

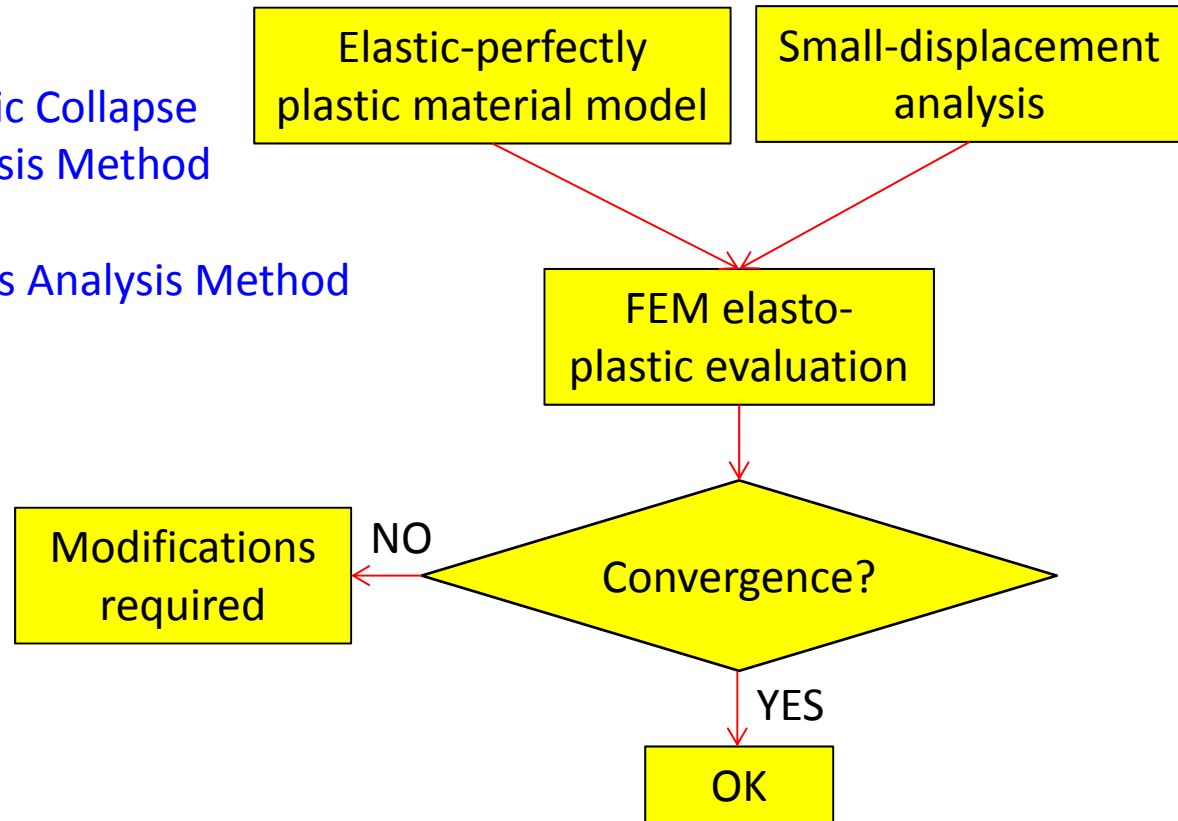


# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/4 (ASME VIII Div. 2)

### TIPI DI VERIFICHE RICHIESTE

- a) Protection Against Plastic Collapse
  - a) Elastic Stress Analysis Method
  - b) **Limit-Load Method**
  - c) Elastic-Plastic Stress Analysis Method





# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

**Table 5.4 – Load Case Combinations and Load Factors for a Limit Load Analysis**

Design Conditions	
Criteria	Required Factored Load Combinations
Global Criteria	1) $1.5(P + P_s + D)$
	2) $1.3(P + P_s + D + T) + 1.7L + 0.54S_s$
	3) $1.3(P + P_s + D) + 1.7S_s + (1.1L \text{ or } 0.86W)$
	4) $1.3(P + P_s + D) + 1.7W + 1.1L + 0.54S_s$
	5) $1.3(P + P_s + D) + 1.1E + 1.1L + 0.21S_s$
Local Criteria	Per Table 5.5
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable, see Table 5.5
Hydrostatic Test Conditions	
Global Criteria	$\max \left[ 1.43, 1.25 \left( \frac{S_T}{S} \right) \right] \cdot (P + P_s + D) + 2.6W_{pt}$
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable.
Pneumatic Test Conditions	
Global Criteria	$1.15 \left( \frac{S_T}{S} \right) \cdot (P + P_s + D) + 2.6W_{pt}$
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable.
Notes:	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) The parameters used in the Design Load Combination column are defined in Table 5.2.</li> <li>2) See paragraph 5.2.3.4 for descriptions of global and serviceability criteria.</li> <li>3) <math>S</math> is the allowable membrane stress at the design temperature.</li> <li>4) <math>S_T</math> is the allowable membrane stress at the pressure test temperature.</li> <li>5) 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.</li> </ol>	



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Esercizio BPV-8

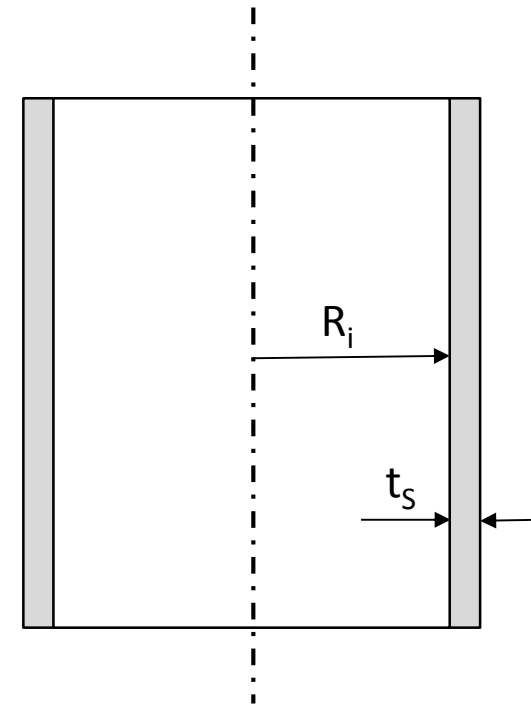
Dato il cilindro mostrato nella Figura, condurre con la metodologia DBA la verifica di resistenza al collasso plastico secondo la tecnica «Limit Load Analysis» e quella «Elastic Stress Analysis» .

Dati:

- pressione interna  $P = 120$  bar;
- raggio interno  $R_i = 1$  m
- tensione ammissibile (efficienza  $E=1$ , nessuna correzione per corrosione) : 108 MPa
- tensione di snervamento : 162 MPa
- spessore del fasciame cilindrico  $t_s = 150$  mm

Nota:

-Usare i risultati dell'analisi elasto-plastica vista in precedenza, confrontando il valore limite della pressione con quello effettivo





## Esercizio BPV-8 - Svolgimento

### Metodo Elastic Stress Analysis

Tensioni agenti  $P_m$ , da modello Lamé:

$$\sigma_{rrS} := \frac{P_1 \cdot R_i^2}{(R_i + t_S)^2 - R_i^2} \left[ 1 - \frac{(R_i + t_S)^2}{R_i^2} \right] = -12 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{\theta\theta S} := \frac{P_1 \cdot R_i^2}{(R_i + t_S)^2 - R_i^2} \left[ 1 + \frac{(R_i + t_S)^2}{R_i^2} \right] = 86.419 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{zzS} := \frac{P_1 \cdot R_i^2}{(R_i + t_S)^2 - R_i^2} = 37.209 \cdot \text{MPa}$$

$$P_m := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{[(\sigma_{\theta\theta S} - \sigma_{rrS})^2 + (\sigma_{\theta\theta S} - \sigma_{zzS})^2 + (\sigma_{rrS} - \sigma_{zzS})^2]} = 85.233 \cdot \text{MPa}$$

$$P_m = 85.233 \cdot \text{MPa} < S = 108 \cdot \text{MPa} \quad \text{OK}$$

### Metodo Carico limite elasto plastico

Affinché la sezione sia completamente plasticizzata occorre una pressione interna:

$$P_{\text{lim}} := \sigma_y \cdot \ln \left( \frac{R_i + t_S}{R_i} \right) = 226.414 \cdot \text{bar} > P_1 \cdot 1.5 = 180 \cdot \text{bar} \quad \text{OK}$$

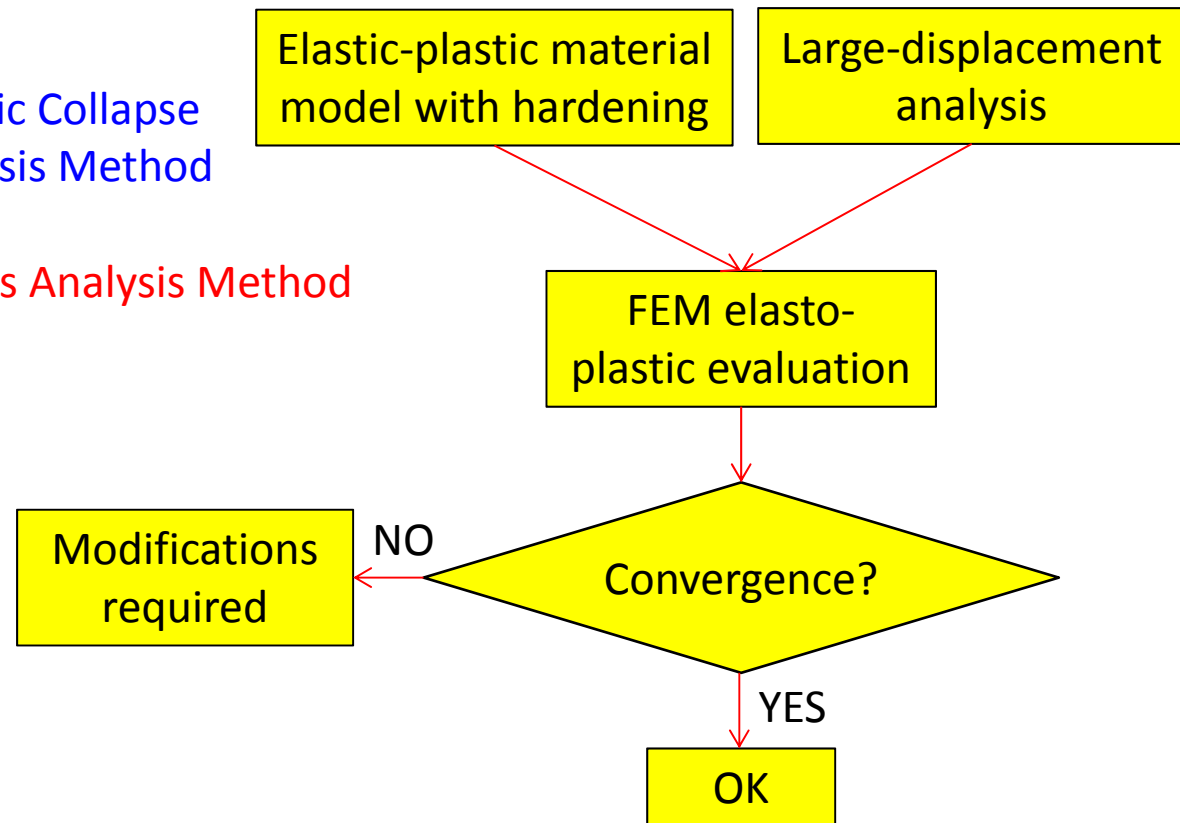


# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/4 (ASME VIII Div. 2)

### TIPI DI VERIFICHE RICHIESTE

- a) Protection Against Plastic Collapse
  - a) Elastic Stress Analysis Method
  - b) Limit-Load Method
  - c) Elastic-Plastic Stress Analysis Method





# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

**Table 5.5 – Load Case Combinations and Load Factors for an Elastic-Plastic Analysis**

Design Conditions	
Criteria	Required Factored Load Combinations
Global Criteria	1) $2.4(P + P_s + D)$
	2) $2.1(P + P_s + D + T) + 2.7L + 0.86S_s$
	3) $2.1(P + P_s + D) + 2.7S_s + (1.7L \text{ or } 1.4W)$
	4) $2.1(P + P_s + D) + 2.7W + 1.7L + 0.86S_s$
	5) $2.1(P + P_s + D) + 1.7E + 1.7L + 0.34S_s$
Local Criteria	$1.7(P + P_s + D)$
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable, see paragraph 5.2.4.3.b.
Hydrostatic Test Conditions	
Global and Local Criteria	$\max \left[ 2.3, 2.0 \left( \frac{S_T}{S} \right) \right] \cdot (P + P_s + D) + W_{pt}$
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable.
Pneumatic Test Conditions	
Global and Local Criteria	$1.8 \left( \frac{S_T}{S} \right) \cdot (P + P_s + D) + W_{pt}$
Serviceability Criteria	Per User's Design Specification, if applicable.
Notes:	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) The parameters used in the Design Load Combination column are defined in Table 5.2.</li> <li>2) See paragraph 5.2.4.3 for descriptions of global and serviceability criteria.</li> <li>3) <math>S</math> is the allowable membrane stress at the design temperature.</li> <li>4) <math>S_T</math> is the allowable membrane stress at the pressure test temperature.</li> <li>5) 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.</li> </ol>	



## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

#### TIPI DI VERIFICHE RICHIESTE

- a) Protection Against Plastic Collapse
- b) Protection Against Local Failure**
- c) Protection Against Collapse From Buckling
- d) Protection Against Failure From Cyclic Loading

La norma contempla la possibilità che, anche nel caso in cui la verifica a collasso plastico abbia dato esito positivo, in particolari zone della struttura (Es. intagli) si possano produrre deformazioni sufficienti a portare il materiale a rottura «localmente». Si tratterebbe, evidentemente, di una rottura duttile legata al superamento delle deformazioni ammissibili.



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

### Protection Against Local Failure

#### Elastic Stress Analysis

Se si è condotta un'analisi elastica per la verifica contro il collasso plastico, è necessario imporre la verifica della seguente relazione:

$$(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leq 4 \cdot S$$

Tensioni principali locali  
nel punto considerato





# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

### Protection Against Local Failure

#### Elasto-Plastic Stress Analysis

Se si è condotta un'analisi elasto-plastica completa in grandi spostamenti per la verifica contro il collasso plastico, è necessario imporre la verifica della seguente relazione:

$$\varepsilon_{peq} + \varepsilon_{cf} \leq \varepsilon_L$$

Valore limite ammissibile  
di deformazione plastica

Deformazione plastica  
accumulata nel punto  
considerato

Deformazione plastica  
(eventualmente)  
accumulata durante il  
processo di formatura



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

### Protection Against Local Failure

#### Elasto-Plastic Stress Analysis

La deformazione limite ammissibile è data dalla seguente relazione, che tiene conto degli effetti della triassialità dello stato di tensione:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha_{sl}}{1+m_2}\right) \left[ \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \frac{1}{3}}{3 \cdot \sigma_e} \right]}$$

Tensione idrostatica

Indice di triassialità dello stato di tensione

Tensione equivalente

Duttilità del materiale in condizioni monoassiali (prova di trazione)



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

### Protection Against Local Failure

#### Elasto-Plastic Stress Analysis

Il valore dei coefficienti  $m_2$ ,  $\alpha_{sl}$  e  $\epsilon_{Lu}$  è dato dalla Tabella a lato

Table 5.7 – Uniaxial Strain Limit for use in Multiaxial Strain Limit Criterion

Material	Maximum Temperature	$\epsilon_{Lu}$ Uniaxial Strain Limit (1), (2), (3)			$\alpha_{sl}$
		$m_2$	Elongation Specified	Reduction of Area Specified	
Ferritic Steel	480°C (900°F)	$0.60(1.00 - R)$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2
Stainless Steel and Nickel Base Alloys	480°C (900°F)	$0.75(1.00 - R)$	$3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	0.6
Duplex Stainless Steel	480°C (900°F)	$0.70(0.95 - R)$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2
Super Alloys (4)	480°C (900°F)	$1.90(0.93 - R)$	$\ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2
Aluminum	120°C (250°F)	$0.52(0.98 - R)$	$1.3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2
Copper	65°C (150°F)	$0.50(1.00 - R)$	$2 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2
Titanium and Zirconium	260°C (500°F)	$0.50(0.98 - R)$	$1.3 \cdot \ln \left[ 1 + \frac{E}{100} \right]$	$\ln \left[ \frac{100}{100 - RA} \right]$	2.2

Notes:

1. If the elongation and reduction in area are not specified, then  $\epsilon_{Lu} = m_2$ . If the elongation or reduction in area is specified, then  $\epsilon_{Lu}$  is the maximum number computed from columns 3, 4 or 5, as applicable.
2.  $R$  is the ratio of the minimum specified yield strength divided by the minimum specified ultimate tensile strength.
3.  $E$  is the % elongation and  $RA$  is the % reduction in area determined from the applicable material specification.
4. Precipitation hardening austenitic alloys



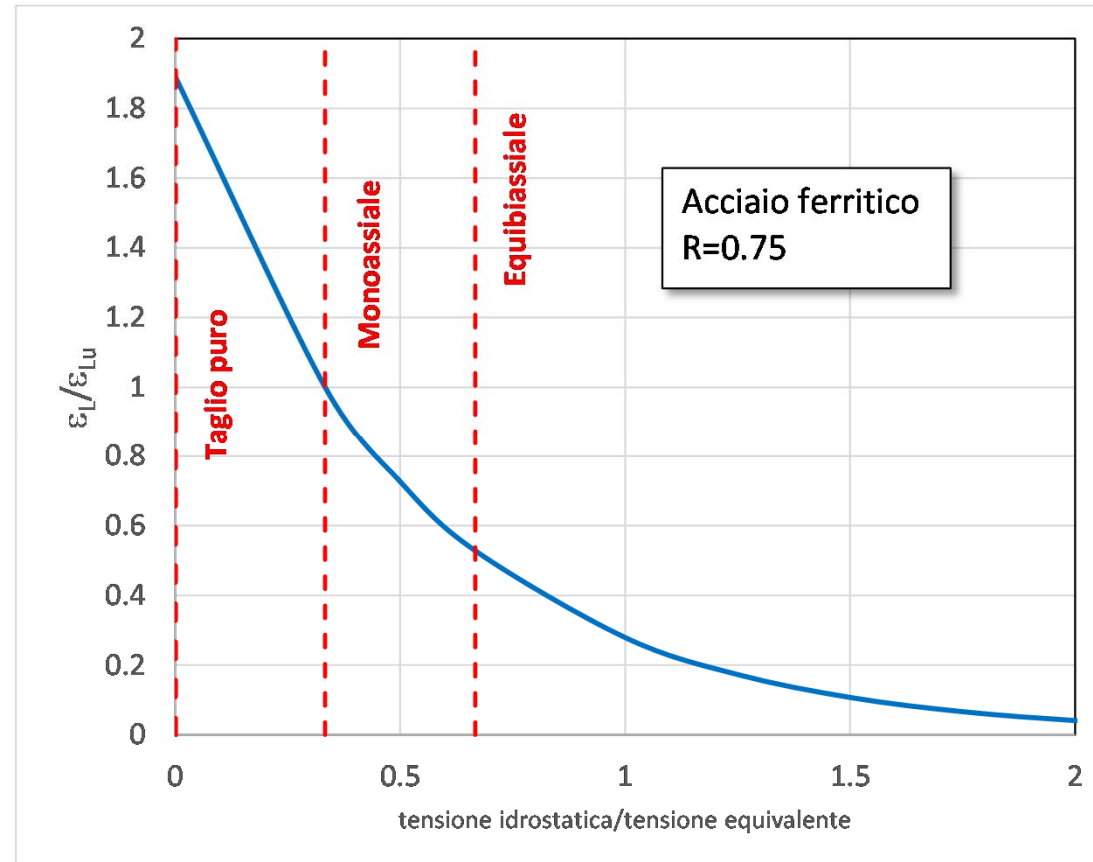
# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## DESIGN BY ANALYSIS/3 (ASME VIII Div. 2)

### Protection Against Local Failure

#### Elasto-Plastic Stress Analysis

Andamento della deformazione limite ammissibile in funzione dell'indice di triassialità dello stato di tensione:





# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Esercizio BPV-9

Nella zona circostante un bocchello, l'analisi elasto-plastica fornisce i seguenti valori dello stato di tensione e deformazione nella condizione di carico analizzata:

- $\sigma_{xx} = 180$  MPa
- $\sigma_{yy} = 162$  MPa
- $\sigma_{zz} = -42.75$  MPa
- $\sigma_{xy} = 18$  MPa
- $\sigma_{yz} = 13.5$  MPa
- $\sigma_{zx} = -9$  MPa
- $\epsilon_{pleq} = 0.18$  deformazione plastica equivalente accumulata

Il materiale è un acciaio ferritico avente le seguenti proprietà:

- $\sigma_y = 198$  MPa tensione di snervamento
- UTS = 405 MPa tensione di rottura
- $E_l = 18$  % allungamento a rottura

Il recipiente è un cilindro ottenuto per piegatura a freddo, avente la seguente geometria:

- $R_i = 1$  m raggio interno
- $t_c = 55$  mm spessore

Condurre la verifica contro la rottura locale.



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Esercizio BPV-9 - Svolgimento

$$\sigma_{xx} := 180 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{yy} := 0.9 \sigma_{xx} = 162 \text{ MPa} \quad \sigma_{zz} := -0.125 \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = -42.75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{xy} := 0.1 \cdot \sigma_{xx} = 18 \text{ MPa} \quad \sigma_{yz} := 0.75 \cdot \sigma_{xy} = 13.5 \text{ MPa} \quad \sigma_{zx} := -0.5 \cdot (\sigma_{xy}) = -9 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{pleq} := 0.18$$

$$E_1 := 18 \quad \sigma_y := 198 \cdot \text{MPa} \quad \text{UTS} := 405 \cdot \text{MPa}$$

$$R_i := 1 \cdot \text{m} \quad t_C := 55 \cdot \text{mm}$$

$$R_{mat} := \frac{\sigma_y}{\text{UTS}} = 0.489 \quad \text{Rapporto tra tensione di snervamento e rottura}$$

$$m_2 := 0.6 \cdot (1 - R_{mat}) = 0.307 \quad \varepsilon_E := 2 \cdot \ln \left( 1 + \frac{E_1}{100} \right) = 0.331 \quad \alpha_{sl} := 2.2$$

Par. Tabella 5.7

$$\varepsilon_{Lu} := \max(m_2, \varepsilon_E) = 0.331$$

$$\sigma_{idr} := \frac{1}{3} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = 99.75 \text{ MPa} \quad \text{Tensione idrostatica}$$

Tensione di Von Mises

$$\sigma_{eq} := \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} = 218.389 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_L := \varepsilon_{Lu} \cdot e^{-\frac{\alpha_{sl}}{1+m_2} \left( \frac{\sigma_{idr}}{\sigma_{eq}} - \frac{1}{3} \right)} = 0.269 \quad \text{Deformazione ammissibile}$$

$$\varepsilon_{cf} := \frac{t_C}{\left( R_i + \frac{t_C}{2} \right) \cdot 2} = 0.027 \quad \text{Deformazione dovuta alla lavorazione a freddo}$$

VERIFICA

$$\varepsilon_{pleq} + \varepsilon_{cf} = 0.207 < \varepsilon_L = 0.269 \quad \text{OK}$$

## Principali approcci al progetto

I recipienti in pressione per uso industriale hanno dimensioni molto variabili





## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/1

- La **Direttiva Apparecchi a Pressione** è una direttiva di prodotto (97/23/CE) emanata dalla Comunità Europea, e recepita in Italia con il Decreto Legislativo n° 93/2000.
- Disciplina la progettazione, la costruzione, l'equipaggiamento e l'installazione in sicurezza di **apparecchi in pressione**.
- Rientrano nel campo di applicabilità della direttiva ad esempio le tubazioni, le valvole idrauliche, e recipienti
- Non rientrano i dispositivi soggetti ad una pressione assoluta minore di 0,5 bar





## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/2

Al recipiente viene assegnata una **Categoria di Rischio** sulla base di:

- pressione massima ammissibile (PS)
- dimensioni:
  - volume V nel caso di recipienti
  - diametro DN nel caso di tubazioni
- temperatura minima/massima ammissibile (TS)
- tipologia di fluido:
  - **fluidi di gruppo 1:** pericolosi
    - esplosivi
    - da estremamente infiammabili a infiammabili
    - da altamente tossici a tossici
    - comburenti
  - **fluidi di gruppo 2:** non pericolosi
    - tutti quelli che non rientrano nel gruppo 1.
- condizioni di esercizio e installazione



## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/3

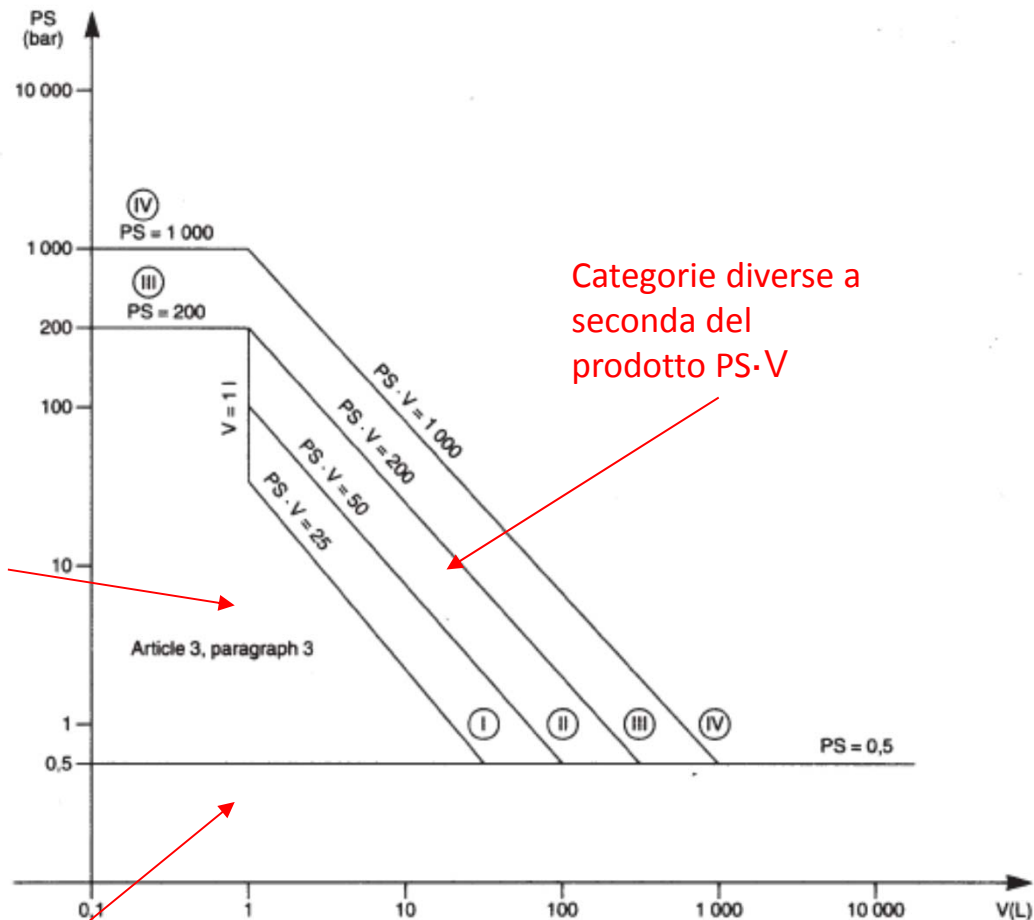
In base al tipo di fluido ed alla tipologia di attrezzatura (recipiente o tubazione), viene individuata una tabella/grafico da cui evincere la **Categoria di Rischio** :

Fluidi	Recipienti	Tubazioni
gas gruppo 1	tabella 1	tabella 6
gas gruppo 2	tabella 2	tabella 7
liquidi gruppo 1	tabella 3	tabella 8
liquidi gruppo 2	tabella 4	tabella 9



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/4 Gas tipo 1 (pericolosi)



Categorie diverse a seconda del prodotto PS·V

Marchio CE non richiesto

Non contemplati dalla PED

Table 1



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/5 Confornto tra gas tipo 1 (pericolosi, Table 1) e tipo 2 (non pericolosi, Table 2)

Corso di "Costruzione di macchine"  
Anno accademico 2015-6

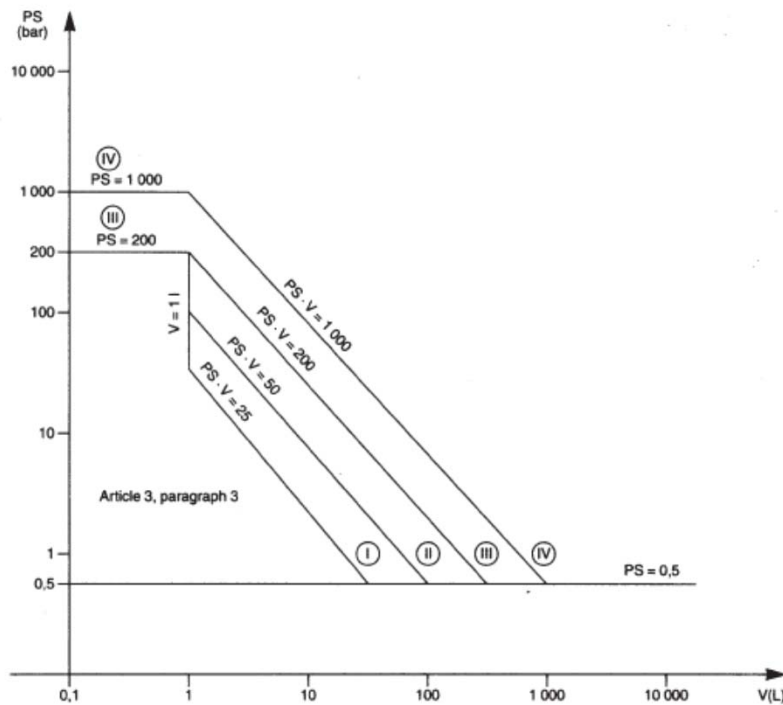


Table 1

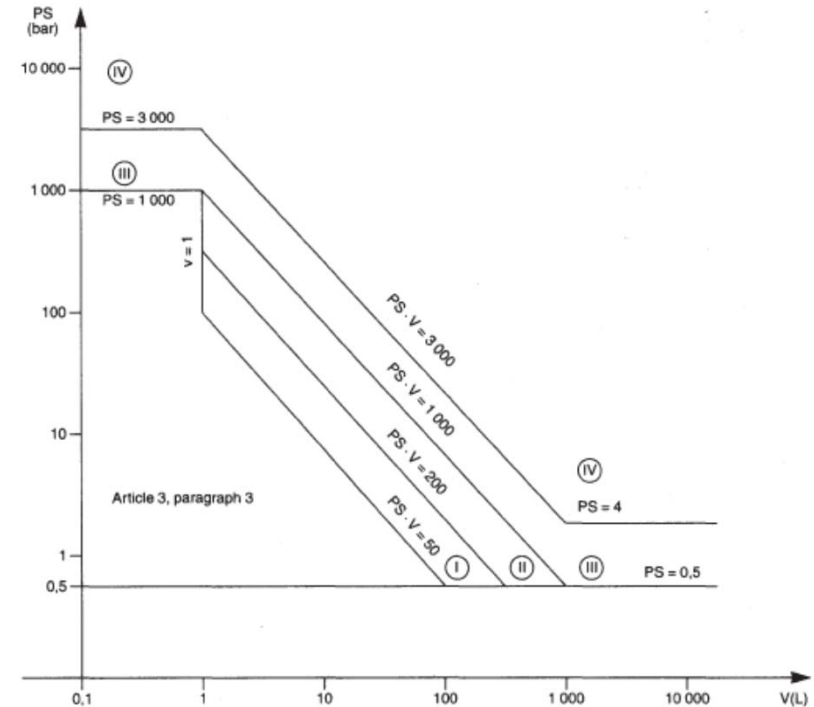
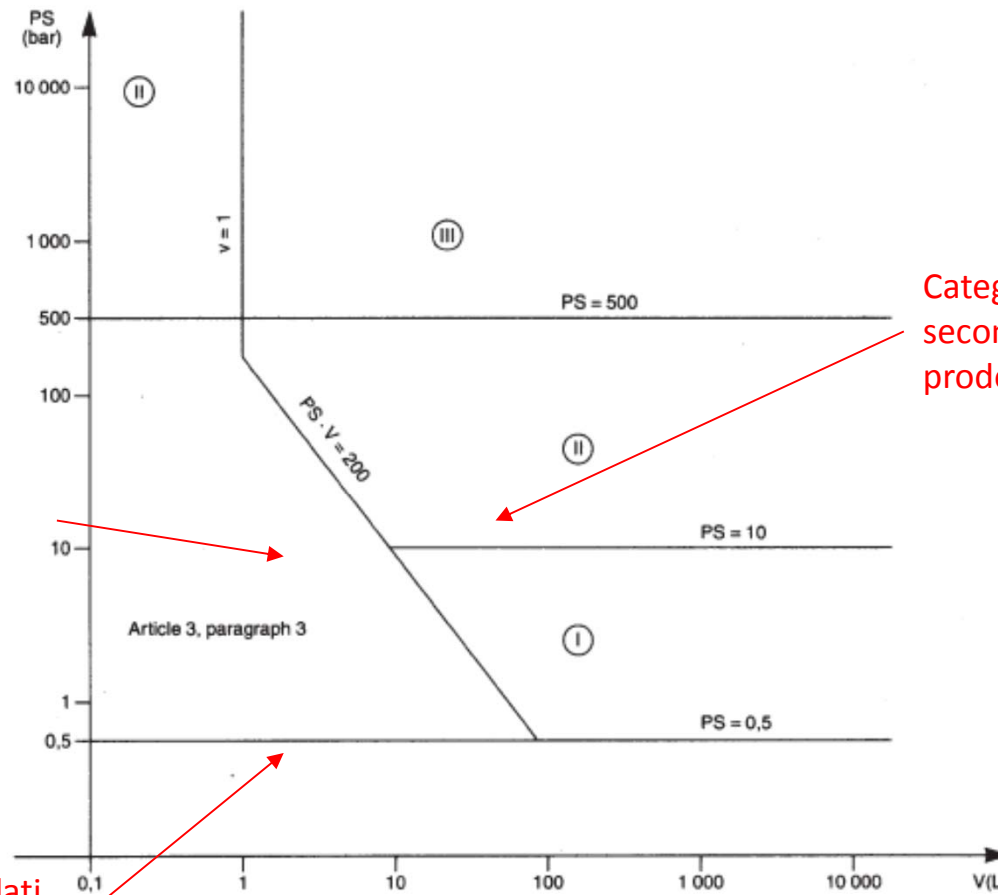


Table 2



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/6 Liquidi tipo 1 (pericolosi)



Marchio CE  
non richiesto

Categorie diverse a  
seconda del  
prodotto PS·V

Non contemplati  
dalla PED

Table 3



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/7 Confronto tra liquidi tipo 1 (pericolosi, Table 3) e tipo 2 (non pericolosi, Table 4)

Corso di "Costruzione di macchine"  
Anno accademico 2015-6

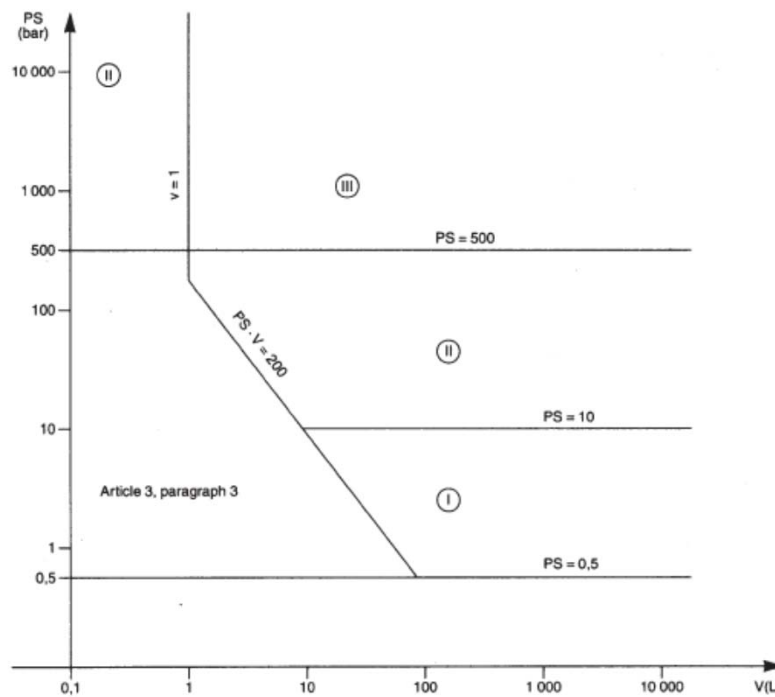


Table 3

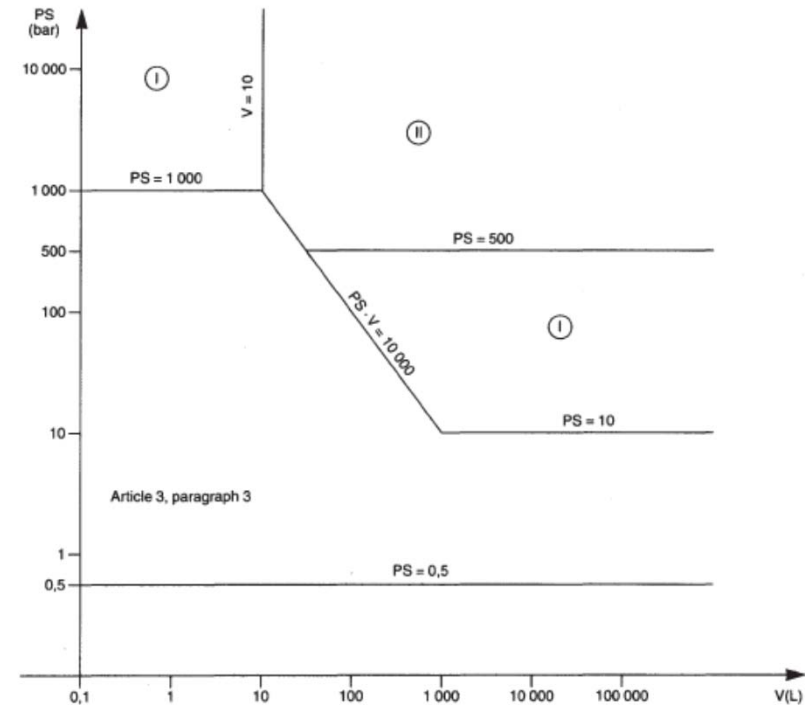


Table 4



# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/8 Confronto tra gas (Table 1) e liquidi (Table 3) tipo 1 (pericolosi)

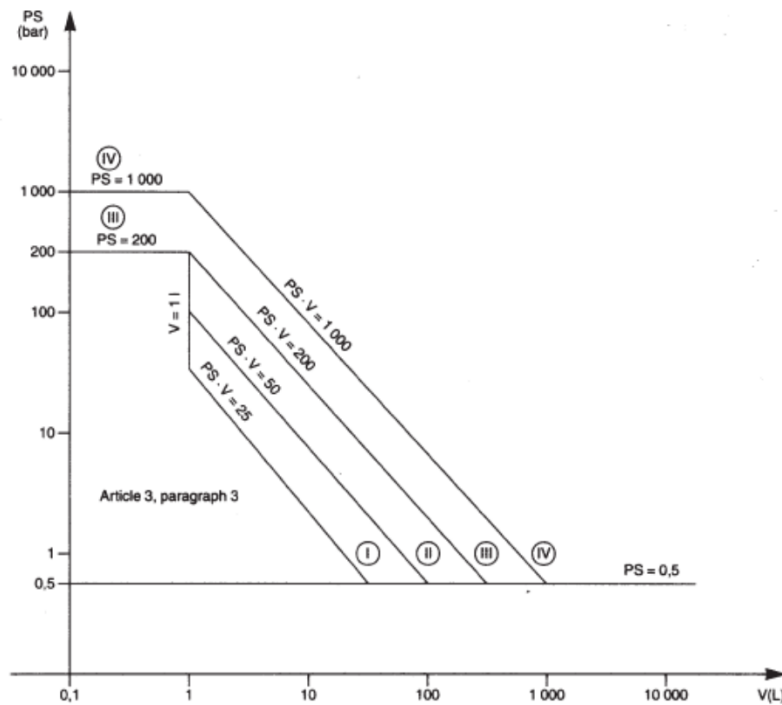


Table 1

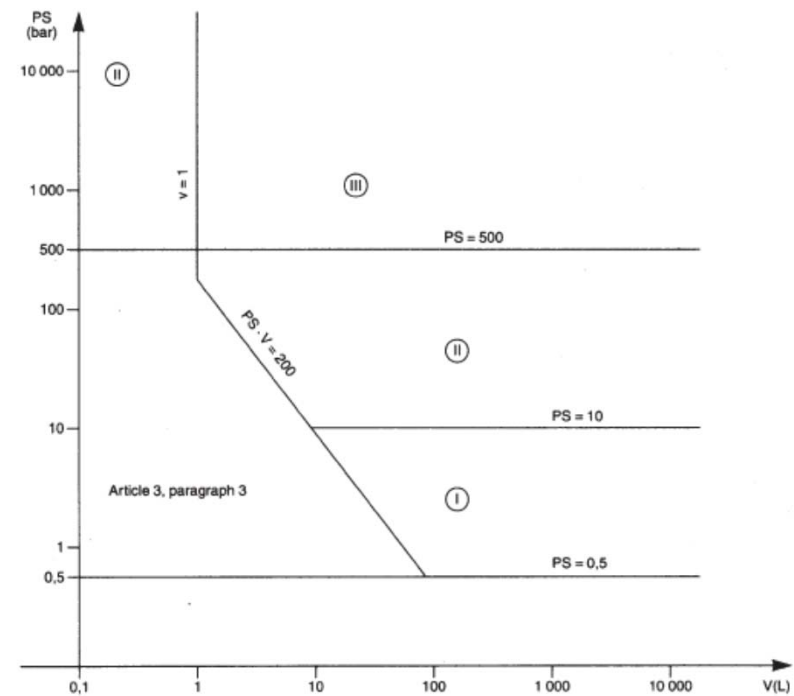


Table 3



## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Direttiva PED («Pressure Equipment Directive»)/9

- 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.





## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Esempi di rotture/1

Esplosione per surriscaldamento (bombola di gas propano)

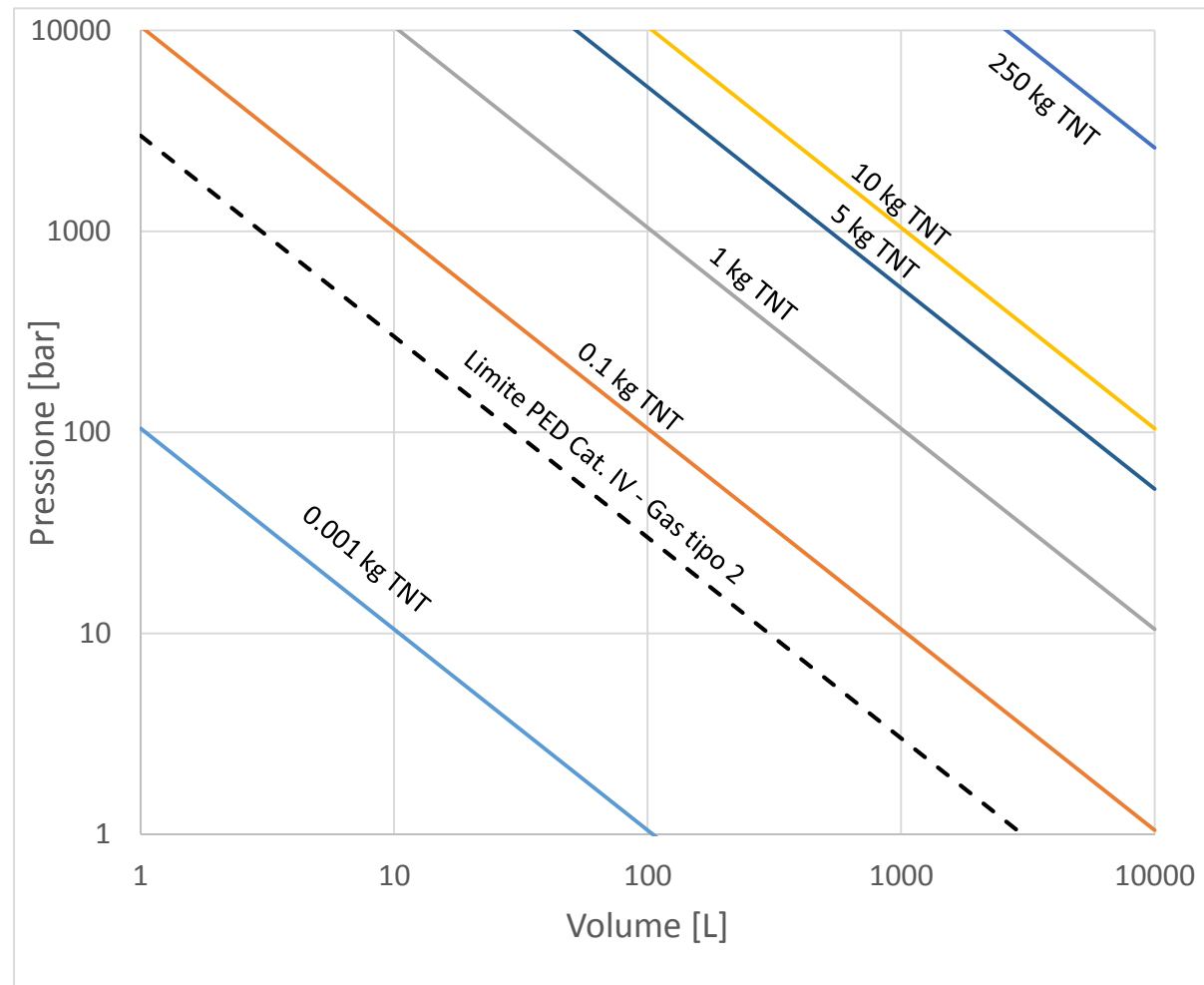




## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Esempi di rotture/2

L'energia rilasciata nell'esplosione di un recipiente può essere notevole:





## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

### Esempi di rotture/3

Frattura, generalmente dovuta a:

- Tenacità materiale insufficiente
- Tenso-corrosione
- Stati di autotensione
- Fratture preesistenti (da saldatura)
- Temperatura di prova troppo bassa
- Mancata o insufficiente manutenzione
- Errori di fabbricazione (Es. «peaked welds»)

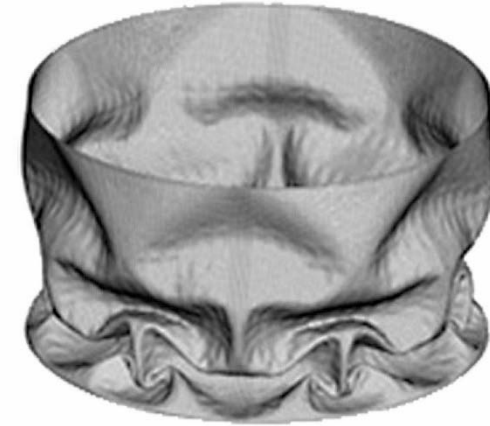




# Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

## Esempi di rotture/4 Cedimento per «buckling» assiale

«buckling»  
assiale di  
guscio sottile



«buckling»  
da carichi  
sismici





## Lezioni su "Boiler and Pressure Vessel"

Esempi di rotture/5

Cedimento per «buckling» da pressione esterna

