



# **Progettazione Meccanica CAD/CAE Integrata**

A.A. 2024/2025

## **DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DI RECIPIENTI IN PRESSIONE**

### **ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL**

**Ph.D. Eng. Domenico Marzullo**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

**Dipartimento di Ingegneria e Architettura  
Università degli Studi di Trieste**

## Principali normative

- ASME Boiler and Pressure Vessel (ASME VIII)
  - Div. 1 - Approccio DBF
  - Div. 2 - Approccio DBF+DBA
- EN 13445 - Approccio DBF+DBA





# Boiler and pressure vessel



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.

- *Categoria I*: nella quale ricadono le apparecchiature meno pericolose, è prevista la certificazione CE in base ad «autocertificazione» del fabbricante.
- *Categoria II*: è obbligatoria la certificazione CE tramite un organismo notificato, che senza entrare nel merito della progettazione, provvede ad effettuare la sorveglianza della produzione, nelle modalità scelte dal fabbricante;
- *Categoria III*: è obbligatoria la certificazione CE tramite un organismo notificato. Qualora il fabbricante non avesse certificato anche il suo sistema qualità, inclusa la progettazione, è prevista anche l'esecuzione di prove approfondite sul prototipo da certificare CE;
- *Categoria IV*: si richiede il massimo livello di controllo della progettazione e della produzione.



## Approccio al progetto

- **Design by Formulas (DBF)** : il dimensionamento e la verifica del recipiente sono basati su relazioni pre-confezionate (formulas) 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, salvo i casi in cui i modelli analitici semplici. Fidando sulla maggiore accuratezza dell'analisi, i coefficienti di sicurezza impiegati tendono ad essere più bassi.

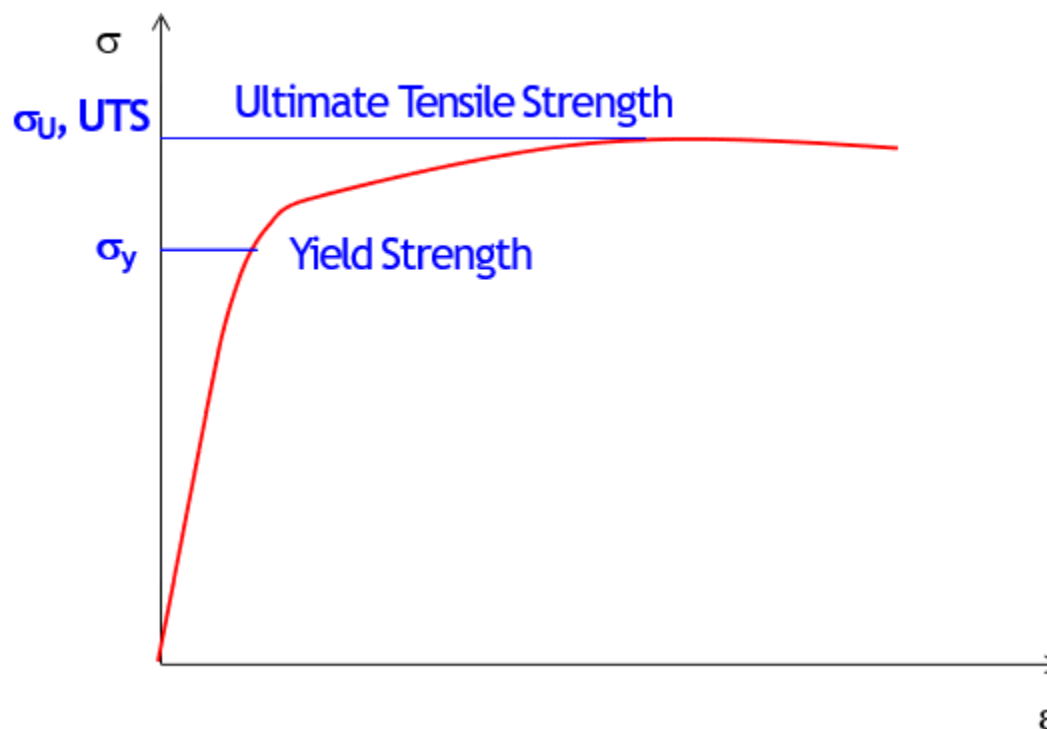


# Boiler and pressure vessel



Le norme definiscono innanzitutto i criteri per la determinazione delle tensioni ammissibili

Le tensioni ammissibili sono in genere definite a partire dalla proprietà di base a trazione del materiale:





# Boiler and pressure vessel



*Le norme definiscono innanzitutto i criteri per la determinazione delle tensioni ammissibili*

Le tensioni ammissibili sono in genere definite a partire dalla proprietà di base a trazione del materiale:

$$\text{ASME VIII – Div.1 (DBF)} \quad S = \min\left(\frac{UTS}{3.5}, \frac{\sigma_y}{1.5}\right)$$

$$\text{ASME VIII – Div.2 (DBF+DBA)} \quad S_m = \min\left(\frac{UTS}{2.4}, \frac{\sigma_y}{1.5}\right)$$

$$\text{EN 13445 (DBF)} \quad f_d = \min\left(\frac{UTS}{2.4}, \frac{\sigma_y}{1.5}\right)$$

$$\text{EN 13445 (DBA)} \quad f_d = \min\left(\frac{UTS}{1.875}, \frac{\sigma_y}{1.5}\right)$$



# Boiler and pressure vessel



Le proprietà meccaniche dei materiali contemplati dalle normative sono dati in funzione della temperatura

Acciaio SA-182 Grade F12 (1 Cr 1/2 Mo)

| T [°C]<br>[°C] | Yield<br>[MPa] | UTS<br>[MPa] |
|----------------|----------------|--------------|
| 20             | 221            | 414          |
| 65             | 207            | 410          |
| 100            | 198            | 405          |
| 125            | 192            | 402          |
| 150            | 187            | 398          |
| 200            | 180            | 398          |
| 250            | 174            | 398          |
| 300            | 170            | 398          |
| 325            | 167            | 398          |
| 350            | 165            | 398          |
| 375            | 163            | 398          |
| 400            | 161            | 398          |
| 425            | 158            | 398          |
| 450            | 155            | 398          |
| 475            | 151            | 391          |
| 500            | 147            | 375          |
| 525            | 142            | 355          |



## Le norme definiscono le condizioni di carico da considerare per la verifica dei recipienti

Le condizioni di carico più comuni da considerare includono:

- **pressione interna ed esterna**
- **peso proprio**
- **azioni trasmesse dal peso di eventuali equipaggiamenti**
- **azioni trasmesse da:**
  - componenti interne (internals)
  - supporti
- **azioni cicliche e dinamiche prodotte da variazioni di pressione e temperatura**
- **vento, neve, sisma**
- **azioni impulsive, come quelle dovute al "colpo d'ariete"**
- **gradienti di temperatura ed espansione termica differenziale**
- **prova di pressurizzazione**

È comunque responsabilità del produttore individuare **tutte le azioni che è possibile ritenere agiranno durante la vita operativa**, che possano risultare rilevanti ai fini della sicurezza, incluse quelle derivanti da **eventuali usi erranei ragionevolmente prevedibili dell'attrezzatura stessa**.





## Le norme definiscono dei coefficienti correttivi per tener conto della presenza di giunzioni saldate

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 dipende, in generale, dai seguenti fattori:

- tipologia di saldatura (di testa a p.p., d'angolo, etc.)
- controlli NDE o NDT ("Non Destructive Examination" o "Non Destructive Testing", es. US, X-ray, etc.) dopo saldatura
- spessore dei pezzi saldati
- temperature di esercizio
- tipologia di materiale base

Le diverse normative differiscono tra loro per il modo in cui viene tenuta in considerazione questa dipendenza

## ASME VIII -Div. 1 (DBF)

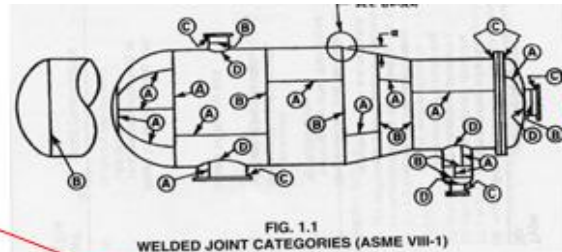


FIG. 1.1  
WELDED JOINT CATEGORIES (ASME VIII-1)

TABLE 1.5

MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS FOR VIII-1

| Type No. | Joint Description                                                                                                                                                                                                                                                            | Limitations                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Joint Category          | Degree of Radiographic Examination |                     |              |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------|
|          |                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         | (a) Full [Note (1)]                | (b) Spot [Note (2)] | (c) None     |
| (1)      | Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded. | None                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | A, B, C & D             | 1.00                               | 0.85                | 0.70         |
| (2)      | Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)                                                                                                                                                                                              | (a) None except as in (b) below<br>(b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Fig. UW-13.1, sketch (i)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | A, B, C & D<br>A, B & C | 0.90<br>0.90                       | 0.80<br>0.80        | 0.65<br>0.65 |
| (3)      | Single-welded butt joint without use of backing strip                                                                                                                                                                                                                        | Circumferential butt joints only, not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (600 mm) outside diameter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | A, B & C                | NA                                 | NA                  | 0.60         |
| (4)      | Double full fillet lap joint                                                                                                                                                                                                                                                 | (a) Longitudinal joints not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick<br>(b) Circumferential joints not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) thick                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | A<br>B & C [Note (3)]   | NA<br>NA                           | NA<br>NA            | 0.55<br>0.55 |
| (5)      | Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17                                                                                                                                                                                                            | (a) Circumferential joints [Note (4)] for attachment of heads not over 24 in. (600 mm) outside diameter to shells not over $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) thick<br>(b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug. | B<br>C                  | NA<br>NA                           | NA<br>NA            | 0.50<br>0.50 |

Controlli NDE

Efficienza

L'efficienza "E" dipende dalla posizione del giunto nel vessel ("category"), dalla tipologia di saldatura e dai controlli NDE ("type"), specificati in apposite tabelle.



# Boiler and pressure vessel



## ASME VIII - Div. 2(DBA)

I giunti sono divisi in 6 “examination groups”, in funzione del materiale, dello spessore e della tecnologia di saldatura.

TABLE 1.3.1  
EXAMINATION GROUPS (VIII-2)

| Parameter                                    | Examination Group (1)             |                                                                                                                                          |                                                                                            |                                                                                                          |                                                                                  |                                                                                  |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                              | 1a                                | 1b                                                                                                                                       | 2a                                                                                         | 2b                                                                                                       | 3a                                                                               | 3b                                                                               |
| Permitted Material (1) (2)                   | All Materials in Annex 3.A        | P-No. 1 Gr 1 and 2, P-No. 8 Gr 1                                                                                                         | P-No. 8 Gr 2, P-No. 9A Gr 1, P-No. 9B Gr 1, P-No. 11A Gr 1, P-No. 11A Gr 2, P-No. 10H Gr 1 | P-No. 1 Gr 1 and 2, P-No. 8 Gr 1                                                                         | P-No. 8 Gr 2, P-No. 9A Gr 1, P-No. 9B Gr 1, P-No. 10H Gr 1                       | P-No. 1 Gr 1 and 2, P-No. 8 Gr 1                                                 |
| Maximum thickness of governing welded joints | Unlimited (4)                     | 30mm (1 3/16 in) for P-No. 9A Gr 1 and P-No. 9B Gr 1; 16mm (5/8 in) for P-No. 8 Gr 2 (5); P-No. 11A Gr 1; P-No. 11A Gr 2; P-No. 10H Gr 1 | 50mm (2 in) for P-No. 1 Gr 1 and P-No. 8 Gr 1; 30mm (1 3/16 in) for P-No. 1 Gr 2           | 30mm (1 3/16 in) for P-No. 9A Gr 1 and P-No. 9B Gr 1; 16mm (5/8 in) for P-No. 8 Gr 2 (5); P-No. 10H Gr 1 | 50mm (2 in) for P-No. 1 Gr 1 and P-No. 8 Gr 1; 30mm (1 3/16 in) for P-No. 1 Gr 2 | 50mm (2 in) for P-No. 1 Gr 1 and P-No. 8 Gr 1; 30mm (1 3/16 in) for P-No. 1 Gr 2 |
| Welding process                              | Unrestricted (4)                  | Mechanized Welding Only (3)                                                                                                              |                                                                                            |                                                                                                          | Unrestricted (4)                                                                 |                                                                                  |
| Design basic (6)                             | Part 4 or Part 5 of this Division | Part 4 or Part 5 of this Division                                                                                                        |                                                                                            |                                                                                                          | Part 4 or this Division                                                          |                                                                                  |

TABLE 1.3.2  
NDE REQUIREMENTS (VIII-2)

|                |                            |                       |                                                                                                         |                            |              |                                                                                  |                    |                                             |                    |
|----------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------|--------------------|
|                |                            | Examination Group     |                                                                                                         | 1a                         | 1b           | 2a                                                                               | 2b                 | 3a                                          | 3b                 |
|                |                            |                       |                                                                                                         |                            |              | P-No. 8 Gr 2<br>P-No 9A Gr 1<br>P-No 9B Gr 1<br>P-No. 11A Gr 1<br>P-No. 11A Gr 2 | P-No 1<br>Gr 1 & 2 | P-No 8 Gr 2<br>P-No 9A Gr 1<br>P-No 9B Gr 1 | P-No 1<br>Gr 1 & 2 |
|                |                            | Permitted Materials   |                                                                                                         | All Materials in Annex 3.A | P-No. 8 Gr 1 | P-No. 10H Gr 1                                                                   | P-No 8 Gr 1        | P-No 10H Gr 1                               | P-No 8 Gr 1        |
|                |                            | Weld Joint Efficiency |                                                                                                         | 1.0                        | 1.0          | 1.0                                                                              | 1.0                | 0.85                                        | 0.85               |
| Joint Category |                            | Type of Weld (1)      | Type of NDE (2)                                                                                         | Extent of NDE (10)(11)(12) |              |                                                                                  |                    |                                             |                    |
|                |                            |                       |                                                                                                         |                            |              |                                                                                  |                    |                                             |                    |
| A              | Full penetration butt weld | 1                     | Longitudinal joints                                                                                     | RT or UT<br>100%<br>10%    | 100%<br>10%  | 100%<br>10%                                                                      | 100%<br>10%        | 25%<br>10%                                  | 10%<br>10%         |
| B              |                            | 1                     | Circumferential joints on a shell                                                                       | RT or UT<br>100%<br>10%    | 100%<br>10%  | 100%<br>10%                                                                      | 100%<br>10%        | 10%<br>10%                                  | 10% (3)<br>10% (4) |
| B              |                            | 2,3                   | Circumferential joints on a shell with backing strip (9)                                                | RT or UT<br>100%<br>NA     | 100%<br>10%  | NA<br>NA                                                                         | 25%<br>10%         | NA<br>NA                                    | 25%<br>10%         |
| B              |                            | 1                     | Circumferential joints on a nozzle where d > 150mm (6 in) or t > 16mm (5/8 in)                          | RT or UT<br>100%<br>10%    | 100%<br>10%  | 100%<br>10%                                                                      | 100%<br>10%        | 10%<br>10%                                  | 10% (3)<br>10% (4) |
| B              |                            | 2,3                   | Circumferential joints on a nozzle where d > 150 mm (6 in) or t > 16 mm (5/8 in) with backing strip (9) | RT or UT<br>NA<br>NA       | 100%<br>10%  | NA<br>NA                                                                         | 25%<br>10%         | NA<br>NA                                    | 25%<br>10%         |
| B              |                            | 1                     | Circumferential joints on a nozzle where d ≤ 150 mm (6 in) and t ≤ 16 mm (5/8 in)                       | MT or PT<br>100%           | 10%          | 100%                                                                             | 10%                | 10%                                         | 10%                |
| A              |                            | 1                     | All welds in spheres, heads and hemispherical heads to shells                                           | RT or UT<br>100%<br>10%    | 100%<br>10%  | 100%<br>10%                                                                      | 100%<br>10%        | 25%<br>10%                                  | 10%<br>10%         |
| B              |                            | 1                     | Attachment of a conical shell with a cylindrical shell at an angle ≤ 30                                 | RT or UT<br>100%<br>10%    | 100%<br>10%  | 100%<br>10%                                                                      | 100%<br>10%        | 10%<br>10%                                  | 10%<br>10%         |



# Boiler and pressure vessel



## EN 13445 - (DBF)

I recipienti ed i relativi giunti sono divisi in 7 “testing groups”, in funzione del materiale, dei controlli NDT, dello spessore e della tecnologia disaldatura.

Table 6.6.1-1 — Testing groups for steel pressure vessels

| Requirements                                                 | Testing group <sup>a</sup>                     |               |                                                            |                                                  |                                                       |                                                  |                                                                             |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|                                                              | 1a                                             | 1b            | 2a                                                         | 2b                                               | 3a                                                    | 3b                                               | 4 <sup>b,j</sup>                                                            |
| Permitted materials <sup>g</sup>                             | 1 to 10                                        | 1.1, 1.2, 8.1 | 8.2, 9.1, 9.2, 9.3, 10                                     | 1.1, 1.2, 8.1                                    | 8.2, 9.1, 9.2, 10                                     | 1.1, 1.2, 8.1                                    | 1.1, 8.1                                                                    |
| Extent of NDT for governing welded joints <sup>e,h</sup>     | 100 %                                          | 100 %         | 100 % - 10% <sup>d</sup>                                   | 100 % - 10 % <sup>d</sup>                        | 25 %                                                  | 10 %                                             | 0 %                                                                         |
| NDT of other welds                                           | Defined for each type of weld in Table 6.6.2-1 |               |                                                            |                                                  |                                                       |                                                  |                                                                             |
| Joint coefficient                                            | 1                                              | 1             | 1                                                          | 1                                                | 0.85                                                  | 0.85                                             | 0.7                                                                         |
| Maximum thickness for which specific materials are permitted | Unlimited                                      | Unlimited     | 30 mm for groups 9.1, 9.2<br>16 mm for groups 9.3, 8.2, 10 | 50 mm for groups 1.1, 8.1<br>30 mm for group 1.2 | 30 mm for groups 9.2, 9.1<br>16 mm for groups 8.2, 10 | 50 mm for groups 1.1, 8.1<br>30 mm for group 1.2 | 12 mm for groups 1.1, 8.1                                                   |
| Welding process                                              | Unlimited                                      | Unlimited     | Fully mechanical welding only <sup>c</sup>                 | Unlimited                                        | Unlimited                                             | Unlimited                                        | Unlimited                                                                   |
| Service temperature range                                    | Unlimited                                      | Unlimited     | Unlimited                                                  | Unlimited                                        | Unlimited                                             | Unlimited                                        | Limited to (-10 to +200) °C for group 1.1<br>(-50 to +300) °C for group 8.1 |

Per ogni “Testing group” viene definito un “joint coefficient”  $z$ , corrispondente all’efficienza della saldatura

Table 5.6-1 — Joint coefficient and corresponding testing group

|               |      |      |     |
|---------------|------|------|-----|
| $z$           | 1    | 0.85 | 0.7 |
| Testing Group | 1, 2 | 3    | 4   |



# Boiler and pressure vessel



*Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica*

ASME VIII - Div. 1 (DBF) : Criterio di Lamé (max. tensione normale)

ASME VIII - Div. 2 (DBF) : Criterio di Tresca (max. tensione tangenziale)

ASME VIII - Div. 2 (DBA) : Criterio di Von Mises (energia di distorsione)

EN13445 (DBF+DBA) : Criterio di Tresca (max. tensione tangenziale)





Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

## ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Fornisce una relazione per il calcolo dello spessore richiesto per i **gusci sottili**, basata sul criterio di Tresca (o di Lamé) e sul non superamento del **limite di snervamento**:

$$t = \frac{P \cdot R}{(S \cdot E - 0.6P)} \quad t < 0.5 \cdot R \quad o \quad P < 0.385 \cdot S \cdot E$$

*P* : Pressione

*R*: Raggio interno

*S*: Tensione Ammissibile

*E*: Efficienza

La formula è stata ottenuta modificando la relazione di Boyle & Mariotte:

$$\sigma_{id(Lamé \text{ o } Tresca)} = \frac{P R}{t} = S \cdot E \Rightarrow t = \frac{P R}{S \cdot E}$$

La modifica ha permesso di estendere il campo di applicazione della formula oltre il limite teorico ( $t \leq 0.1 R$ ).



Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

## ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Fornisce una relazione per il calcolo dello spessore richiesto per i **gusci sottili**, basata sul criterio di Tresca (o di Lamé) e sul non superamento del **limite di snervamento**:

$$t = \frac{P \cdot R}{(S \cdot E - 0.6P)} \quad t < 0.5 \cdot R \quad o \quad P < 0.385 \cdot S \cdot E$$

*P* : Pressione

*R*: Raggio interno

*S*: Tensione Ammissibile

*E*: Efficienza

La formula è stata ottenuta modificando la relazione di Boyle & Mariotte:

$$\sigma_{id(Lamé \text{ o } Tresca)} = \frac{P R}{t} = S \cdot E \Rightarrow t = \frac{P R}{S \cdot E}$$

La modifica ha permesso di estendere il campo di applicazione della formula oltre il limite teorico ( $t \leq 0.1 R$ ).



# Boiler and pressure vessel



*Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica*

ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Per i gusci spessi, si utilizza la seguente relazione:

$$t = R(Z^{1/2} - 1) \quad \text{dove: } Z = \frac{S \cdot E + P}{S \cdot E - P}$$





# Boiler and pressure vessel



Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

## ASME VIII - Div. 2

Fornisce la seguente relazione valida per ogni spessore

$$t = R \left( e^{\frac{P}{S \cdot E}} - 1 \right)$$

Ottenuta calcolando la pressione necessaria alla completa plasticizzazione della sezione, secondo il criterio di Tresca.

Nota : per la Div. 2 non ci sono veri limiti alla pressione di progetto, tuttavia, al di sopra di 10000 psi = 689 bar, si consiglia l'impiego della Div. 3.



# Boiler and pressure vessel



Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

EN 13445 - (DBF)

Fornisce la seguente relazione

$$t = \frac{P \cdot D}{(2S \cdot E - P)} \quad \frac{t}{R} < 0.47$$

← diametro interno

Ottenuta calcolando il valore medio sullo spessore della tensione ideale secondo Tresca.

Se si supera il limite di validità è necessario passare al metodo DBA.



Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

## FONDI - Gusci sferici

ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Fornisce una relazione per il calcolo dello spessore richiesto per i **gusci sottili**, basata sul criterio di Tresca (o di Lamé) e sul non superamento del limite di snervamento:

$$t = \frac{P \cdot R}{(2 \cdot S \cdot E - 0.2P)} \quad t < 0.356 \cdot R \quad o \quad P < 0.665 \cdot S \cdot E$$

Ottenuta modificando la relazione di Boyle & Mariotte

$$\sigma_{id(Tresca)} = \frac{P \cdot R}{2t} = S \cdot E \Rightarrow t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E}$$

Per gusci spessi si utilizza la seguente relazione

$$t = R(Y^{1/3} - 1) \quad dove: Y = \frac{2(S \cdot E + P)}{2 \cdot S \cdot E - P}$$

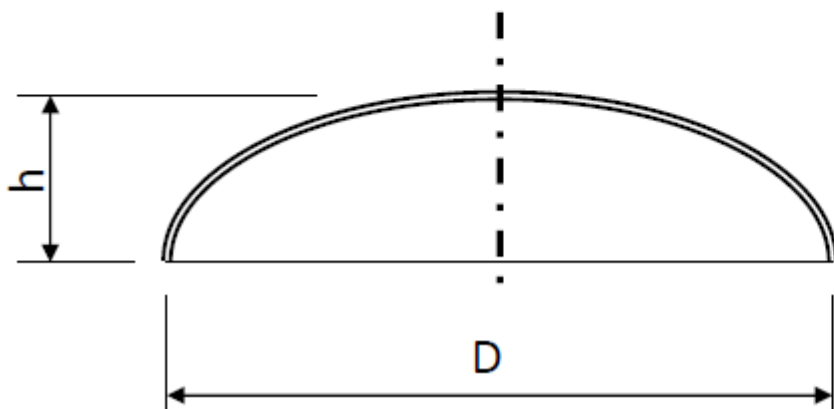
## FONDI - Gusci Semi-ellittici

ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Viene fornita una relazione per il calcolo dello spessore richiesto:

$$t = \frac{P \cdot D \cdot K}{(2 \cdot S \cdot E - 0.2P)}$$

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D}{2h} \right)^2 \right]$$





# Boiler and pressure vessel



## FONDI Piani

## ASME VIII - Div. 1 (DBF)

Spessore minimo richiesto per i fondi piani circolari

diametro su  
cui agisce P

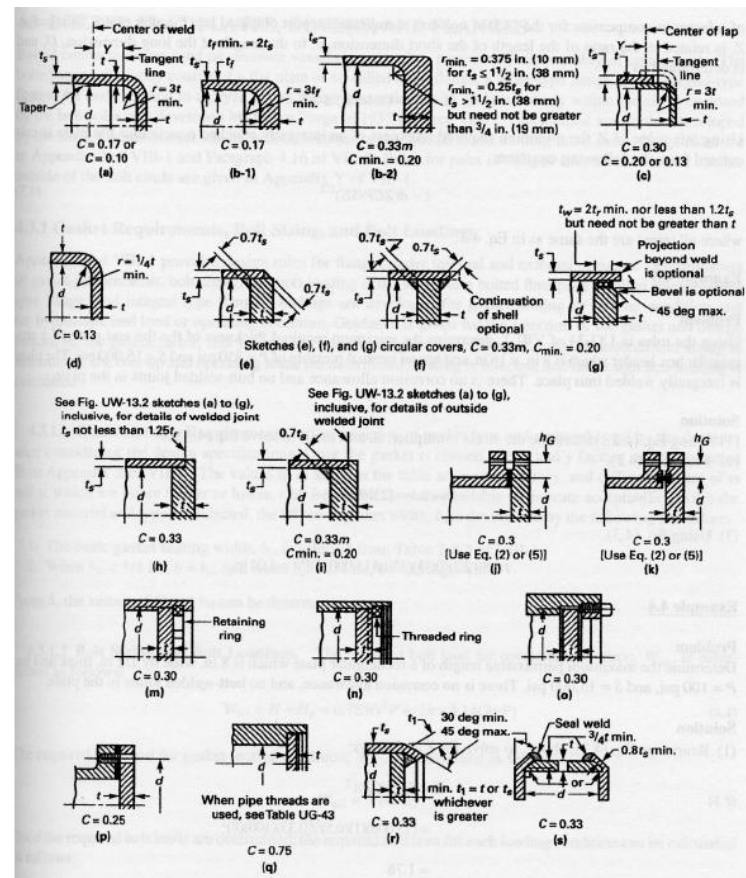
Coeff. per condizioni di vincolo  $\in \{0.1-0.33\}$

$$t = d \left( \frac{C \cdot P}{S \cdot E} \right)^{1/2}$$

pressione

tensione ammissibile

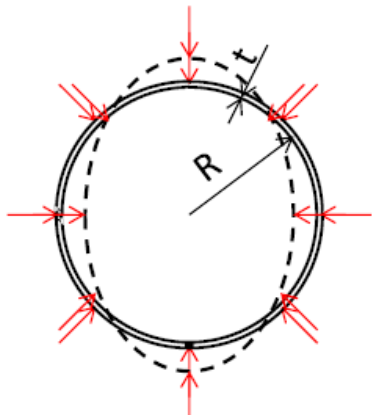
efficienza



## Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle tensioni ideali e dei criteri di verifica

Se il guscio cilindrico è soggetto a pressione esterna, il principale meccanismo di cedimento, in particolare per gusci sottili, è il «buckling» del guscio.

La relazione base per il calcolo della minima pressione esterna tale da provocare l'instabilità di un guscio di lunghezza infinitamente grande è:



$$P_{cr} = 2 \cdot E_m \left( \frac{t}{D} \right)^3$$

modulo elastico



*Le norme definiscono le modalità per la determinazione delle aree di rinforzo necessarie in corrispondenza delle penetrazioni*

## ASME VIII - Div. 1 (DBF)

- introducendo un'apertura, si elimina materiale e si interrompe il flusso delle tensioni attraverso tale materiale
- si rende quindi necessario rimpiazzare il materiale mancante con altro materiale, sufficientemente vicino all'apertura da poter essere interessato dal flusso delle tensioni
- Il materiale sostitutivo può essere fornito da un surplus di spessore del vessel, rispetto al minimo richiesto, oppure da appositi rinforzi collocati nella zona dell'apertura





# Boiler and pressure vessel



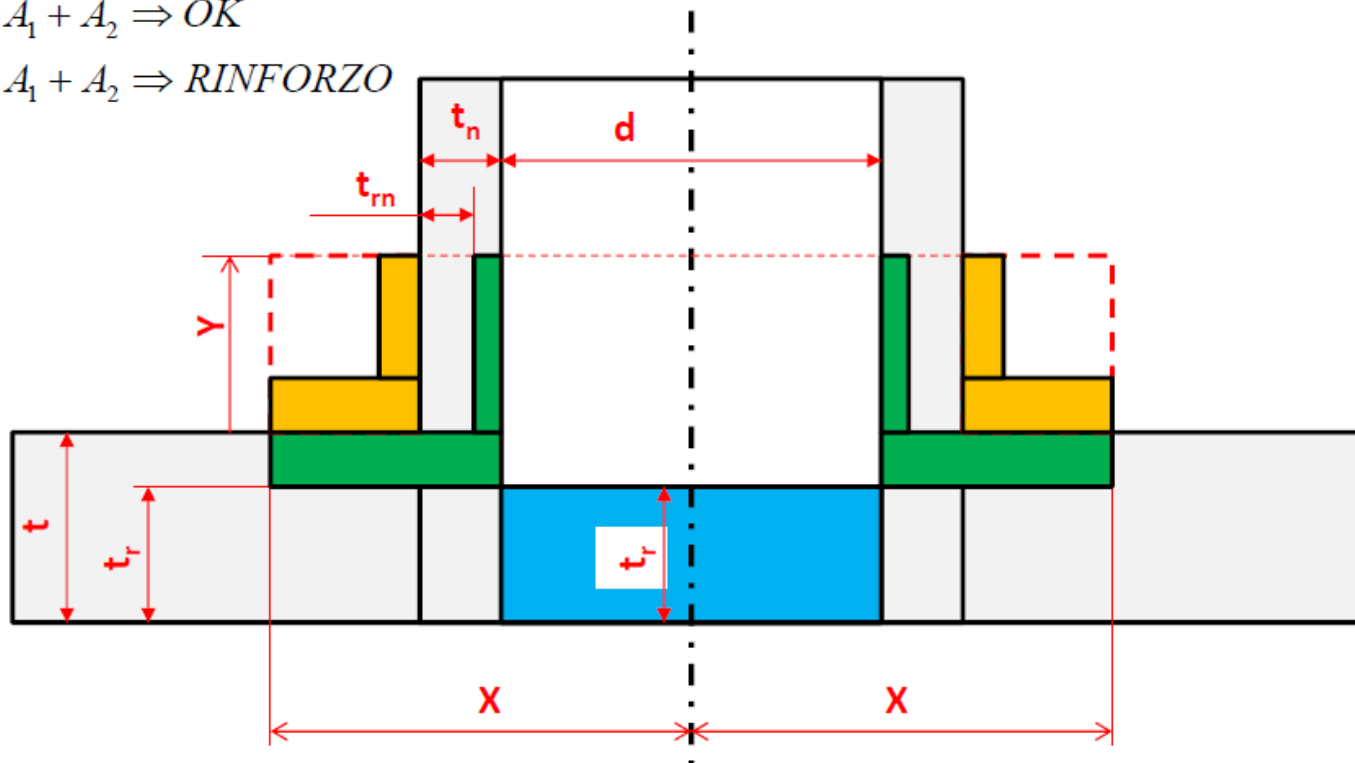
Area Richiesta  $A_r = d \cdot t_r$

Area disponibile vessel  $A_1 = (2X - d) \cdot (t - t_r)$

Area disponibile penetrazione  $A_2 = 2Y \cdot (t_n - t_{rn})$

Se  $A_r \leq A_1 + A_2 \Rightarrow OK$

$A_r > A_1 + A_2 \Rightarrow RINFORZO$





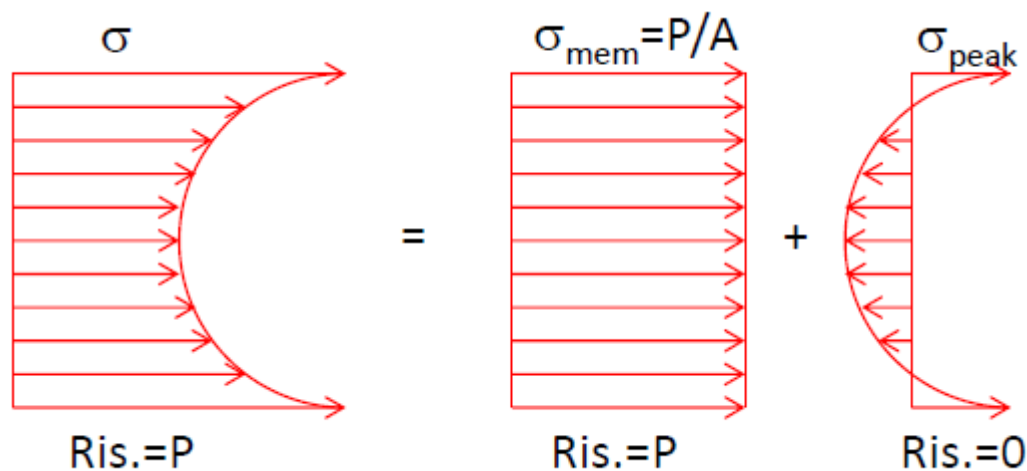
# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2, EN 13445)

Stress-Analysis (FEM) in tutti i casi in cui non sono date formule adeguate alla progettazione DBF.

Le tensioni ottenute dal modello FEM sono la somma di vari contributi, aventi rilevanza diversa.

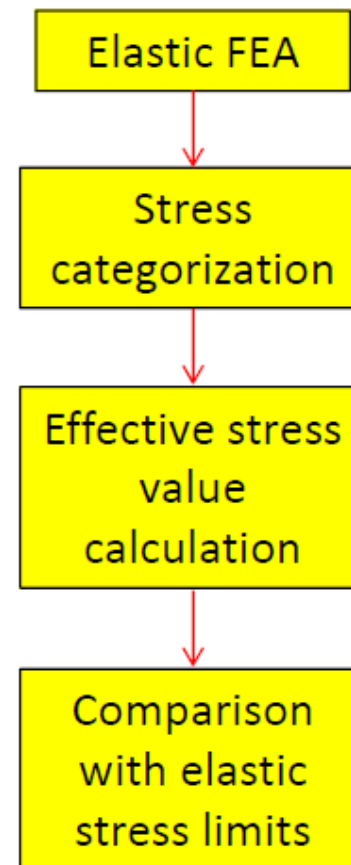




## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2, EN 13445)

### TIPI DI VERIFICHE RICHIESTE

- ✓ Protection Against Plastic Collapse
  - Elastic Stress Analysis Method
  - Limit-Load Elastic Method
  - Elastic-Plastic Stress Analysis Method
- ✓ Protection Against Local Failure
- ✓ Protection Against Collapse From Buckling
- ✓ Protection Against Failure From Cyclic Loading





## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

### ELASTIC FEA

#### 2. Numerical Analysis

1. The design-by-analysis rules in Part 5 are based on the use of results obtained from a detailed stress analysis of a component. ...

.....

5.1.2.3 Recommendations on a stress analysis method, modeling of a component, and validation of analysis results are not provided. While these aspects of the design process are important and shall be considered in the analysis, a detailed treatment of the subject is not provided because of the variability in approaches and design processes. **However, an accurate stress analysis including validation of all results shall be provided as part of the design.**



# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

Table 5.2 – Load Descriptions

| Design Load Parameter | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$                   | Internal and external specified design pressure                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $P_s$                 | Static head from liquid or bulk materials (e.g. catalyst)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| $D$                   | Dead weight of the vessel, contents, and appurtenances at the location of interest, including the following: <ul style="list-style-type: none"><li>• Weight of vessel including internals, supports (e.g. skirts, lugs, saddles, and legs), and appurtenances (e.g. platforms, ladders, etc.)</li><li>• Weight of vessel contents under operating and test conditions</li><li>• Refractory linings, insulation</li><li>• Static reactions from the weight of attached equipment, such as motors, machinery, other vessels, and piping</li></ul> |
| $L$                   | <ul style="list-style-type: none"><li>• Appurtenance Live loading</li><li>• Effects of fluid momentum, steady state and transient</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $E$                   | Earthquake loads (see ASCE 7 for the specific definition of the earthquake load, as applicable)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $W$                   | Wind Loads                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $W_{pt}$              | Is the pressure test wind load case. The design wind speed for this case shall be specified by the Owner-User.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $S_s$                 | Snow Loads                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| $T$                   | Is the self-restraining load case (i.e. thermal loads, applied displacements). This load case does not typically affect the collapse load, but should be considered in cases where elastic follow-up causes stresses that do not relax sufficiently to redistribute the load without excessive deformation.                                                                                                                                                                                                                                     |



# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

Table 5.3 – Load Case Combinations and Allowable Stresses for an Elastic Analysis

| Design Load Combination (1)                                                                                                                                                                                                           | Allowable Stress                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1) $P + P_s + D$                                                                                                                                                                                                                      | Determined based on the Stress Category shown in Figure 5.1 |
| 2) $P + P_s + D + L$                                                                                                                                                                                                                  |                                                             |
| 3) $P + P_s + D + L + T$                                                                                                                                                                                                              |                                                             |
| 4) $P + P_s + D + S_s$                                                                                                                                                                                                                |                                                             |
| 5) $0.6D + (W \text{ or } 0.7E) \text{ (2)}$                                                                                                                                                                                          |                                                             |
| 6) $0.9P + P_s + D + (W \text{ or } 0.7E)$                                                                                                                                                                                            |                                                             |
| 7) $0.9P + P_s + D + 0.75(L + T) + 0.75S_s$                                                                                                                                                                                           |                                                             |
| 8) $0.9P + P_s + D + 0.75(W \text{ or } 0.7E) + 0.75L + 0.75S_s$                                                                                                                                                                      |                                                             |
| Notes                                                                                                                                                                                                                                 |                                                             |
| 1) The parameters used in the Design Load Combination column are defined in Table 5.2.                                                                                                                                                |                                                             |
| 2) This load combination addresses an overturning condition. If anchorage is included in the design, consideration of this load combination is not required                                                                           |                                                             |
| 3) Loads listed herein shall be considered to act in the combinations described above; whichever produces the most unfavorable effect in the component being considered. Effects of one or more loads not acting shall be considered. |                                                             |



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

### CLASSI DI TENSIONE (Stress Categories)

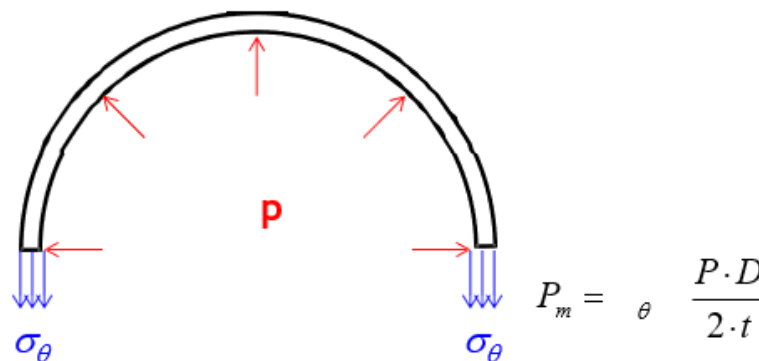
- **Tensioni primarie** (Primary Stress,  $P_{m,l,b}$ ): sono le tensioni che sono indispensabili per soddisfare le equazioni di equilibrio (es. tensioni membranali circonferenziali in un guscio cilindrico). La loro principale caratteristica è di non essere autolimitanti (ad esempio non sono significativamente limitate dalla eventuale insorgenza di deformazioni plastiche)
- **Tensioni secondarie** (Secondary Stress,  $Q$ ): sono tensioni dovute principalmente al ripristino della congruenza delle deformazioni tra elementi strutturali diversi o tra parti dello stesso elemento (Es. tensioni flessionali che si producono alla congiunzione tra corpo cilindrico e fondi in un recipiente pressurizzato, tensioni da dilatazione impedita in una tubazione). Le tensioni secondarie sono auto-limitanti (ad esempio possono essere significativamente limitate da fenomeni di plasticità) e generalmente non possono produrre rottura con una singola applicazione.
- **Tensioni di picco** (Peak Stress,  $F$ ): sono tensioni che interessano zone estremamente limitate della struttura, non producendo significative deformazioni generali (Es. tensioni prodotte da un intaglio). Sono significative soprattutto per la resistenza a fatica ed alla frattura fragile.



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

### Esempi

**Tensioni primarie** (Primary Stress): il valore della componente media (membranale) delle tensioni circonferenziali del recipiente in pressione è dato dalla condizione di equilibrio in direzione radiale e, pertanto, continua e cresce con  $p$  anche in presenza di eventuali plasticizzazioni, sino al raggiungimento del collasso



**Tensioni secondarie** (Secondary Stress,  $Q$ ): il valore delle tensioni agenti nella tubazione soggetta a dilatazione termica viene limitato dalla plasticità alla tensione di snervamento, in seguito a piccole deformazioni plastiche che ripristinano la congruenza, assorbendo l'allungamento termico.





## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

### CLASSIFICAZIONE TENSIONI PRIMARIE

**Le Tensioni Primarie** sono ulteriormente suddivise in sottocategorie, cui si applicano limiti diversi:

- **Tensioni Primarie Membranalì Generali** (General Primary Membrane Stress,  $P_m$ ) è la quota membranale delle tensioni primarie generali, vale a dire presenti sull'intera struttura o su una parte rilevante di essa
- **Tensioni Primarie Membranalì Locali** (Local Primary Membrane Stress,  $P_L$ ) è la quota membranale delle tensioni primarie locali, vale a dire presenti in un'area ristretta della struttura, ad esempio per equilibrare un carico applicato localmente (es. forze trasmesse da un bocchello). Una distribuzione di tensioni si considera locale se la zona nella quale le tensioni stesse superano  $1.1S$  non si estende per una distanza maggiore di  $\sqrt{(Rt)}$ .
- **Tensioni Primarie Flessionali** (Primary Bending Stress,  $P_b$ ) è la quota flessionale delle tensioni primarie (es. tensioni flessionali prodotte dalla pressione interna su di un fondo piatto).



# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

Table 5.6 – Examples Of Stress Classification

| Vessel Component                                               | Location                                             | Origin of Stress                                                                                  | Type of Stress                                                                                                               | Classification          |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Any shell including cylinders, cones, spheres and formed heads | Shell plate remote from discontinuities              | Internal pressure                                                                                 | General membrane<br>Gradient through plate thickness                                                                         | $P_m$<br>$Q$            |
|                                                                |                                                      | Axial thermal gradient                                                                            | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $Q$<br>$Q$              |
|                                                                | Near nozzle or other opening                         | Net-section axial force and/or bending moment applied to the nozzle, and/or internal pressure     | Local membrane                                                                                                               | $P_L$                   |
|                                                                |                                                      |                                                                                                   | Bending<br>Peak (fillet or corner)                                                                                           | $Q$<br>$F$              |
|                                                                | Any location                                         | Temperature difference between shell and head                                                     | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $Q$<br>$Q$              |
|                                                                | Shell distortions such as out-of-roundness and dents | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_m$<br>$Q$            |
| Cylindrical or conical shell                                   | Any section across entire vessel                     | Net-section axial force, bending moment applied to the cylinder or cone, and/or internal pressure | Membrane stress averaged through the thickness, remote from discontinuities; stress component perpendicular to cross section | $P_m$                   |
|                                                                |                                                      |                                                                                                   | Bending stress through the thickness; stress component perpendicular to cross section                                        | $P_b$                   |
|                                                                | Junction with head or flange                         | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_L$<br>$Q$            |
| Dished head or conical head                                    | Crown                                                | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_m$<br>$P_b$          |
|                                                                | Knuckle or junction to shell                         | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_L$ [note (1)]<br>$Q$ |
| Flat head                                                      | Center region                                        | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_m$<br>$P_b$          |
|                                                                | Junction to shell                                    | Internal pressure                                                                                 | Membrane<br>Bending                                                                                                          | $P_L$<br>$Q$ [note (2)] |



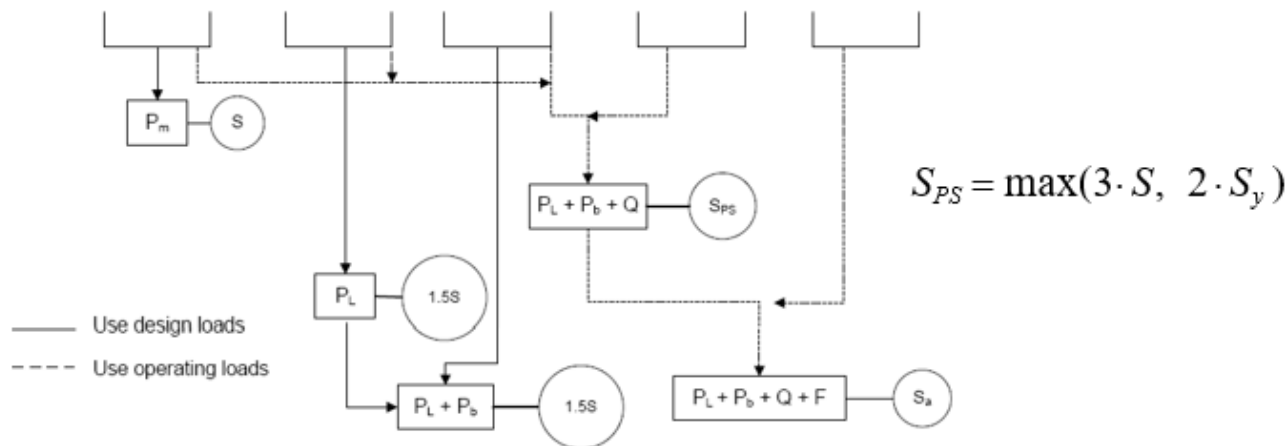
# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

### Limiti sulle tensioni

| Stress Category                           | Primary                                                                                                                      |                                                                                                                               |                                                                                                                                                                      | Secondary Membrane plus Bending                                                                                                                                                                                            | Peak                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                           | General Membrane                                                                                                             | Local Membrane                                                                                                                | Bending                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                            |
| Description (For examples, see Table 5.2) | Average primary stress across solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads. | Average stress across any solid section. Considers discontinuities but not concentrations. Produced only by mechanical loads. | Component of primary stress proportional to distance from centroid of solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads. | Self-equilibrating stress necessary to satisfy continuity of structure. Occurs at structural discontinuities. Can be caused by mechanical load or by differential thermal expansion. Excludes local stress concentrations. | <ol style="list-style-type: none"> <li>Increment added to primary or secondary stress by a concentration (notch).</li> <li>Certain thermal stresses which may cause fatigue but not distortion of vessel shape.</li> </ol> |
| Symbol                                    | $P_m$                                                                                                                        | $P_L$                                                                                                                         | $P_b$                                                                                                                                                                | $Q$                                                                                                                                                                                                                        | $F$                                                                                                                                                                                                                        |





# Boiler and pressure vessel - DBA



## DESIGN BY ANALYSIS (ASME VIII Div. 2)

