali proprietà di alcuni acciai utilizzati per la costruzione dei componenti in pressione. Questi dati sono necessari sia per la verifica di accettabilità delle tensioni secondo il criterio proposto, sia per la preparazione dei modelli da risolvere con il metodo degli elementi finiti.

Come si è detto, ogni codice definisce le specifiche per i materiali che devono essere utilizzati nell'ambito delle proprie regole di progettazione. Fornisce inoltre gli strumenti per la definizione delle tensioni ammissibili in base alle diverse caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati che in genere sono funzione della temperatura. Il database di questi dati è particolarmente importante e caratterizza e qualifica la normativa.

### **2.3.1 Classificazione delle tensioni**

La normativa ASME VIII Divisione 2 adotta un metodo alternativo di progettazione rispetto alla più semplice Divisione 1: il calcolo delle membrature secondo il criterio della limitazione dell' *Equivalent Stress* che non è altro che la definizione della tensione equivalente di Von Mises. Nelle edizioni precedenti il 2007, la tensione di riferimento era quella di Guest-Tresca, che rimane comunque sempre quella valida per la Sezione III (Nucleare). Questo procedimento generale di progettazione verifica è illustrato nella parte 5 e prevede un'analisi approfondita delle tensioni nelle diverse sezioni dell'apparecchio. Le tensioni vengono classificate a seconda che siano originate da effetti meccanici o termici, oppure che siano o non siano di tipo autolimitante.

Un progetto risulta accettabile, se per ogni classe di tensione sono rispettati i limiti imposti, che a loro volta sono funzione del tipo di carico. Le tensioni in una sezione generica di un componente sono classificate principalmente come:

***Tensioni Primarie:*** sono contrassegnate con la lettera P e sono originate dal carico vivo imposto e la loro esistenza è necessaria per soddisfare le leggi di equilibrio fra le forze interne ed esterne punto la loro caratteristica principale è che non sono

autolimitanti, nel senso che se superano il valore di snervamento del materiale, conducono in breve alla rottura o comunque a deformazioni di grande entità. Una distinzione ulteriore può essere fatta per le tensioni primarie locali: in genere nascono in prossimità di discontinuità geometriche e sono dovute a distorsioni nel trasferimento del carico sostenuto da una regione ad un'altra.

**Tensioni Secondarie:** contrassegnate dalla lettera Q sono originate dall'impedimento alla libera deformazione che nasce sulla struttura in seguito all'applicazione di carichi o di vincoli. Queste tensioni hanno la caratteristica di essere auto limitanti nel senso che piccoli spostamenti o plasticizzazione locali eliminano le cause di deformazione impedita e quindi leggono imponenti stesse di tensioni.

**Tensioni di Picco:** Sono contrassegnate con la lettera F e sono originate da fenomeni fortemente localizzati che non causano distorsioni apprezzabili alle sezioni del componente punto sono importanti solo per l'analisi a fatica o nello studio della meccanica della frattura, perché possono essere all'origine della generazione e della propagazione dei difetti punto le componenti primarie e secondarie sono in genere valutabili con i normali metodi del calcolo della scienza delle costruzioni basati sulla teoria dell'elasticità. Viceversa, le componenti di picco sono di più difficile determinazione e si stimolano sulla base di formulazioni matematiche molto complesse, con metodi sperimentali o con le tecniche numeriche, dove risultano spesso ben evidenti nelle classiche "macchie rosse" delle figure a colori.

La tabella 8 illustra la definizione e la simbologia delle componenti di tensione proposta dalla Normativa ASME. La stessa classificazione può essere trovata sui

testi delle altre normative dove può cambiare solo il simbolo che rappresenta la componente.

**Tabella 8 - Classificazione delle tensioni**

Componente	Simbolo	Descrizione
Pressione membranale	$P_m$	Tensione media in una sezione escluse le discontinuità e i punti di concentrazione di tensione, originata dai soli carichi meccanici, quali pressioni, pesi, forze vive, ecc.
Primaria membranale locale	$P_L$	Tensione media in una sezione, comprese le discontinuità ma non le concentrazioni, originata dai soli carichi meccanici
Primaria flessionale	$P_b$	Tensione proporzionale alla distanza dall'asse neutro della sezione escluse le discontinuità ed i punti di concentrazione, originata dai soli carichi meccanici.
Secondaria membranale e flessionale	Q	Tensione auto equilibrante la necessaria per poter soddisfare la continuità dei campi di tensione nella struttura virgola che si rivela in prossimità delle discontinuità e può essere causata da carichi meccanici e/o termici con esclusione delle concentrazioni di tensione.
Picco	F	Tensione prodotta da concentrazione, quali intagli più la spigoli ricche ed altre discontinuità particolari e da alcune tensioni termiche che possono causare fenomeni di fatica ma non distorsione della struttura

Una volta effettuata la classificazione, si adottano criteri di valutazione diversi per le singole combinazioni di tensione e per le loro combinazioni. In sostanza le componenti primarie non devono dar luogo alla completa plasticizzazione della sezione del materiale che viene mantenuta come risorsa strutturale per le eventuali componenti secondarie.

**Tabella 9 - Criteri di verifica per le componenti di tensione e delle loro combinazioni**

Combinazione	Valore	Limite
Primaria membranale	$P_m$	S
Primaria membranale locale	$P_L$	1.5 S
Primaria membranale + Primaria flessionale + Primaria membranale locale + Primaria flessionale	$P_m + P_b$  $P_L + P_b$	1.5 S
Membranale + Flessionale (ovunque)	$P_m + P_b + Q$ $P_L + P_b + Q$	$S_{PS}$
Tensione totale (ovunque)	$P_m + P_b + Q + F$ $P_L + P_b + Q + F$	$S_a$

Dove S = Allowable Stress alla temperatura di progetto,  $S_{PS}$  = Massimo valore tra i seguenti: 3 volte il valore medio della S alla temperatura massima e minima durante il ciclo (range) oppure 2 volte il valore medio tra gli snervamenti  $S_y$  alla temperatura massima e minima durante il ciclo, ma solo se il rapporto  $\frac{S_y}{S_u} < 0,7$ .

$S_a$  = Tensione ottenuta dalle curve di fatica.

Nella definizione dei carichi per la determinazione delle tensioni, occorre fare una precisazione: pressioni, pesi e carichi sono combinati al 100% del valore effettivo

per valutare con precisione le tensioni più importanti. Azioni come vento e terremoto vanno invece combinati con percentuali diverse con gli altri carichi (es. 70% il sisma, 75% il vento, insieme al 90% della pressione di progetto). in passato si combinavano tutti i carichi al 100% ma si utilizzava una tensione ammissibile del 20% superiore al valore nominale quando erano inclusi i carichi eccezionali come vento e sisma. Questo oggi non è più permesso nella divisione 2 ma rimane invece come regola semplice per la divisione 1.

**Tabella 10 - Combinazione dei carichi per il progetto**

Caso	Combinazione dei carichi di progetto
1	$P + P_S + D$
2	$P + P_S + D + L$
3	$P + P_S + D + L + T$
4	$P + P_S + D + S_S$
5	$0.6D + (W \text{ oppure } 0.7E)$
6	$0.9P + P_S + D + (W \text{ oppure } 0.7E)$
7	$0.9P + P_S + D + 0.75(L + T) + 0.75S_S$
8	$0.9P + P_S + D + 0.75(W \text{ oppure } 0.7E) + 0.75L + 0.75S_S$

$P$  = Pressione interna od esterna di progetto

$P_S$  = Pressione dovuta a battenti idrostatici aggiuntivi

$D$  = Peso proprio

$L$  = Carichi vivi (fluidi o macchinari in movimento)

$E$  = Carico sismico

$W$  = Carico del vento

$S_S$  = Carico della neve

$T$  = Carichi autolimitanti: termici, spostamenti – deformazioni imposti, ecc.

Nella progettazione di reattori e scambiatori è raro che i pesi o le azioni eccezionali esterne abbiano una influenza determinante sulle singole parti a pressione. Queste diventano invece importanti nello studio degli elementi di supporto e delle loro giunzioni col componente. Tuttavia, per apparecchi molto alti che lavorano a bassa pressione a vuoto e quindi di spessore nominale modesto, anche le azioni longitudinali date dai carichi esterni possono diventare significative.

### **2.3.2 Analisi a fatica**

In generale, le analisi svolte per la verifica degli apparecchi in pressione sono quasi esclusivamente di tipo statico. Spesso includono carichi di tipo termico di cui è necessaria un'analisi stazionaria o a volte in transitorio termico, per la determinazione di una distribuzione di temperatura particolare.

La maggior parte delle azioni dinamiche significative, come ad esempio la spinta del vento o di una potenziale terremoto, sono schematizzabili con sollecitazioni statiche equivalenti e possono essere stimate con regolamentazioni particolari come l'ASCE (American Society of Civil Engineers), l'UBC (Uniform Building Code), la BS-CP3 (British Standard, Chapter 3) ed altre ancora.

A volte, tuttavia, è necessario effettuare un'analisi a fatica per alcune sollecitazioni esterne particolari o soprattutto di tipo termico. L'analisi si semplifica frequentemente in una o più valutazioni statiche, dove si determinano in modo molto accurato le tensioni puntuali, ovvero la combinazione delle componenti di membrana, di flessione e di picco.

### 2.3.3 Limiti delle tensioni

Il limite sulla tensione primaria deve garantire un comportamento in campo elastico, ovvero assenza di deformazioni plastiche. Se consideriamo una barra con materiale a comportamento elastico-perfettamente plastico e soggetta a trazione, una volta che il carico  $F$  arriva al valore  $F_y$ , la barra non è più in grado di sopportare incrementi di carico e si rompe quando raggiunge la deformazione a rottura. Pertanto, la tensione limite è quella ammissibile  $S$  (tab.9).

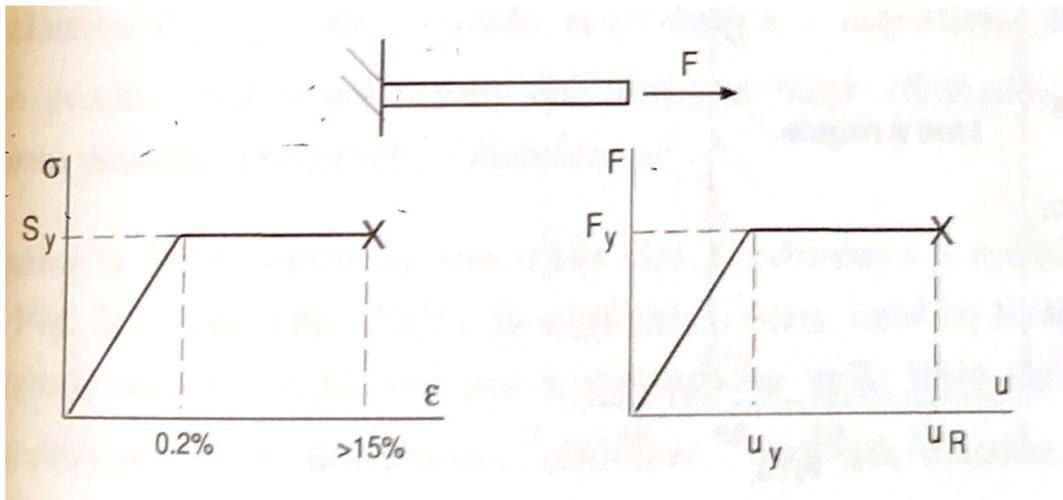


Figura 5 - Trazione in una barra

Il limite sulla tensione primaria flessionale ha un valore maggiore di  $S$ , come si può dedurre analizzando il comportamento della barra in figura 6 soggetta a flessione. La tensione massima è data da  $M/W$ , essendo  $M=FL$  il momento flettente e  $W$  il modulo di resistenza. L'andamento della tensione è lineare finché il momento è minore di  $M_y$ , mentre la barra collassa quando si forma una cerniera plastica, ovvero

se la sezione è rettangolare per  $1.5 M_y$ . Pertanto, la tensione limite è quella di  $1.5 S_y$  (tab.9)

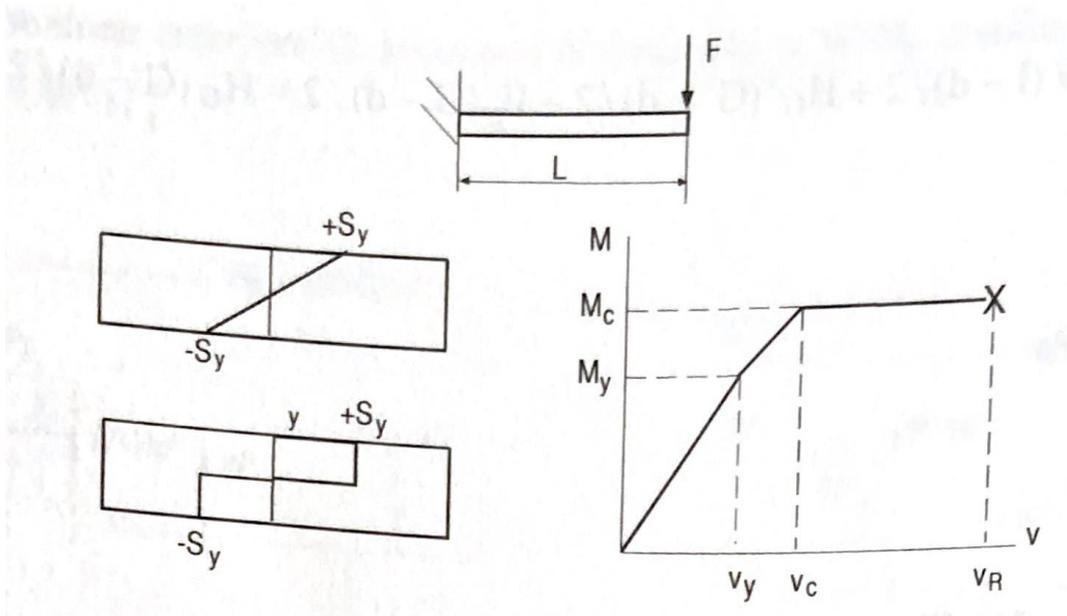


Figura 6 - Flessione in una trave

I limiti sulle tensioni membranali, flessionali e sulla loro combinazione si può anche giustificare considerando una trave di sezione rettangolare soggetta a sforzo normale  $N$  e flessione  $M$  ed esaminando il valore della tensione limite che provoca la formazione di una cerniera plastica.

Nel caso di plasticità perfetta in presenza o di solo sforzo normale o di sola flessione la massima tensione vale rispettivamente:

$$\sigma_{max} = S_y = P_m$$

$$\sigma_{max} = 1.5 S_y = P_b$$

Per quanto riguarda le tensioni secondarie il limite di  $3S$  si deduce considerando una variazione ciclica del livello tensionale. Si consideri ancora una trave con

materiale a comportamento elastico-perfettamente plastico e soggetta ad una rotazione imposta, che viene rilasciata e poi di nuovo applicata ciclicamente. L'entità della rotazione sia tale da determinare una tensione in campo elastico di  $2 S_y$ . Il diagramma di carico-scarico è mostrato nella figura che segue:

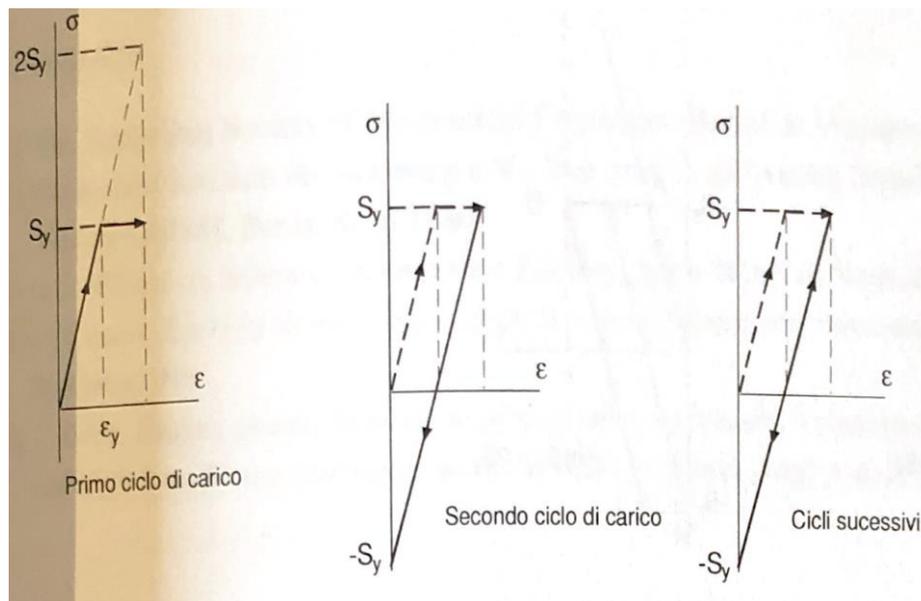


Figura 7 - Shakedown ad azione elastica

Dopo il primo ciclo di rotazione, la fibra esterna della trave è plastica, ma nel suo successivo ciclo la fibra non si snerva: questo comportamento è detto *shakedown*. Poiché  $2S_y$  è equivalente a  $3S$ , il fattore 3 nella tab.9 previene una deformazione plastica eccessiva nei problemi di fatica. Nello studio delle tensioni secondarie ammissibili ha quindi un significato speciale l'ampiezza di tensione elastica  $2 S_y$ . Quando i carichi sono ciclici, è importante determinare il confine tra il carico che

produce effetti nel campo del limite elastico (*Shakedown*) e il carico che produce deformazioni plastiche progressive (*Ratcheting*).

Consideriamo la fibra esterna di una trave che è deformata a trazione fino al valore  $\epsilon_1$ , come mostra la figura successiva (percorso OAB): la tensione elastica sarebbe  $S_1 = E \epsilon_1$ . Quando la trave torna nella posizione iniziale O, rimane una compressione nella fibra OC uguale a  $S_1 - S_y$ . Il carico successivo deve rimuovere tale tensione altrimenti l'intervallo elastico aumenta di  $S_1 - S_y$ .

Se  $S_1 = 2 S_y$  l'intervallo elastico diventa  $2 S_y$ , ma se  $S_1 > 2 S_y$  le fibre vanno in compressione (tratto EF) e nei cicli successivi si hanno deformazioni plastiche. Pertanto, il limite di  $2 S_y$  è il massimo valore della tensione secondaria che produce effetti tali da rimandare in campo elastico (*Shakedown*).

Quindi il fattore 3 che era presente nella versione precedente delle ASME deriva da questa considerazione: moltiplicando il fattore 2 per il fattore 1.5 si ricava appunto 3, che nella nuova versione delle ASME si definisce con  $S_{PS}$  (3 volte il valore medio della S alla temperatura massima e minima durante il ciclo)

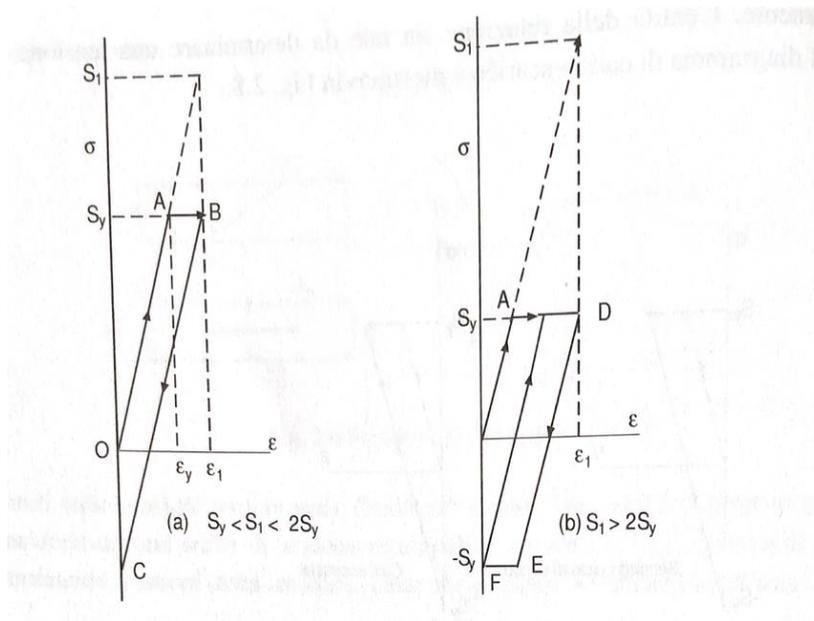


Figura 8 - Ciclo della deformazione oltre lo snervamento del materiale

Il fenomeno del *Ratcheting* è quantificabile mediante il diagramma di Bree riportato di seguito:

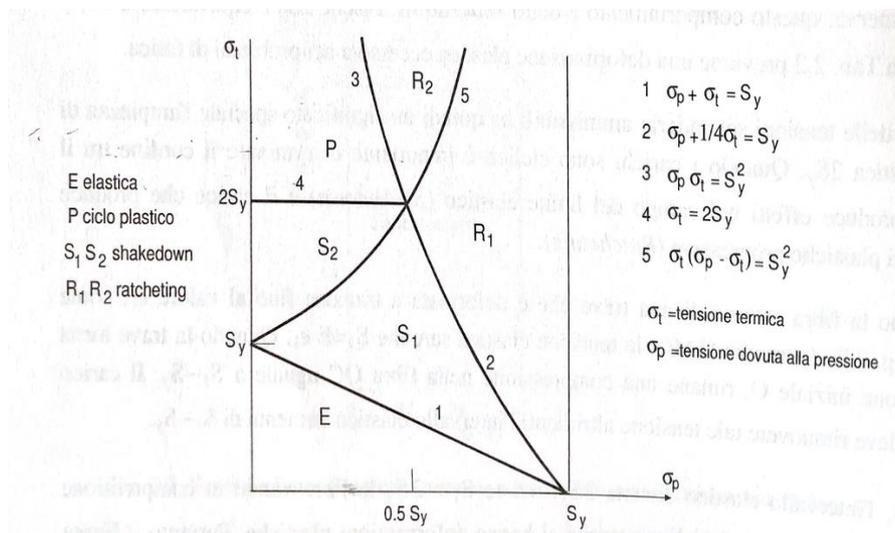


Figura 9 - Il diagramma di Bree

L'analisi di Bree viene condotta su un cilindro soggetto a tensione primaria ed una distribuzione lineare di temperatura nello spessore (tensione flessionale secondaria), che viene applicata e poi rimossa ciclicamente.

Il materiale ha comportamento elastico-perfettamente plastico. Nelle zone R1 ed R2 si ha un incremento di deformazione plastica ad ogni ciclo con una continua crescita del diametro del cilindro. In ordinata troviamo la tensione termica.

Quando la pressione è nulla o minore di  $S_y/2$ , una ampiezza di  $2 S_y$  della tensione termica porta a Shakedown. Se la tensione dovuta alla pressione supera  $S_y/2$ , una ampiezza di  $2 S_y$  della tensione termica porta a *Ratcheting*.

Pertanto, il limite sulla tensione primaria e secondaria,  $P+Q < 3S = 2 S_y$ , non garantisce completamente l'assenza di *Ratcheting*.

## 2.4. CALCOLI A CODICE (DBF)

Nei paragrafi precedenti sono stati illustrati i principi che stanno alla base della valutazione dell'accettabilità di un progetto. Questi ultimi sono solitamente utilizzati per risolvere problemi particolari e dettagli costruttivi non esplicitamente affrontati dal codice.

In questa parte della trattazione facciamo un passo indietro ed esaminiamo i metodi e le regole principali che permettono di dimensionare un componente, seguendo i procedimenti tradizionali suggeriti dalla normativa. Questo metodo di affrontare il progetto è fondamentale e copre in genere la quasi totalità dei calcoli da eseguire punto i dettagli costruttivi di un apparecchio quali il mantello i fondi più le flange più le aperture rinforzate e così via, vengono dimensionati separatamente ed in modo spesso indipendente l'uno dall'altro. Naturalmente, occorre iniziare il calcolo dagli elementi principali del componente che sono in genere i mantelli cilindrici ed i fondi.

I calcoli a codice sono abbastanza semplici da realizzare, ma talvolta laboriosi vista la necessità di eseguirli con un elevato grado di affidabilità, di ripeterli frequentemente e di velocizzare i tempi di elaborazione, vengono in genere predisposti su fogli di calcolo elettronici. Utilizzando questi potenti strumenti di lavoro si riesce infatti a dimensionare l'intero componente in breve tempo una volta preparati e testati i singoli moduli di calcolo relativi alle diverse sezioni della normativa. Si possono inoltre creare ed aggiornare database dei dati dei materiali, in modo da automatizzare la ricerca e l'interpolazione delle tensioni ammissibili specificate dal codice alle temperature di progetto.

L'insieme degli stampati di questi calcoli costituisce il documento che certifica l'adeguatezza delle singole parti del componente alle specifiche richieste dalla normativa. Una volta definiti gli spessori da adottare per le diverse membrature non resta che assemblare correttamente le singole parti, rispettando ancora le prescrizioni ed i suggerimenti forniti dal codice. Questa fase è agevolata dalla stesura dei disegni costruttivi del componente, dove vengono rappresentati in scala oltre alla vista d'insieme, le parti elementari che formano le diverse membrature (lamiere, fucinati, aste, ecc.), i dettagli delle saldature, gli orientamenti delle aperture e tutte le particolarità del componente. Questa operazione è influenzata pesantemente dai metodi ed ai procedimenti di fabbricazione preferiti dal costruttore punto come per gli stampati dei calcoli al codice, anche i disegni fanno parte della documentazione del componente e sono il riferimento più importante per il controllo e la successiva fase costruttiva.

### **3. COMPARAZIONE TRA IL CODICE ASME**

#### **SEZIONE VIII E LA NORMA EN 13445**

##### **3.1. INTRODUZIONE**

In questo capitolo saranno analizzate le principali differenze tecniche, commerciali e di utilizzo tra il codice ASME Sezione VIII (American Society of Mechanical Engineers) per la progettazione e costruzione dei recipienti a pressione e la normativa EN 13445. Questo approfondimento segue quasi totalmente l'analisi comparativa della Commissione Europea, messa a disposizione da ASME, sugli standard in materia di recipienti a pressione e fornisce confronti tecnici tra i requisiti di progettazione del codice, le proprietà dei materiali, la fabbricazione e gli effetti che contribuiscono sul costo complessivo di realizzazione.

Lo scopo è quello di fornire un ampio punto di vista sulle principali differenze e sui fattori da considerare quando si sceglie il codice di progettazione del recipiente più appropriato alle esigenze del produttore.

### **3.2. PROPRIETA' DEL MATERIALE**

Come si può vedere nelle valutazioni dettagliate che seguiranno, uno dei fattori che influenza maggiormente i costi di fabbricazione di un recipiente a pressione è il costo del materiale. Se tutti gli altri fattori di costo hanno pressappoco la stessa incidenza sul costo totale, un recipiente più sottile, che richiede quindi meno materiale, sarà meno costoso di un recipiente più spesso che richiede una quantità superiore di materiale. Naturalmente, il fattore principale nel determinare lo spessore minimo di un recipiente, è la tensione massima ammissibile utilizzata per la progettazione. Pertanto, la filosofia del margine di sollecitazione ammissibile impiegata da ciascuno di questi codici, ha un impatto significativo sul costo finale di un componente a pressione.

Una valutazione base delle sollecitazioni ammissibili utilizzate da entrambi i codici rivela alcune somiglianze, ma anche alcune differenze significative. A scopo di discussione, queste valutazioni riguardano i materiali consentiti al di sotto dell'intervallo di scorrimento e si concentra sui due tipi di materiali che sono comunemente usati nella costruzione di recipienti: acciai ferritici bassolegati al carbonio e acciai inossidabili austenitici.

### 3.2.1 Acciai ferritici bassolegati al carbonio

Per gli acciai ferritici, ciascuno dei codici stabilisce le sollecitazioni ammissibili considerando sia il minimo carico di snervamento che il carico di rottura di un materiale. Nella tabella che segue sono illustrate le sollecitazioni ammissibili basi per ogni codice.

Tabella 11 - Sollecitazioni ammissibili per acciai ferritici

Design Code	Allowable Stress
ASME Section VIII Division 1	Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.5}$ and $\frac{F_{y0.2T}}{1.5}$
ASME Section VIII Division 2	Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.0}$ and $\frac{F_{y0.2T}}{1.5}$
EN 13445	Lesser of $\frac{F_{u68}}{2.4}$ and $\frac{F_{y0.2T}}{1.5}$

$F_{uT}$  = Ultimate Tensile Strength at Design Temperature  
 $F_{y0.2T}$  = 0.2% Offset Yield Strength at Design Temperature  
 $F_{u68}$  = Ultimate Tensile Strength at 68°F (20°C)

Come si può vedere dalla tabella, ciascuno dei codici utilizza un margine di progettazione di 1,5 sul carico di snervamento del materiale. Tuttavia, il margine di progetto sul carico di rottura diventa progressivamente più piccolo per ciascuno dei codici: 3,5 per Divisione 1, 3,0 per Divisione 2 e 2,4 per EN 13445. Questa differenza è generalmente il fattore chiave per spiegare perché le sollecitazioni ammissibili più elevate si trovano nel codice EN, e i più bassi si trovano nella ASME Sezione VIII Divisione 1.

Un altro punto importante in questo confronto è che il codice EN 13445 considera il carico di rottura del materiale a temperatura ambiente (68° F o 20° C), mentre i criteri utilizzati per le sollecitazioni ammissibili in entrambi i codici ASME

considerano il carico di rottura alla temperatura di progetto. Questa differenza può essere significativa per i materiali che hanno carichi di snervamento che rimangono relativamente alti a elevate temperature, come gli acciai al Cr-Mo.

In combinazione con i margini di progettazione più elevati sulla tensione di rottura nei codici ASME, questo approccio può creare una situazione in cui una sollecitazione ammissibile nel codice EN si basa sulla resistenza allo snervamento, mentre il corrispondente consentito in entrambi i codici ASME, alla stessa temperatura, si basa sulla resistenza a rottura. In questi casi i Codici EN basati sulle tensioni di snervamento superano significativamente i valori basati sulla resistenza a rottura di ASME. Tutto questo è possibile vederlo nei diagrammi che seguiranno.

### **3.2.2 Acciai inossidabili austenitici**

Nel determinare le sollecitazioni ammissibili, la EN 13445 separa gli acciai inossidabili austenitici in due gruppi:

- 1) materiali con una proprietà di allungamento a trazione compresa tra il 30% e il 35%;
- 2) materiali con una proprietà di allungamento a trazione superiore al 35%;

Per semplificare questo breve confronto, solo il secondo gruppo di materiali verrà discusso, gruppo che generalmente comprende 300 specie differenti di acciai inossidabili. Per gli acciai austenitici che hanno una proprietà di allungamento a trazione minima superiore al 35%, entrambi i codici stabiliscono le sollecitazioni ammissibili considerando sia il carico minimo di snervamento che il carico di rottura del materiale.

Tuttavia, le relazioni tra queste due proprietà che vengono utilizzate per stabilire le sollecitazioni ammissibili, differiscono in modo significativo dal codice EN al codice ASME. Nella tabella 12 sono raccolte le tensioni ammissibili per entrambi i codici.

Tabella 12 - Sollecitazioni ammissibili per acciai inossidabili austenitici

Design Code	Allowable Stress
ASME Section VIII Division 1	Case 1: Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.5}$ and $\frac{F_{y0.2T}}{1.5}$ Case 2: Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.5}$ and $0.90 \times F_{y0.2T}$
ASME Section VIII Division 2	Case 1: Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.0}$ and $\frac{F_{y0.2T}}{1.5}$ Case 2: Lesser of $\frac{F_{uT}}{3.0}$ and $0.90 \times F_{y0.2T}$
EN 13445	$\max \left\{ \frac{F_{y1.0T}}{1.5}, \min \left[ \frac{F_{y1.0T}}{1.2}, \frac{F_{uT}}{3.0} \right] \right\}$

- $F_{uT}$  = Ultimate Tensile Strength at Design Temperature
- $F_{y0.2T}$  = 0.2% Offset Yield Strength at Design Temperature
- $F_{y1.0T}$  = 1.0% Offset Yield Strength at Design Temperature

Le sollecitazioni maggiori consentite nel caso due per il codice ASME sono raccomandate quando una deformazione leggermente maggiore non è di per sé un problema e non sono raccomandate per la progettazione di flange o altre applicazioni sensibili alle deformazioni.

Ci sono due fattori significativi che nel codice EN 13445 producono sollecitazioni ammissibili più elevate. Primo, i carichi di snervamento utilizzati per stabilire le proprietà del materiale dell'acciaio austenitico si basano su un 1% di compensazione della deformazione. Il codice ASME invece richiede che il test di resistenza allo snervamento dei materiali sia sulla base di una compensazione dello 0,2 %.

Il secondo fattore significativo, che contribuisce alle maggiori sollecitazioni ammissibili nel codice EN, è la base di confronto tra lo snervamento e la rottura che viene utilizzata per determinare le sollecitazioni ammissibili.

La tabella mostra che le sollecitazioni ammissibili per l'EN 13445 sono una funzione del maggiore di due valori, mentre nel codice ASME è sempre il minore di due valori. Questo, combinato con il fatto che il valore del carico di snervamento del materiale è sempre maggiore data la filosofia del codice EN, le sollecitazioni ammissibili per gli acciai austenitici per quest'ultima, dunque, saranno in genere superiori a quelli specificati da ASME.

L'eccezione a questa generale osservazione è per le applicazioni in cui le deformazioni leggermente superiori non sono dannose per la progettazione dell'attrezzatura (in riferimento ai criteri del caso due della tabella).

### **3.3. REGOLE DI PROGETTAZIONE**

I codici ASME Sezione VIII (ASME) e EN 13445 (EN) hanno requisiti simili per le regole di progettazione basate su equazioni che sembrano essere identiche per entrambi.

Come accennato nel capitolo 1, l'EN è un codice combinato che include il design by formula (DBF) e il design by analysis (DBA). Il vantaggio di questo approccio è una maggiore coerenza dei requisiti di progettazione. Le regole di progettazione per analisi forniscono due opzioni nel codice EN. Il primo è la categorizzazione della tensione compresa la linearizzazione, similmente ai metodi attuali forniti nella

sezione VIII Divisione 2. Tuttavia, il codice EN conta di una seconda opzione chiamata “Direct Rute” che prevede un metodo più in sintonia con i risultati degli elementi finiti.

La principale differenza tra il metodo DBF per il codice ASME e quello EN, sono i requisiti e le limitazioni aggiuntive associati all'ispezione non distruttiva della saldatura. Il codice EN ordina le apparecchiature in base ai “Gruppi di Prova” che definiscono le NDE (Non-Destructive-Evaluation) richieste e altre limitazioni. L'efficienza del giunto ASME invece è legata solo ai requisiti radiografici.

Per entrambi non è immediato capire quali combinazioni di efficienza del giunto, NDE e materiale portino effettivamente a progetti più convenienti. Tuttavia, i codici ASME sono più diretti.

La Divisione 1 dell'ASME permette un'efficienza 1.0, 0.85 e 0.7. I progetti con efficienza di giunzione minore richiedono meno esami, ma i recipienti risultano più spessi. La Divisione 2 permette invece solo un'efficienza dei giunti di 1.0 e richiede quindi il 100% di NDE delle saldature. Facendo un esempio, se si sceglie di progettare con un coefficiente di efficienza dei giunti di saldatura pari a 0.7 con il codice ASME, il codice EN limiterebbe i materiali, lo spessore e la temperatura di progetto. Inoltre, i recipienti progettati con il codice EN non sono generalmente destinati al funzionamento ciclico.

L'impatto diretto sul costo non è stato ancora stimato, ma le limitazioni e i requisiti aggiuntivi per il codice EN potrebbero avere un impatto sui costi soprattutto nelle industrie alimentari e farmaceutiche, dove sono progettati i recipienti utilizzando una bassa efficienza dei giunti e sono tipicamente in servizio ciclico.

Attualmente, il codice EN non fornisce regole per le temperature di funzionamento nell'intervallo di creep, ma le regole sono in via di sviluppo. La Divisione 1 del codice ASME, tuttavia, fornisce sollecitazioni ammissibili a temperature elevate ben al di sopra dell'inizio dell'intervallo di creep.

### **3.4. STRUTTURA FUNZIONALE DEI COSTI**

Uno dei principali fattori da considerare quando si sceglie il codice più appropriato per la realizzazione di un recipiente a pressione è l'impatto complessivo sui costi che tale decisione comporta. Naturalmente, uno dei maggiori contributi di tale impatto saranno i costi iniziali di acquisto per la realizzazione del recipiente.

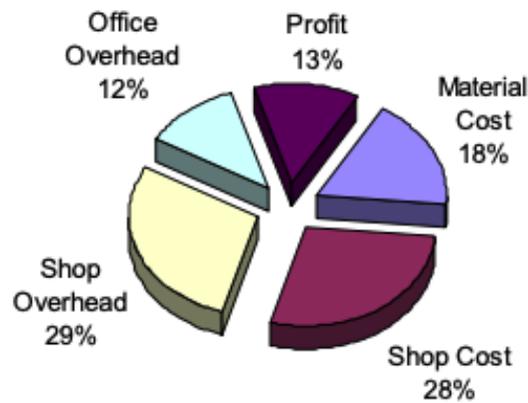
Nelle figure che seguono si può apprezzare la ripartizione percentuale dei principali fattori di costo associati all'acquisto di nuovi recipienti a pressione ordinati per comune gruppo di recipiente. I costi di acquisto includono quelli di saldatura, test, NDE, attrezzatura per la movimentazione ecc., mentre i costi del materiale includono lamiere, pezzi fucinati, formatura, trattamento termico ecc.

I fattori di costo considerati come percentuale del prezzo di vendita complessivo sono i seguenti:

- Costo del materiale: è il costo di tutto il materiale per la fabbricazione;
- Costo del lavoro: è il costo del lavoro artigianale e del lavoro non artigianale;

- Costi di acquisto: sono i costi sostenuti per l'acquisto di attrezzature (rulli, saldatrici, rettifica, la gru, il carrello elevatore ecc), i materiali di consumo, le utenze, gli ispettori, NDE ecc;
- Costo generale di ufficio: sono i costi sostenuti per i fornitori, i progettisti, gli ingegneri, l'amministrazione e le attrezzature utilizzate da queste persone;
- Il profitto: è una percentuale media dei margini di profitto del settore specifico;

Nelle immagini che seguono sono confrontate diverse strutture di costo a seconda del materiale di realizzazione coinvolto.



**Figura 10 - Overall Cost Drivers for a Medium Carbon Steel Vertical Drum**



Figura 11 - Overall Cost Drivers for a Large Carbon Steel Vertical Drum

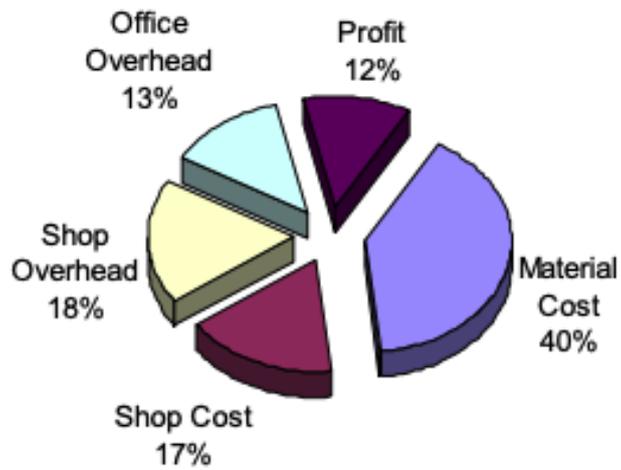


Figura 12 - Overall Cost Drivers for a High Pressure Carbon Steel Horizontal Drum

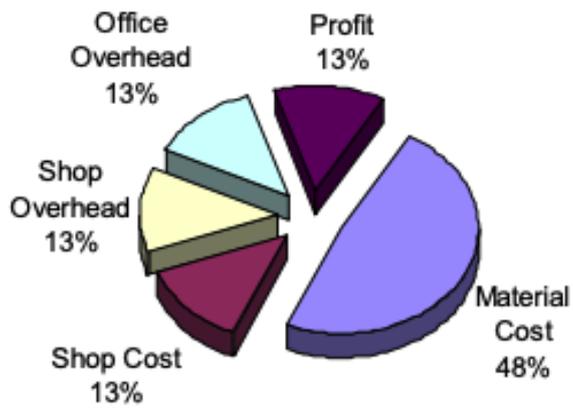


Figura 13 - Overall Cost Drivers for a Trayed Carbon Steel Column with Stainless Steel Cladding

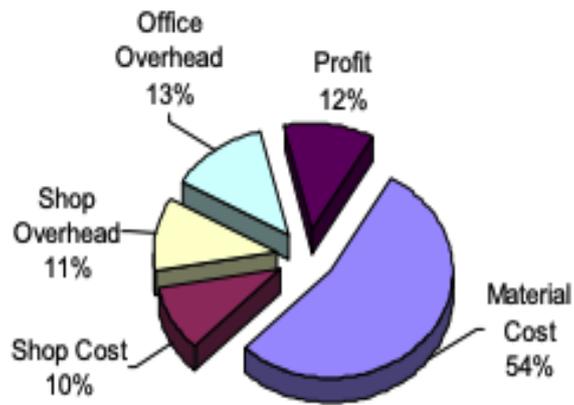


Figura 14 - Overall Cost Drivers for a 1 1/4 Cr - 1/2 Mo Steel Reactor



**Figura 15 - Overall Cost Drivers for 2 1/4 Cr - 1 Mo and 2 1/4Cr - 1 Mo - 1/4V Steel Reactors**

Come si può vedere dai grafici, poiché il materiale viene aggiornato, dall'acciaio al carbonio, al cromo molibdeno o all'acciaio inossidabile, la quota del costo del materiale continua ad aumentare progressivamente. È facile dunque intuire che può esserci un notevole vantaggio economico se la quantità di materiale può essere ottimizzata e ridotta.

Si può anche vedere che gli altri fattori di costo, come costi d'acquisto, costi d'ufficio e margini di profitto, non variano molto in funzione del materiale utilizzato. Inoltre, dai risultati del confronto tra i vari codici e dall'indagine di ricerca del settore non è emerso che i costi non materiali fornissero cambiamenti significativi sul costo complessivo dei recipienti a seconda del codice scelto per la realizzazione di un recipiente a pressione.

Pertanto, il principale fattore di differenziazione per i costi di un nuovo recipiente a pressione sarà il costo associato alla quantità del materiale utilizzato. Poiché,

questo costo varierà tra i diversi tipi di recipienti a pressione e a seconda del codice di progettazione scelto, è fondamentale che anche i costi siano rivisti in fase di progetto per avere una visione chiara e scegliere correttamente il codice.

### **3.5. INDAGINE DI MERCATO**

Per diversi codici di progettazione è stata condotta un'indagine sui fattori chiave discussi precedentemente. L'indagine ha interessato proprietari/utenti, fornitori dei materiali e fabbricanti di tutto il mondo e i risultati sono stati ottenuti coinvolgendo 8 paesi diversi, inclusi 3 membri della commissione Europea.

Come è possibile visionare dalla tabella seguente, il codice ASME Sezione VIII è il codice maggiormente utilizzato. Esso fornisce un buon vantaggio economico soprattutto per i recipienti complessi/costosi e secondo lo studio dovrebbe essere il codice preferito dai progettisti anche per il futuro.

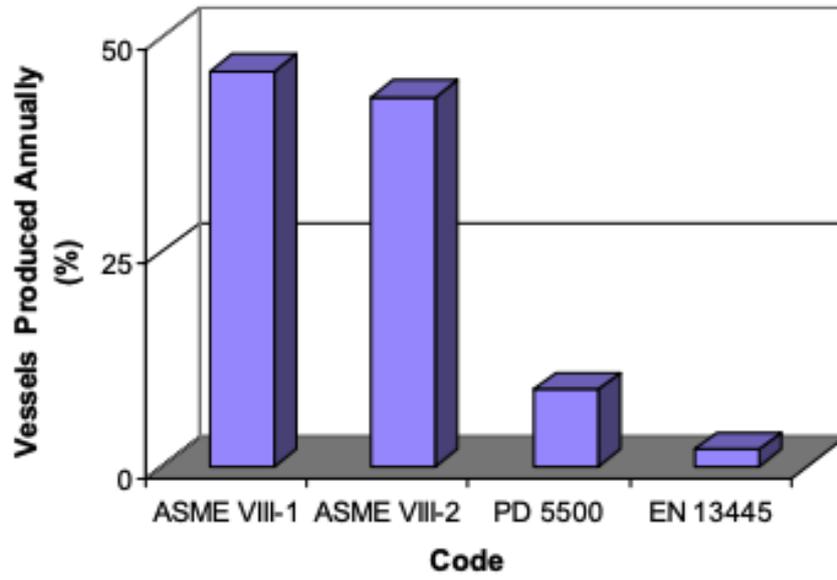


Figura 16 - Quantità di recipienti prodotti annualmente

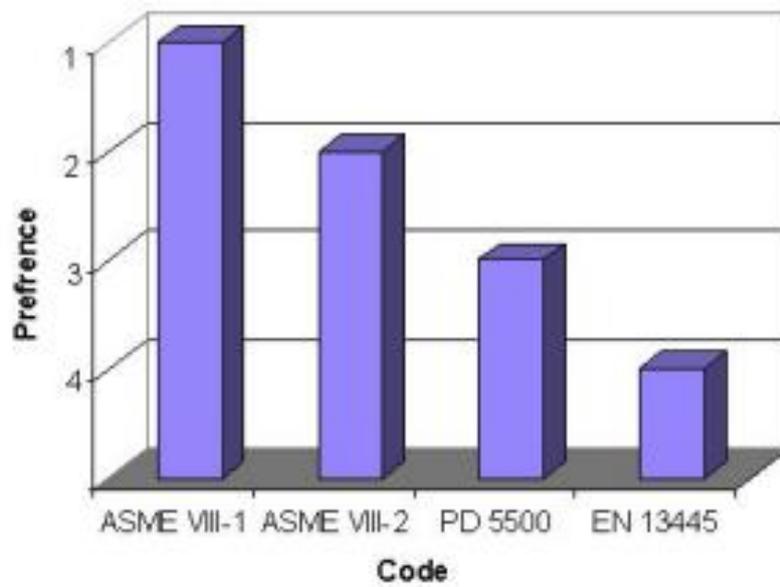


Figura 17 - Preferenze

Come si può vedere dal grafico precedente, il sondaggio ha confermato che in tutto il settore globale c'è una forte preferenza per l'uso dei codici ASME per la progettazione e la fabbricazione dei recipienti a pressione. Anche se in alcuni casi il PD5500 o l'EN 13445 può avere alcune aree o casi specifici in cui c'è un piccolo vantaggio economico, quando si considerano tutti gli aspetti generali dell'intera organizzazione, impianto o costo del progetto, il codice ASME sembra fornire un vantaggio complessivo migliore.

Il principale vantaggio in termini di costo risiede nella sollecitazione massima ammissibile che può essere utilizzata, chiaramente per i progetti dove i carichi sono di pressione e non del vento o sismici.

Infine, la sensazione dei partecipanti al sondaggio è che ASME si sta occupando delle aree in cui risultano ancora leggermente inferiori le sollecitazioni ammissibili e che continuerà ad essere il codice di riferimento per la realizzazione dei recipienti a pressione.

## **4. ESEMPI DI CALCOLI A CODICE E CONFRONTO TRA LE NORMATIVE**

In questo capitolo vengono illustrate le formule per il calcolo delle membrature principali di un componente, quali le parti cilindriche e quelle sferiche. Saranno utilizzati entrambi i codici di calcolo, ASME e EN 13445, al fine di ottenere dei semplici esempi numerici di confronto.

Nel progetto di dimensionamento del recipiente in pressione vanno considerate le condizioni di carico più comuni:

1. Pressione interna ed esterna, peso proprio, azioni trasmesse dal peso di eventuali equipaggiamenti: macchine, componenti interne, azioni trasmesse dal moto del recipiente
2. Supporti, azioni cicliche e dinamiche prodotte da variazioni di pressione e temperatura, vento, neve ecc.
3. Azioni impulsive, come quelle dovute al “colpo d’ariete” (è un fenomeno idraulico che si presenta in una condotta quando un flusso di liquido in movimento al suo interno viene bruscamente fermato dalla repentina chiusura di una valvola oppure quando una condotta chiusa e in pressione viene aperta repentinamente)
4. Gradienti di temperatura ed espansione termica differenziale, prova di pressurizzazione
5. È comunque responsabilità del produttore individuare tutte le azioni che è possibile ritenere agiranno durante la vita operativa, che possono risultare

rilevanti ai fini della sicurezza, incluse quelle derivanti da eventuali usi erronei ragionevolmente prevedibili dall'attrezzatura stessa.

Molto spesso il componente in pressione include delle giunzioni saldate, la cui presenza tende a ridurre i valori di tensione ammissibile del componente stesso tramite un coefficiente detto "efficienza" della saldatura. L'efficienza della saldatura di pende, in generale, dai seguenti fattori: tipologia di saldatura (di testa, d'angolo etc.), controlli NDE o NDT, spessori dei pezzi saldati, temperature di esercizio, tipologia del materiale di base.

Le condizioni di funzionamento determinano il coefficiente di sicurezza da adottare e possono indurre variazioni nel calcolo strutturale.

## 4.1. NOMENCLATURA

Vengono qui presentate le indicazioni principali, per i calcoli di resistenza alla pressione ed alla temperatura e valide per gli acciai delle normative prese a riferimento alle quali si rimanda per un quadro più generale. Nel capitolo precedente sono state riportate le sollecitazioni ammissibili a seconda del tipo di acciaio e del tipo di codice scelto. Dato che, a seconda della normativa, le simbologie possono differire, viene fatto di seguito uno specchietto riassuntivo per rendere più comprensibile il testo. Le caratteristiche di resistenza dei materiali cui nel seguito si fa riferimento sono:

- $R_m$  sollecitazione di rottura a trazione a temperatura ambiente

- $R_{p(0,2)}$  sollecitazione di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% a temperatura ambiente
- $R_{p(0,2)/t}$  sollecitazione di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% alla temperatura  $t$
- $R_s$  carico di snervamento a temperatura ambiente
- $R_{p(1)}$  sollecitazione di scostamento dalla proporzionalità dell'1% a temperatura ambiente
- $R_{p(1)/t}$  sollecitazione di scostamento dalla proporzionalità dell'1% a temperatura  $t$
- $\sigma_{R/100000t}$  carico di rottura dopo 100000 ore alla temperatura  $t$
- $\sigma_{R/200000t}$  carico di rottura dopo 200000 ore alla temperatura  $t$
- $f$  sollecitazione massima ammissibile nelle condizioni di progetto
- $fi$  sollecitazione massima ammissibile nelle condizioni di prova idraulica

Tutte le grandezze sono espresse in N/mm<sup>2</sup>.

## 4.2. CODICI DI CALCOLO

### 4.2.1 Corpi cilindrici soggetti a pressione interna

#### EN 13445

Lo spessore minimo di calcolo  $S_0$  (mm) è dato da:

$$S_0 = \frac{pD_e}{2fz+p} \quad \text{oppure} \quad S_0 = \frac{pD_i}{2fz-p}$$

Con  $p$  (MPa) pressione,  $D_e$  diametro esterno (mm),  $D_i$  diametro interno (mm),  $z$  modulo di efficienza in corrispondenza di saldatura o di linea di foratura,  $f$  (N/mm<sup>2</sup>) sollecitazione ammissibile.

#### ASME VIII Div. 1

Lo spessore minimo richiesto,  $S_0$  (mm), con riferimento ai raggi esterno  $R_e$  (mm) ed interno  $R_i$  (mm) è dato da (dove  $f$  è calcolato secondo quanto visto nei capitoli precedenti in riferimento alle sollecitazioni per le singole divisioni asme)

$$S_0 = \frac{pR_e}{fz+0,4p} \quad \text{oppure} \quad S_0 = \frac{pR_i}{fz-0,6p}$$

Salvo che lo spessore sia maggiore di  $R/2$  o  $p$  sia maggiore di  $0,385fz$ , nel quale caso si ha:

$$S_0 = R_e \frac{\left(y^{\frac{1}{2}} - 1\right)}{Y^{\frac{1}{3}}} \quad \text{o} \quad S_0 = (fz + p)/(fz - p)$$

## ASME VIII Div. 2

Le regole proposte dalla divisione 2 sono basate su considerazioni più approfondite delle tensioni e comunque tendono a sfruttare maggiormente le risorse del materiale. Anche la divisione 2 tiene conto dell'efficienza dei giunti saldati f. Possiamo calcolare in funzione del diametro D corrosivo:

$$t = \frac{D}{2} \left( e^{\frac{p}{fz}} - 1 \right)$$

### 4.2.2 Fondi curvi

I fondi normalmente utilizzati per i recipienti a pressione hanno forma torosfeica, ellittica od emisferica. I fondi torosfeici ed ellittici hanno normalmente un colletto cilindrico.

È da notare che le indicazioni per i fondi emisferici sono estendibili anche al caso che il semi-angolo del fondo sia minore o uguale di 90°, quest'ultima soluzione è frequentemente prevista nel caso di attacco di fondi a corpi cilindrici, nel qual caso lo spessore del corpo cilindrico, se superiore a quello del fondo, deve essere rastremato. Indipendentemente dal valore del semi-angolo del fondo che può essere minore o uguale di 90°, lo spessore del cilindro sino alla linea di tangenza dovrà essere inferiore a quello risultante nella formula vista in precedenza.

## EN 13445

Per i fondi emisferici lo spessore minimo richiesto è dato da:

$$S_0 = \frac{pD_i}{4fz - p}$$

dove  $z$  è il modulo di efficienza della saldatura e include anche la giunzione al corpo cilindrico. Per le parti torosferiche ed ellittiche le formule richiedono qualche considerazione in più e prevedono anche il calcolo del colletto cilindrico in determinate condizioni. Per questo motivo saranno trascurate da questa trattazione, ma si rimanda alle normative per approfondimenti.

### ASME VIII Div. 1

Nel caso di fondi ellittici aventi il rapporto  $s/R > 0,002$  lo spessore minimo richiesto è dato da:

$$S_0 = \frac{pD_i K}{2fz - 0,2p}$$

Dove  $K$  vale:

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( 0,5 \frac{D_i}{h_i} \right)^2 \right]$$

Un fondo può essere approssimato ad uno ellittico se  $r = 0,17D_i$  e  $R = 0,9D_i$ .

Nel caso di fondi emisferici lo spessore minimo richiesto è dato da:

$$S_0 = \frac{pR}{2fz - 0,2p}$$

Nel caso si abbia  $s > 0,356R$  o  $p > 0,665fz$  lo spessore richiesto è dato dalla:

$$S_0 = R \left( y^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \text{ o } S_0 = Re \left( y^{\frac{1}{3}} - 1 \right) / y^{\frac{1}{3}}$$

Con:

$$y = \frac{2(fz + p)}{2fz - p}$$

### 4.2.3 Fogli di calcolo

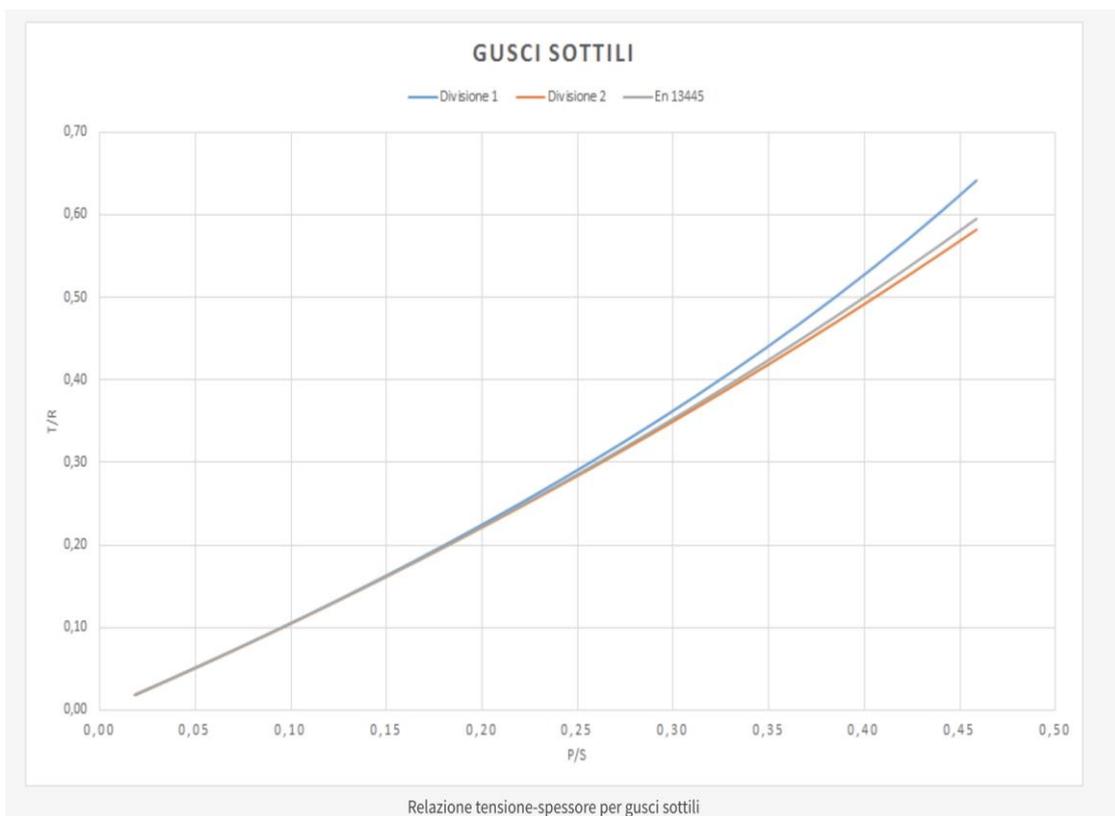
I progettisti si servono di fogli di calcolo per predisporre la sequenza di calcoli in modo ordinato. Il metodo è comodo e vantaggioso e permette di modificare continuamente alcuni parametri di progetto, alla ricerca del risultato più congeniale, senza ripetere tutti i calcoli.

I fogli di calcolo possono essere personalizzati secondo le proprie esigenze, ma nel complesso una volta testati e convalidati devono seguire alcune linee guida essenziali:

- Facilità d'uso, protezione per il controllo e la revisione
- Parametri d'ingresso indicati in modo semplice e chiaro. Ad esempio, vengono di solito evidenziati in colore, i dati delle celle che devono essere inseriti di volta in volta
- Controlli automatici. Dove è possibile inserire formule di controllo per la verifica dell'accettabilità dei parametri e l'adeguatezza dello schema di calcolo.
- Versatilità di memorizzazione e di stampa, per la stesura dei documenti.

Per non appesantire la trattazione i fogli di calcolo saranno inseriti in appendice. Risulta intuitivo come le celle in grigio siano quelle riferite alle grandezze da inserire dal progettista come dati di progetto, in blu alcuni dati derivati da semplici formule e in arancio i risultati. Il medesimo schema è stato, nelle stesse condizioni di progetto, per la Div 1, Div 2 e per il codice EN. Come previsto a parità di materiale e condizioni di lavoro dalla divisione 1 alla 2 e poi alla EN sono consentite sollecitazioni maggiori, naturalmente spessori ridotti e meno acquisto di materiale

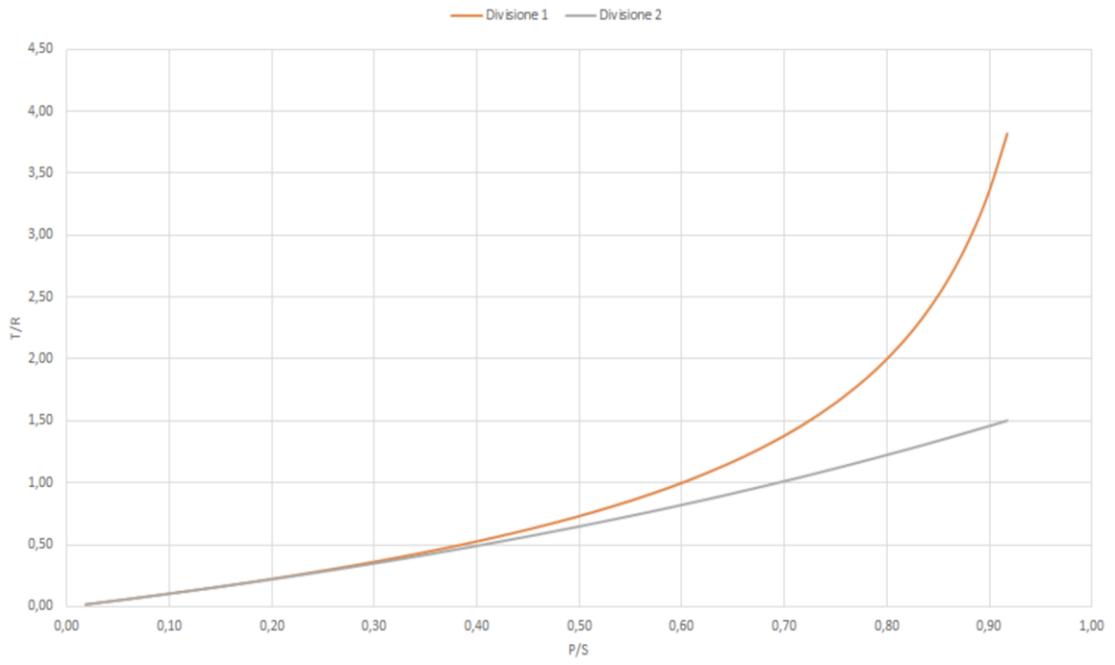
(fattore di costo maggiormente determinante). Tuttavia, come esempio, è stato considerato 1 per tutti il fattore di efficienza della saldatura, ma sappiamo che nella realtà questo non è possibile, specie per la EN dove i materiali sono suddivisi in gruppi di prova e quindi la ridotta efficienza di saldatura, dovuta a delle regole più restrittive per questa normativa, cambia notevolmente i risultati. Come si può vedere dal grafico che segue, per i gusci sottili, i tre codici di calcolo producono risultati differenti in funzione della tensione scelta, supposti pressione e raggio costanti. Più si riduce la tensione ammissibile più gli spessori tendono ad essere importanti per la divisione 1.



Differenza che risulta più evidente del caso di cilindri spessi, ovvero con  $t > 0,47R$ .

Per completezza i calcoli sono stati effettuati anche per i gusci sferici, senza riscontrare differenze rispetto al calcolo dei mantelli cilindrici.

### GUSCI SPESSI



## 5. CONCLUSIONI

Nel capitolo 4 si è effettuato il confronto tra le normative maggiormente utilizzate in materia di recipienti a pressione, prendendo spunto da uno studio condotto dalla commissione Europea e riportato sullo stesso sito della ASME. Lo studio in questione è una revisione più approfondita di una precedente analisi che indicava la normativa EN 13445 come regola generale per la progettazione e realizzazione dei recipienti a pressione. Tale conclusione avveniva sulla base di ragioni economiche prevalentemente legate alla possibilità di realizzare componenti più sottili e quindi utilizzando meno materiale. La nuova versione di tale confronto ha messo in evidenza problematiche che rendono fortemente discutibili queste conclusioni.

Come visto i codici ASME hanno una serie di caratteristiche vantaggiose che li rendono altamente competitivi. Come notato nell'analisi economica, la maggior parte della spesa per i recipienti a pressione nella costruzione degli impianti è concentrata in un piccolo numero di recipienti a parete spessa e che lavorano ad elevate pressioni. Per questi casi il codice ASME consente l'utilizzo delle regole di progettazione della Divisione 3 con conseguenti pareti più sottili e pesi più leggeri dei recipienti, sebbene tale divisione sia generalmente destinata ai recipienti a pressione superiori a 10 ksi può essere utilizzata anche per pressioni di progetto inferiori.

Alcune regole, presenti nell'ASME Sezione VIII Divisione 1, consentono sollecitazioni che si basano sulle proprietà dipendenti dal tempo e quindi

permettono la progettazione a temperature nelle quali i materiali si trovano nella zona di scorrimento, quindi, a temperature di esercizio più elevate. Sforzi ammissibili più elevati, nei materiali forgiati e usati per la realizzazione di recipienti a parete spessa, si traduce in pareti più sottili e pesi ridotti. Altro fattore emerso durante la fase di studio dei codici è l'incidenza dell'efficienza della saldatura sui calcoli degli spessori minimi di progetto. Come visto, i requisiti per la EN sono molto più restrittivi dato che i materiali sono suddivisi in gruppi di test e ciò, molto spesso, può portare a degli spessori di progetto maggiori. Tutti questi fattori, combinati, forniscono significativi risparmi economici nella costruzione di recipienti di fascia alta come i reattori conformi ai codici ASME.

## APPENDICE

MANTELLO CILINDRICO			
Codice di progettazione	ASME DIV 1		
Materiale	SA 336 Gr. F22 - Ferroso		
Tabella	Appendice A, Tabella 1A;AME		
Dati	simbolo	valore	unità
Temperatura	T	455	°C
Tensione ammissibile	S	138	N/mm2
Tensione ammissibile a temperatura ambiente	ST		N/mm2
Densità del materiale	pho	7725	kg/m3
Efficienza della saldatura	z	1	
Pressione interna	Pi	10,82	N/mm2
Densità del liquido	rho	900	kg/m3
Altezza del liquido	h	7,4	m
Diametro interno	Di	4892	mm
Lunghezza cilindro	L	8	m
Altezza idrostatica	Ph	0,065	N/mm2
Pressione totale	Pt	11	N/mm2
corrosione interna C1	C1	0	mm
corrosione esterna C2	C2	0	mm
tolleranza C3	C3	0	mm
Diametro interno corrosivo	Di	4892	mm
Diametro esterno corrosivo	D0	5302	mm
risultati			
spessore minimo	S0	201,248	mm
sovrametallo	S0	205	mm
Raggio interno	Ri	2,4	m
Raggio esterno	Re	2,7	m
Volume mantello	V	26,25	m3
Massa mantello	M	202,8	ton

MANTELLO CILINDRICO			
Codice di progettazione	ASME DIV 2		
Materiale	SA 336 Gr. F22 - Ferroso		
Tabella	Appendice A, Tabella 5A, ASME		
Dati	simbolo	valore	unità
Temperatura	T	455	°C
Tensione ammissibile	S	150,9	N/mm <sup>2</sup>
Tensione ammissibile a temperatura ambiente	ST		N/mm <sup>2</sup>
Densità del materiale	pho	7725	kg/m <sup>3</sup>
Efficienza della saldatura	z	1	
Pressione interna	Pi	10,82	N/mm <sup>2</sup>
Densità del liquido	rho	900	kg/m <sup>3</sup>
Altezza del liquido	h	7,4	m
Diametro interno	Di	4892	mm
Lunghezza cilindro	L	8	m
Altezza idrostatica.	Ph	0,065	N/mm <sup>2</sup>
Pressione totale	Pt	10,89	N/mm <sup>2</sup>
corrosione interna C1	C1	0	mm
corrosione esterna C2	C2	0	mm
tolleranza C3	C3	0	mm
Diametro interno corrosivo	Di	4892	mm
Diametro esterno corrosivo	D0	5262	mm
risultati			
spessore minimo	S0	181,827	mm
sovrametallo	S0	185	mm
Raggio interno	Ri	2,4	m
Raggio esterno	Re	2,6	m
Volune mantello	V	23,59	m <sup>3</sup>
Massa mantello	M	182,3	ton

MANTELLO CILINDRICO			
Codice di progettazione	EN 13 445		
Materiale	SA 336 Gr. F22 - Ferroso		
Tabella	Appendice A, EN CODE		
Dati	simbolo	valore	unità
Temperatura	T	455	°C
Tensione ammissibile	S	214,6	N/mm <sup>2</sup>
Tensione ammissibile a temperatura ambiente	ST		N/mm <sup>2</sup>
Densità del materiale	pho	7725	kg/m <sup>3</sup>
Efficienza della saldatura	z	1	
Pressione interna	Pi	10,82	N/mm <sup>2</sup>
Densità del liquido	rho	900	kg/m <sup>3</sup>
Altezza del liquido	h	7,4	m
Diametro interno	Di	4892	mm
Lunghezza cilindro	L	8	m
Altezza idrostatica	Ph	0,065	N/mm <sup>2</sup>
Pressione totale	Pt	11	N/mm <sup>2</sup>
corrosione interna C1	C1	0	mm
corrosione esterna C2	C2	0	mm
tolleranza C3	C3	0	mm
Diametro interno corrosivo	Di	4892	mm
Diametro esterno corrosivo	D0	5153	mm
risultati			
spessore minimo	S0	126,525	mm
sovrametallo	S0	130,525	mm
Raggio interno	Ri	2,4	m
Raggio esterno	Re	2,6	m
Volume mantello	V	16,47	m <sup>3</sup>
Massa mantello	M	127,2	ton



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Schema semplificato del funzionamento di un reattore per centrale nucleare di tipo BWR .....	2
Figura 2 - Schematizzazione delle tensioni che agiscono su un recipiente multistrato .....	5
Figura 3 - Disegno d'insieme di un componente ad asse verticale.....	23
Figura 4 - Tensione equivalente di Tresca in un bocchello su un fondo emisferico .....	27
Figura 5 - Trazione in una barra.....	41
Figura 6 - Flessione in una trave .....	42
Figura 7 - Shakedown ad azione elastica.....	43
Figura 8 - Ciclo della deformazione oltre lo snervamento del materiale .....	45
Figura 9 - Il diagramma di Bree.....	45
Figura 10 - Overall Cost Drivers for a Medium Carbon Steel Vertical Drum .....	57
Figura 11 - Overall Cost Drivers for a Large Carbon Steel Vertical Drum .....	58
Figura 12 - Overall Cost Drivers for a High Pressure Carbon Steel Horizontal Drum .....	58
Figura 13 - Overall Cost Drivers for a Trayed Carbon Steel Column with Stainless Steel Cladding .....	59
Figura 14 - Overall Cost Drivers for a 1 1/4 Cr - 1/2 Mo Steel Reactor.....	59

Figura 15 - Overall Cost Drivers for 2 1/4C Cr - 1 Mo and 2 1/4Cr - 1 Mo - 1/4V Steel Reactors.....	60
Figura 16 - Quantità di recipienti prodotti annualmente .....	62
Figura 17 - Preferenze .....	62

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Classificazione in categorie dei recipienti a pressione .....	11
Tabella 2 - Classificazione in categorie delle tubazioni a pressione.....	11
Tabella 3 - Categorie e Moduli .....	12
Tabella 4 - Procedure di valutazione della conformità (A) .....	13
Tabella 5 - Procedure di valutazione della conformità (B).....	14
Tabella 6 - Procedure di valutazione della conformità (C).....	15
Tabella 7 - Sezioni di alcune Normative che trattano l'argomento della Stress Analysis .....	29
Tabella 8 - Classificazione delle tensioni .....	37
Tabella 9 - Criteri di verifica per le componenti di tensione e delle loro combinazioni.....	38
Tabella 10 - Combinazione dei carichi per il progetto.....	39
Tabella 11 - Sollecitazioni ammissibili per acciai ferritici.....	51
Tabella 12 - Sollecitazioni ammissibili per acciai inossidabili austenitici.....	53

## **BIBLIOGRAFIA**

I recipienti in pressione, Francesco Cesari, 2012, Bologna, Pitagora ED.

The American Society of Mechanical Engineers, Boiler Pressure Vessel Code

Calcolo matriciale delle strutture, Francesco Cesari, 1997, Bologna, Pitagora ED.

Manuale dell'ingegnere meccanico, Pierangelo Andreini, Milano, Hoepli.

Rivista scientifica Designe Approval

Decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93 (PED), Armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di attrezzature a pressione.

Decreto Ministeriale n° 329 del 01/12/2004, Regolamento recante norme per la messa in servizio ed utilizzazione delle attrezzature a pressione e degli insiemi di cui all'articolo 19 del decreto legislativo 25 febbraio 2000, n. 93.

Circolare ISPESL prot. A00-09 / 0005411 / 08, Procedura Ispesl per la denuncia e la valutazione e di recipienti per liquidi e tubazioni già esistenti alla data del 12/2/2005 e comunque commercializzati fino al 29/5/02 e non certificati PED, in accordo all'art. 16 del D.M. 329/04.

D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81, Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro.

D.M. 11 aprile 2011, Disciplina delle modalità di effettuazione delle verifiche periodiche di cui all'allegato VII del decreto legislativo D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81