

INTEGRITÀ STRUTTURALE E FITNESS-FOR-SERVICE



Ing. Lorenzo Scano
Studio Scano Associato

Piazzale Chiavris, 66
33100 – Udine, ITALY (EU)

SICUREZZA IMPIANTI INDUSTRIALI A PRESSIONE
Aspetti Normativi, Tecnici e Buone Prassi
23 Maggio 2018 - Confindustria Udine – Largo Carlo Melzi, 2 - Udine

VERIFICHE DI INTEGRITÀ: IL D.M. 329/04

- Le attrezzature a pressione in regime di verifica periodica sono assoggettate all'art. 12 D.M. 329/04: verifiche di integrità decennali
- La verifica di integrità è destinata a:
 - Eseguire gli opportuni controlli visivi e strumentali sulle membrature (comma 1)
 - Valutare, nel caso, l'entità del danno, la sua origine e l'ulteriore esercibilità sicura dell'attrezzatura (comma 2)



VERIFICHE DI INTEGRITÀ: FINALITÀ

- **Identificare i potenziali meccanismi di danno**
- Eseguire gli opportuni Controlli Non Distruttivi (CND) sull'attrezzatura
- **Valutare la stabilità strutturale in relazione ai vari meccanismi di danno**
- **Calcolare la vita residua dell'apparecchiatura (esercibilità sicura)**
- Definire il piano di ricontrollo



MECCANISMI DI DANNO E PIANO DI CONTROLLO

- **Analisi preliminare** e identificazione dei meccanismi di danno:
 - Danni potenzialmente agenti
 - Storico riferito dall'Utilizzatore
- Fattori che influenzano il danneggiamento degli apparecchi a pressione:
 - **Fluido di lavoro** (perdita di metallo, danno da idrogeno, attacchi chimici, ecc.)
 - **Condizioni ambientali** (perdita di metallo, frattura fragile, ecc.)
 - **Condizioni di esercizio** (fatica, creep, ecc.)
 - Azioni meccaniche (solchi, ammaccature, disallineamenti, ecc.)
 - **Incidenti e anomalie** (danno da incendio, ecc.)
- **Ad ogni attrezzatura i suoi meccanismi di danno!**

MECCANISMI DI DANNO E PIANO DI CONTROLLO

- **Piano di controllo:** assegna ai meccanismi di danno individuati la metodica di controllo idonea alla caratterizzazione del difetto e ne definisce l'estensione



Accumulatore:

- Corrosione

CND:

- Esame visivo
- Spessimetria



Propulsore polveri:

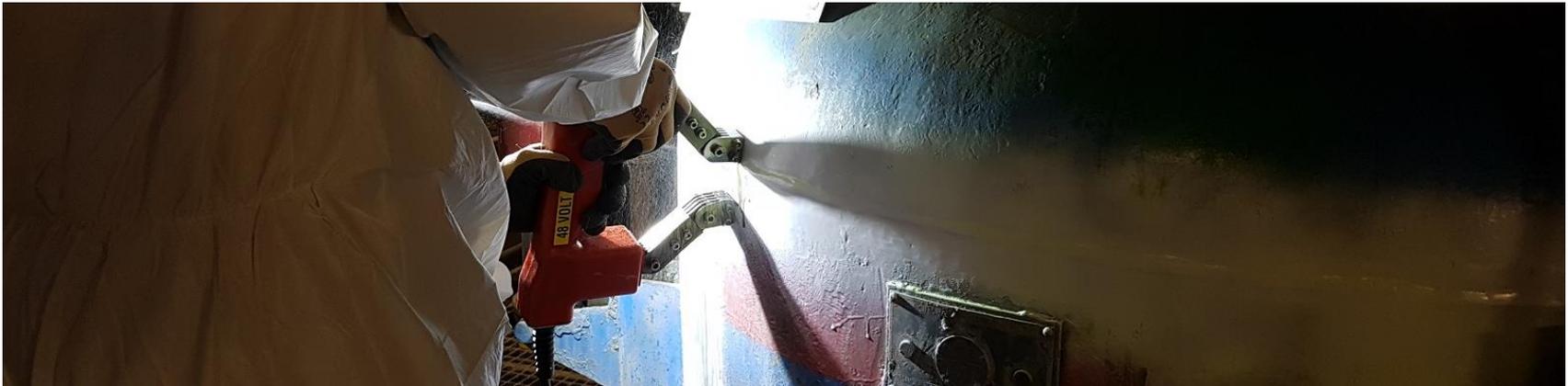
- Corrosione
- Erosione
- Pitting
- Fatica

CND:

- Esame visivo
- Spessimetria
- Pit-gauge
- Magnetoscopia

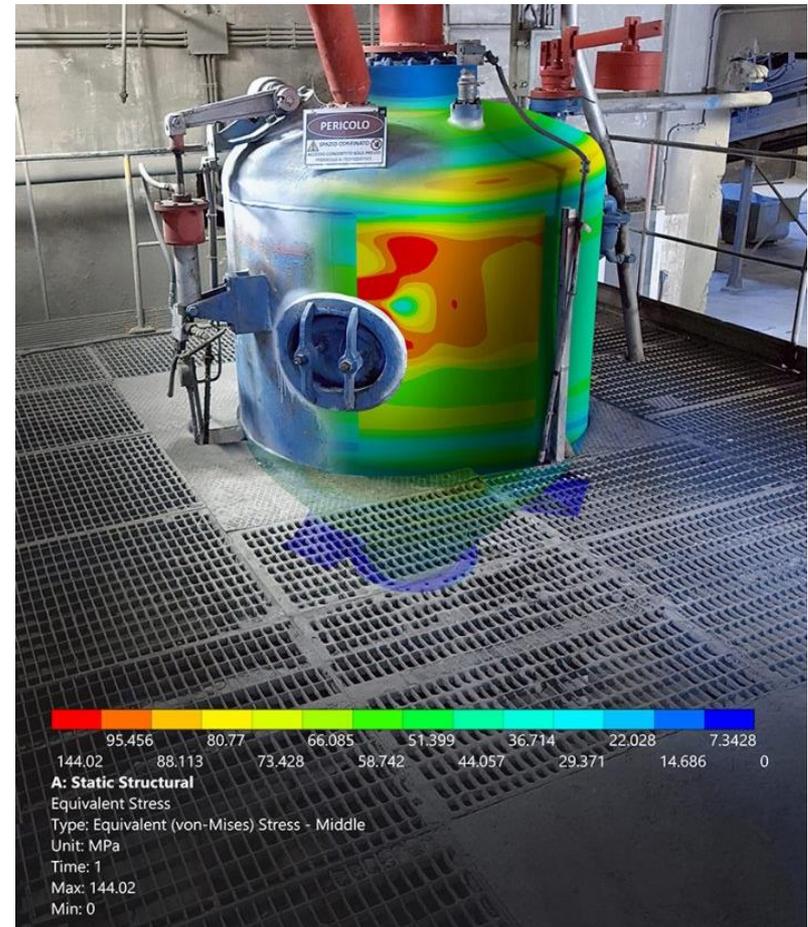
CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

- **Dato di input fondamentale** per l'analisi di integrità!
- **Caratterizzazione del difetto (meccanismo di danno) e output:**
 - Perdita di metallo → spessore residuo
 - Pitting corrosion → profondità e spacing crateri
 - Cricche e difetti → posizione e dimensione
 - Alterazioni metallurgiche → durezza, repliche, ecc.
 - ...



ANALISI DI INTEGRITÀ STRUTTURALE

- Valuta se il difetto caratterizzato tramite CND è compatibile con le condizioni di esercizio. **Se sì, per quanto tempo?**
- **Input:**
 - Esiti CND
- **Output:**
 - Vita residua
 - Ricontrollo
 - Azioni correttive:
 - Repair
 - Rerate
 - Retire



METODICHE FITNESS-FOR-SERVICE

- **Se il difetto rientra nei limiti di progetto**, e.g., perdita di spessore nei limiti del sovrasspessore di corrosione:

- Calcolo vita residua R_{life} tramite corrosion rate (API 510/570):

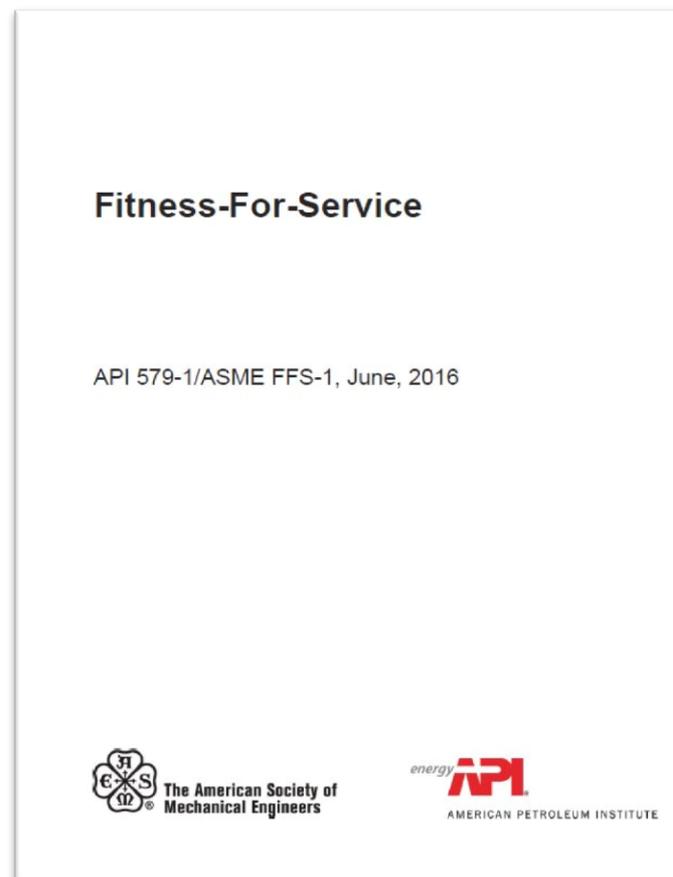
$$C_{r,LT} = (t_n - t_{am,T_1})/T_1$$

$$C_{r,ST} = (t_{am,T_1} - t_{am,T_2})/(T_2 - T_1)$$

- Calcolo intervallo di ricontrollo = $\frac{1}{2} R_{life}$
 - Sorveglianza
- **Se il difetto esce dai limiti di progetto**, e.g., forti perdite di spessore, cricche, difetti di varia natura:
 - **Fitness-For-Service (idoneità al servizio)**

METODICHE FITNESS-FOR-SERVICE

- L'approccio Fitness-For-Service permette di valutare la vita residua di componenti a pressione danneggiati al di fuori dei limiti di progetto
- Metodiche **cost-effective**: pianificazione razionale degli interventi di manutenzione degli impianti industriali
- Codice di riferimento per la valutazione FFS di attrezzature a pressione in esercizio: **API 579-1 / ASME FFS-1 (2016)**



METODICHE FITNESS-FOR-SERVICE

- Concetti chiave in ambito FFS:
 - **Maximum Allowable Working Pressure (MAWP):**
 - Pressione di lavoro massima ammissibile in funzione delle condizioni di progetto e/o esercizio e in presenza di difetti
 - **Remaining Strength Factor (RSF):**
 - Definisce l'accettabilità di un componente danneggiato:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}}$$

L_{DC}/L_{UC} : carico limite del componente danneggiato e non danneggiato determinato tramite analisi limit load o elasto-plastica

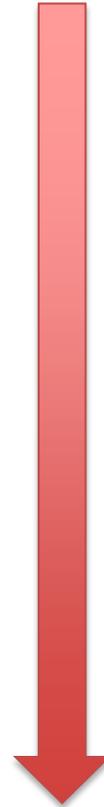
- Valore ammissibile: $RSF_a = 0.9 \rightarrow$ MAWP ridotta in condizioni di danno:

$$MAWP_r = MAWP \cdot \frac{RSF}{RSF_a}, \quad RSF < RSF_a$$

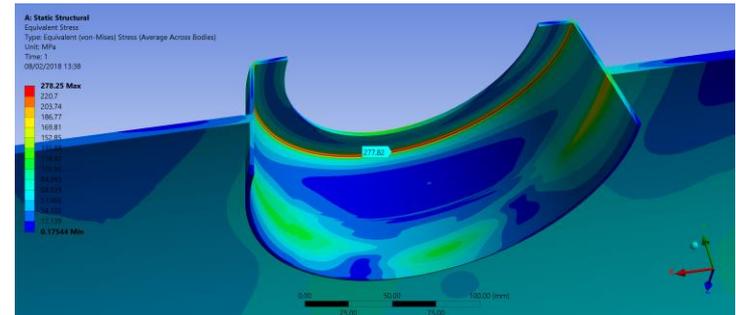
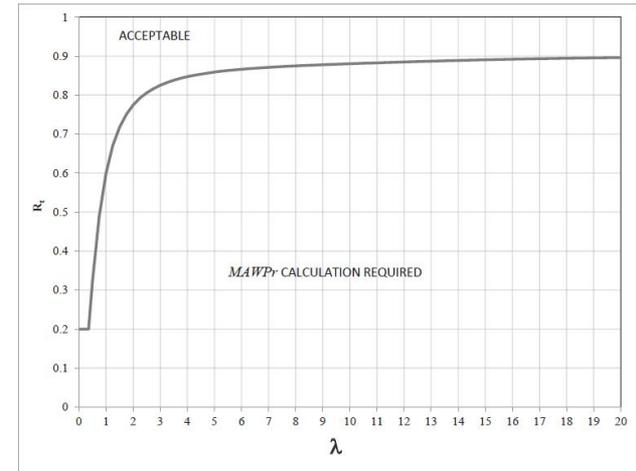
$$MAWP_r = MAWP, \quad RSF \geq RSF_a$$

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

- Assessment Level:
 - Level 1: by-tables (semplice, economico, conservativo, **basse vite residue**)
 - Level 2: by-formulas (intermedio)
 - Level 3: by-analysis (complesso, costoso, alto dettaglio: **alte vite residue**)

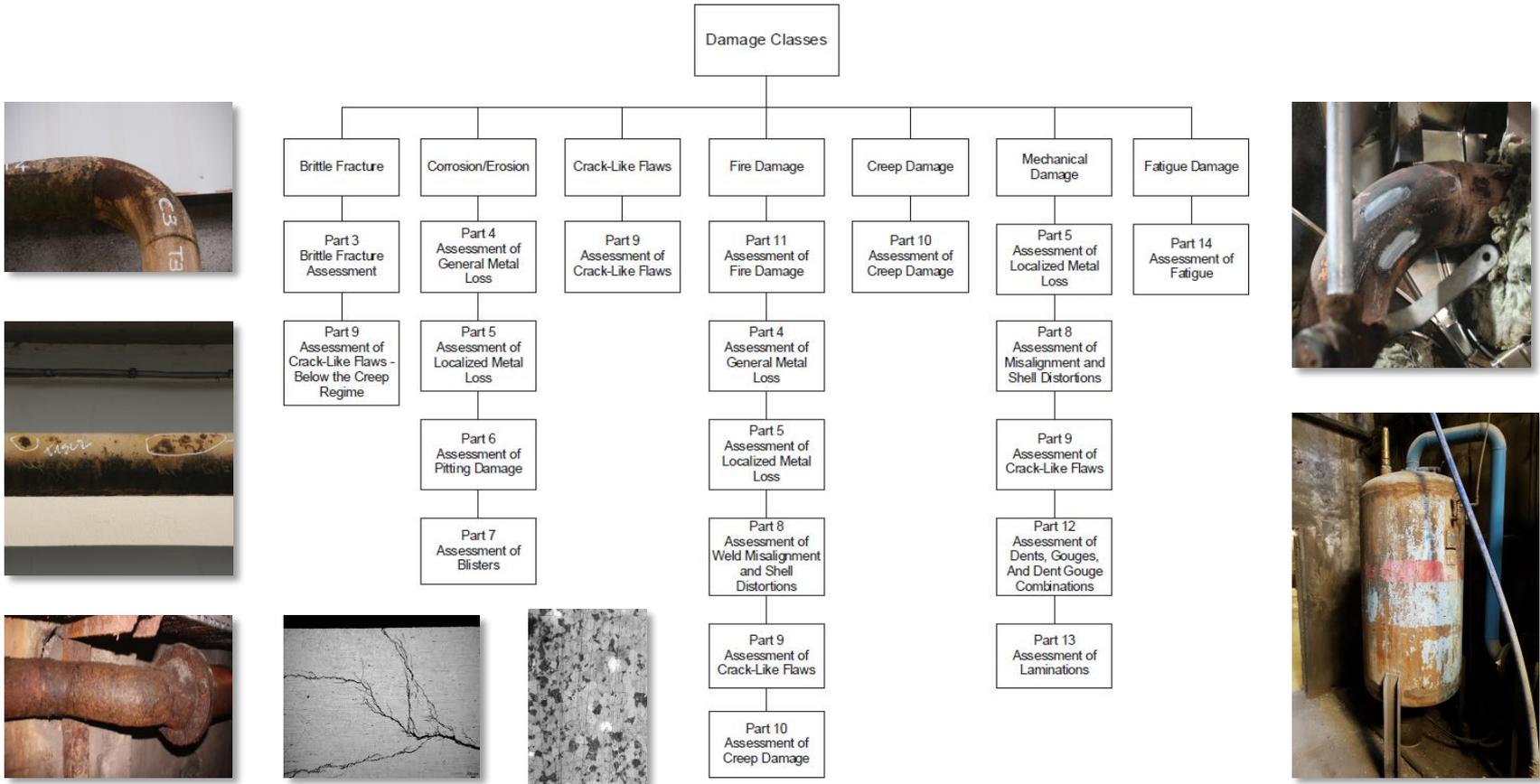


Complessità
Costi
Vite residue



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

Workflow per la valutazione FFS del danneggiamento:



SICUREZZA IMPIANTI INDUSTRIALI A PRESSIONE

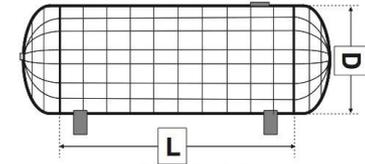
Aspetti Normativi, Tecnici e Buone Prassi

23 Maggio 2018 - Confindustria Udine – Largo Carlo Melzi, 2 - Udine

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

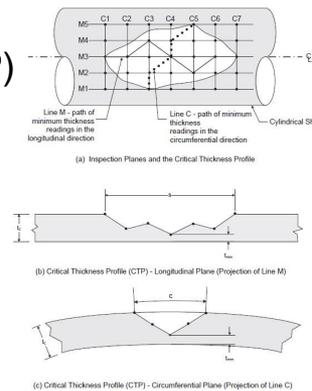
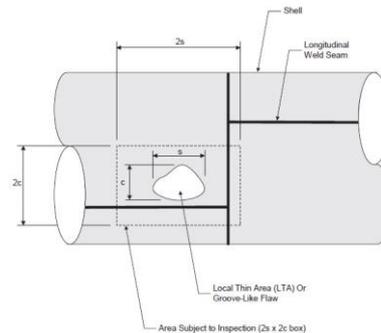
API 579-1 Sec. 4/5: Perdita di metallo generalizzata/localizzata

- Componenti soggetti a corrosione e/o erosione
- Base di partenza: CND di tipo spessimetrico (UTS):
 - Linee Guida INAIL 2012 (definizione reticolo)
 - Rilievi puntuali (PTR):
 - t_{mm} (spessore minimo)
 - t_{am} (spessore medio)
 - COV (Coefficiente di Variazione = dev. standard / media)
 - Perdita generalizzata: $COV \leq 10\%$
 - Se la perdita è localizzata: reticolo di dettaglio (CTP)



| Mantello | | | |
|--------------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------------|
| Dimensioni massime della maglia base | | | |
| Condizione | Plong. [mm] | Condizione | P_{circ}^0 [mm] |
| $L \leq 1000$ mm | $L / 4$ | $\pi D \leq 1000$ mm | $\pi D / 4$ |
| $1000 < L \leq 1500$ mm | $L / 5$ | $1000 < \pi D \leq 1500$ mm | $\pi D / 5$ |
| $1500 < L \leq 3000$ mm | $L / 6$ | $1500 < \pi D \leq 3000$ mm | $\pi D / 6$ |
| $L > 3000$ mm | L / n^2 | $\pi D > 3000$ mm | $\pi D / m^0$ |

Tab. 2 – Valori massimi ammissibili della maglia base per il mantello.



Notes:
1. M1 – M5 are meridional (longitudinal) inspection planes.
2. C1 – C7 are circumferential inspection planes.



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 4: Perdita di metallo generalizzata

- Due possibili approcci:
 - $COV \leq 10\%$ - PTR rilievo puntuale
 - $COV > 10\%$ - CTP «Critical Thickness Profiles»:
 - Profili di minimo spessore
 - I valori sono mediati su una lunghezza L:

Diametro interno e spessore nominale nella zona corrosa, pesati con FCA_{ml}

$$L = Q \sqrt{D_{ml} \cdot t_{ml}}$$

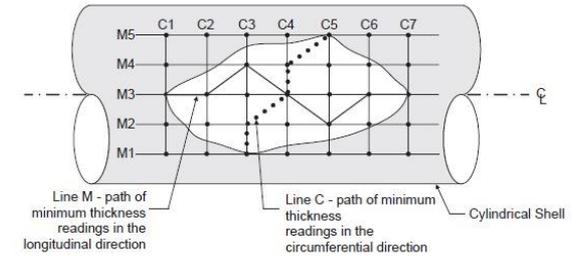
Q dipende da RSF_a

• Margine di corrosione futura (FCA/FCA_{ml}):

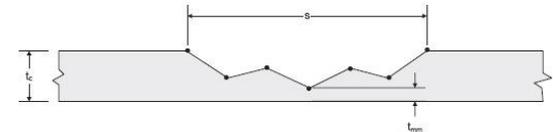
- Funzione dei tassi di corrosione API 510:

$$C_{r,LT} = (t_n - t_{am,T_1})/T_1$$

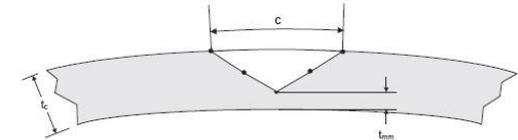
$$C_{r,ST} = (t_{am,T_1} - t_{am,T_2})/(T_2 - T_1)$$



(a) Inspection Planes and the Critical Thickness Profile



(b) Critical Thickness Profile (CTP) - Longitudinal Plane (Projection of Line M)



(c) Critical Thickness Profile (CTP) - Circumferential Plane (Projection of Line C)

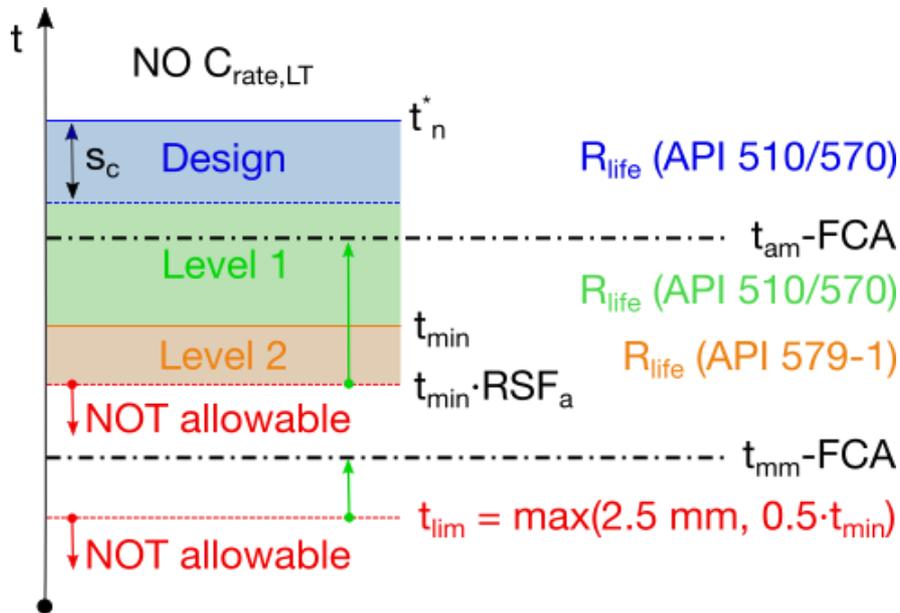
Notes:

1. M1 – M5 are meridional (longitudinal) inspection planes.
2. C1 – C7 are circumferential inspection planes.

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 4: Perdita di metallo generalizzata

- API 579-1: Sec.4: Assessment Level 1/2:



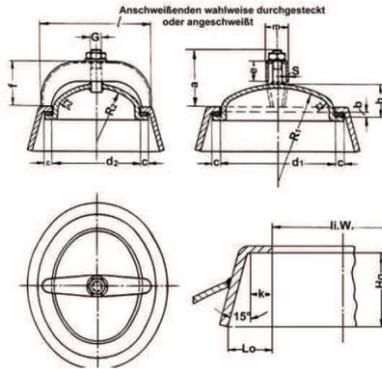
- Non viene calcolato il fattore RSF
- L'accettabilità è basata su RSF_a e sullo spessore minimo a calcolo t_{min}
- Viene calcolata la $MAWP_r$
- Vita residua:

$$R_{life} = \frac{t_{am} - t_{min}}{C_{r,LT/ST}}$$

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 4: Perdita di metallo generalizzata

- API 579-1: Sec.4: Assessment Level 3: Case Study

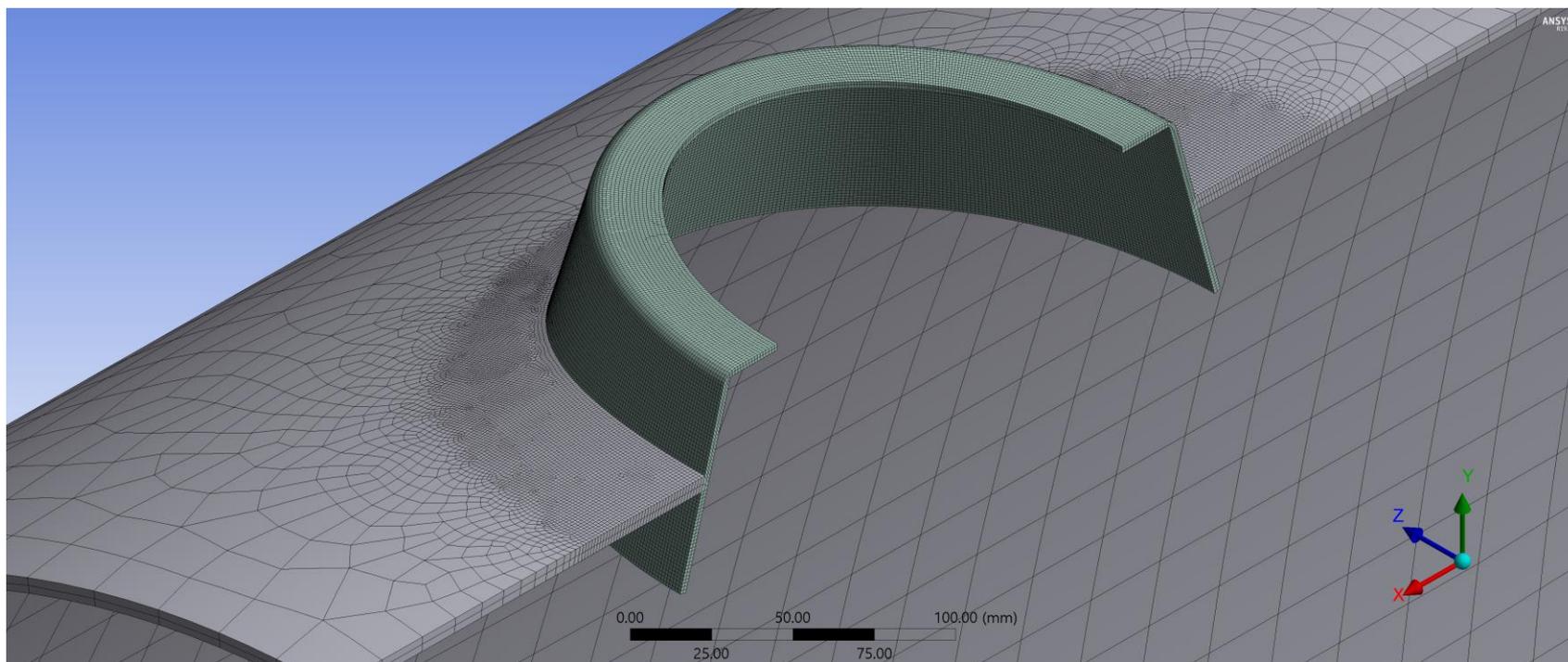


- Passo di mano GDV
- Importante corrosione
- Fuori progetto:
 - $t_n = 6.5 \text{ mm}$
 - $t_{mm} = 4.2 \text{ mm}$
- Geometria non-standard
- Massima vita residua
- **Level 3 Assessment**

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 4: Perdita di metallo generalizzata

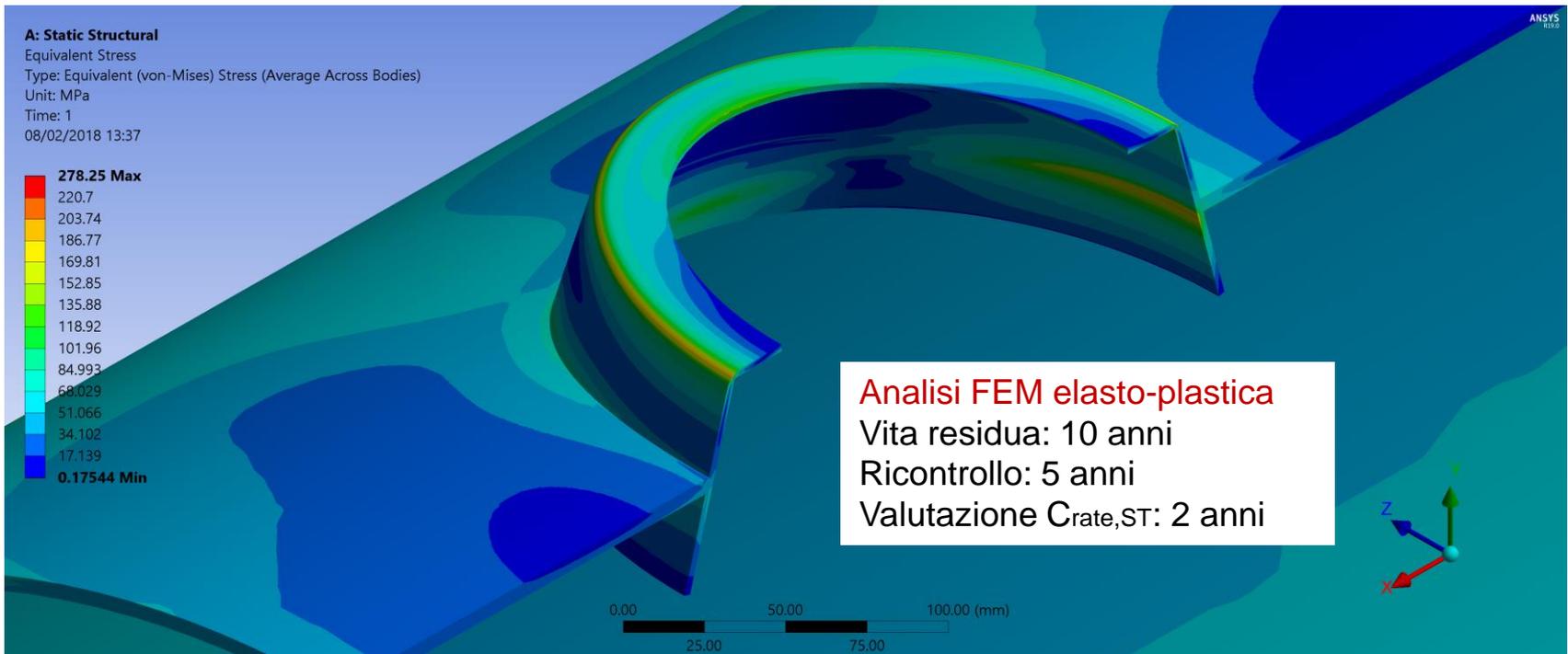
- API 579-1: Sec.4: Assessment Level 3: Case Study



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 4: Perdita di metallo generalizzata

- API 579-1: Sec.4: Assessment Level 3: Case Study



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 5: Perdita di metallo localizzata

- Valutazione più precisa del difetto rispetto alla Sec. 4
- I CTP sono il punto di partenza dell'analisi
- L'approccio è basato sul calcolo di RSF:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_c}$$

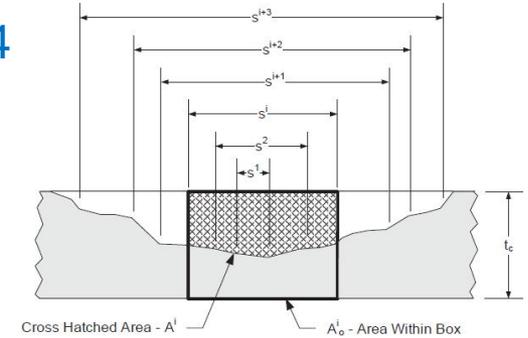
$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_c}}$$

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)}$$

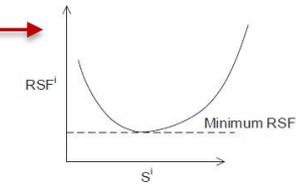
Level 1

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)}$$

Level 2

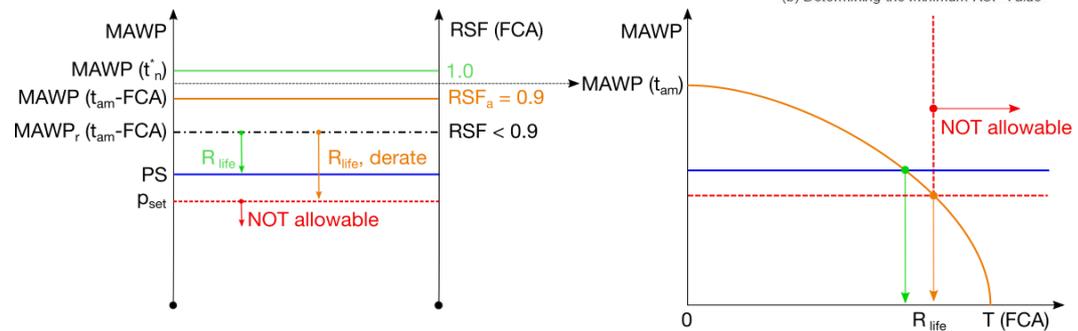
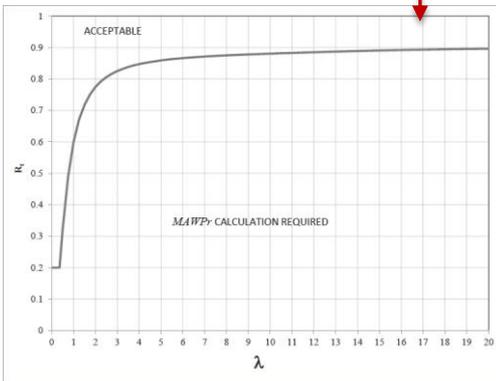


(a) Subdivision Process for Determining the RSF



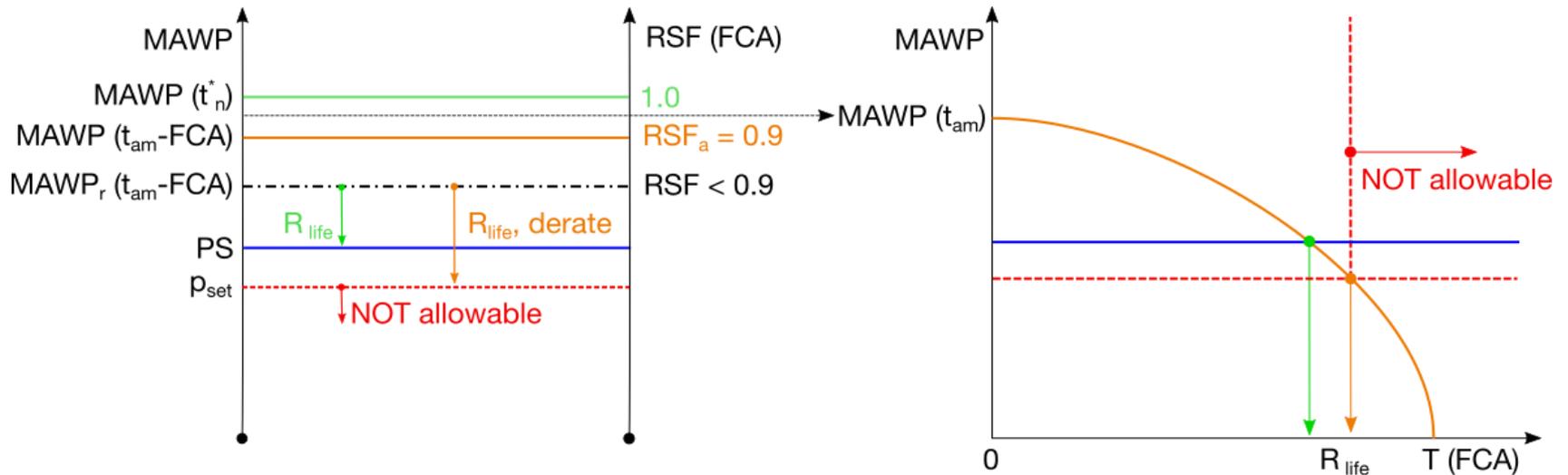
(b) Determining the Minimum RSF Value

Calcolo MAWP e MAWP_r



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

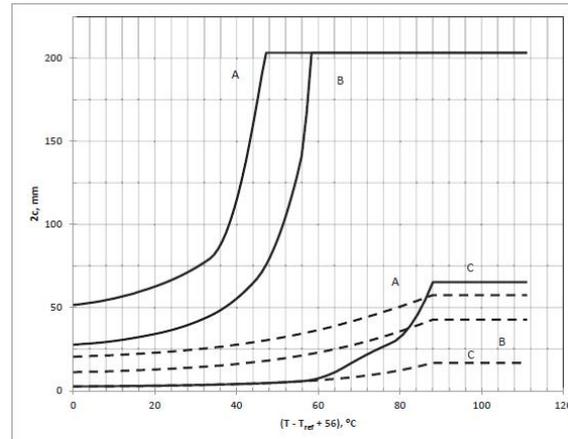
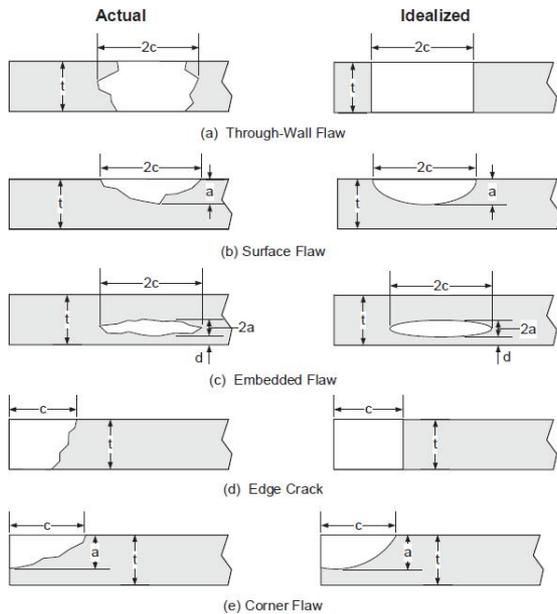
- **Calcolo MAWP e MAWP_r**: metodica universale per la valutazione dei difetti in ambito FFS (non solo perdita di metallo!)
- **Permette di prendere decisioni:**
 - **Repair**
 - **Rerate (derate)**
 - **Retire**



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 9: Cricche «Crack-Like Flaws»

- Valutazione dei difetti affilati (cricche) nei componenti a pressione
- Metodi basati sulla **meccanica della frattura**
- **Level 1: screening della dimensione del difetto tramite curve**



Notes:

1. Definition of Screening Curves (solid line 1/4-t flaw, dashed line 1-t flaw):

A - Allowable flaw size in base metal.

B - Allowable flaw size in weld metal that has been subject to PWHT.

C - Allowable flaw size in weld metal that has not been subject to PWHT.

2. Crack dimension for a 1-t and 1/4-t flaw are shown in Annex 9B, Figures 9B.11 & 9B.15.

3. See paragraph 9.2.2.1 for restrictions and limitations.

4. Guidelines for establishing the Reference Temperature, T_{ref} , are covered in paragraph 9.4.2.2.e.

5. The maximum permitted flaw length from this curve is $2c = 200 \text{ mm}$.

Figure 9.13M - Level 1 Assessment - Cylinder, Longitudinal Joint, Crack-Like Flaw Parallel to the Joint

- Basato unicamente sulla dimensione del difetto (CND)
- Semplice e rapido!
- Screening funzione del componente e del posizionamento del difetto

API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 9: Cricche «Crack-Like Flaws»

- Level 2: Metodo di assessment:

- Calcolo dello stato di sforzo nel componente privo di difetto e classificazione
- Determinazione delle caratteristiche del materiale: resistenza e tenacità (K_{mat})
- Calcolo del reference stress (funzione del componente e della posizione del difetto):

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \left[P_b^2 + 9(M_s \cdot P_m \cdot (1-\alpha)^2)^2 \right]^{0.5}}{3(1-\alpha)^2} \quad M_s = \frac{1.0}{1.0-\alpha}$$

$$\alpha = \frac{a}{t}$$

- Calcolo del Load Ratio da utilizzare come ascissa nel diagramma FAD:

$$L_r^P = \sigma_{ref}^P / \sigma_y$$

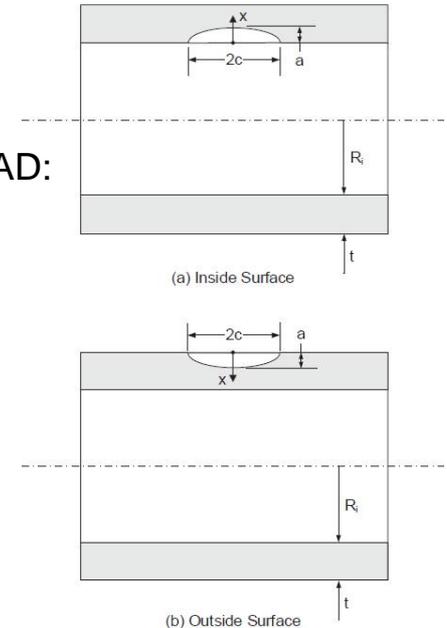
- Calcolo dello Stress Intensity Factor:

Inside Surface, crack face pressure loading is included:

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left(\frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\pi a}$$

Outside Surface:

$$K_I = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[2G_0 + 2G_1 \left(\frac{a}{R_o} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_o} \right)^2 + 4G_3 \left(\frac{a}{R_o} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_o} \right)^4 \right] \sqrt{\pi a}$$



API 579-1 FITNESS-FOR-SERVICE

API 579-1 Sec. 9: Cricche «Crack-Like Flaws»

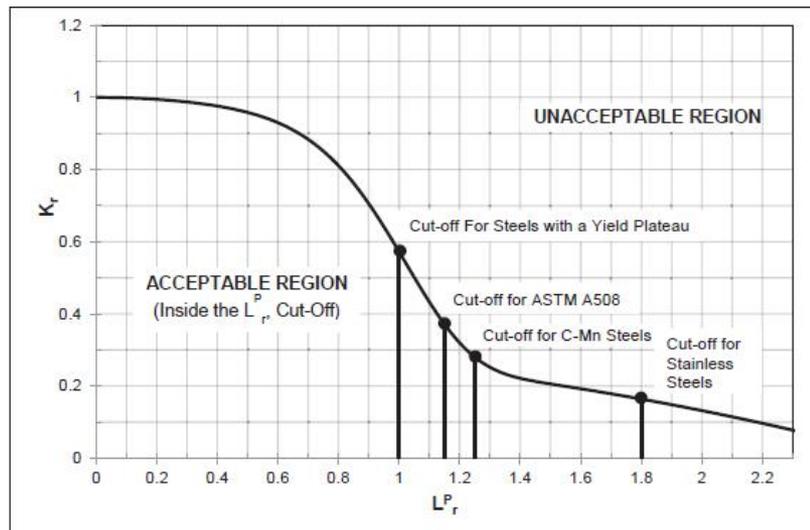
- Level 2: Metodo di assessment:

- Calcolo del rapporto di tenacità K_r da usare come ordinata nel diagramma FAD:

Fattore di interazione plastica \longrightarrow

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}}$$

- Determinazione del diagramma FAD e valutazione del componente:



Notes:

- The FAD is defined using the following equation:

$$K_r = (1 - 0.14(L_r^p)^2) \left(0.3 + 0.7 \exp[-0.65(L_r^p)^6] \right) \quad (\text{for } L_r^p \leq L_{r(\max)}^p) \quad (9.22)$$

- The extent of the FAD on the L_r^p axis is determined as follows:

- $L_{r(\max)}^p = 1.00$ for materials with yield point plateau (strain hardening exponent > 15),
- $L_{r(\max)}^p = 1.15$ for ASTM A508,
- $L_{r(\max)}^p = 1.25$ for C-Mn steels,
- $L_{r(\max)}^p = 1.80$ for austenitic stainless steels, and

- $L_{r(\max)}^p = \frac{\sigma_f}{\sigma_{ys}}$ for other materials where σ_f flow stress and σ_{ys} yield stress (see [Annex 2E](#)); the flow stress and yield stress are evaluated at the assessment temperature.
- $L_{r(\max)}^p = 1.0$ if the strain hardening characteristics of the material are unknown.

- The value of $L_{r(\max)}^p$ may be increased for redundant components (see [Annex 9C, paragraph 9C.2.5.2.b](#)).

- If $L_{r(\max)}^p = 1.0$, then the FAD may be defined using following equation:

$$K_r = (1.0 - (L_r^p)^{2.5})^{0.20} \quad (9.23)$$

CONCLUSIONI



- La verifica di integrità (art. 12 D.M. 329/04) ha il fine di valutare la stabilità strutturale di un apparecchio in relazione a uno o più meccanismi di danno e la sua esercibilità
- CND e Fitness-For-Service forniscono una base razionale e codificata per:
 - Caratterizzare i danneggiamenti
 - Valutare la stabilità
 - Calcolare la vita residua
 - Determinare l'intervallo di ricontrollo
 - Prendere decisioni
 - Ottimizzare i costi di manutenzione e gestione degli impianti a pressione