



Misure Meccaniche e Collaudi

(A. A. 2020/21)

Introduzione alle prove non distruttive

(PnD, CnD, NdT)

M. De Lucia / D. Vangi



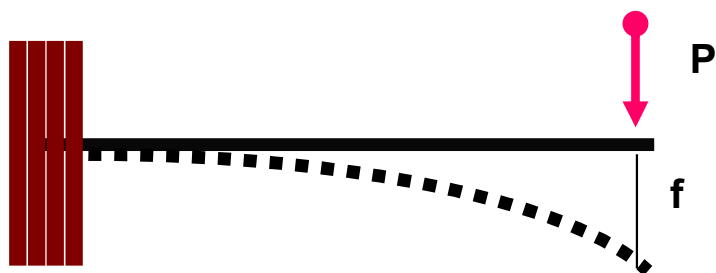
Meccanica dei continui lineari elastici

- **Continuo**, omogeneo isotropo
- Trasformazioni **reversibili**, lineari
- **Tempo indipendente**
- Equazioni di equilibrio
- Equazioni di congruenza
- Condizioni di vincolo; equazioni costitutive

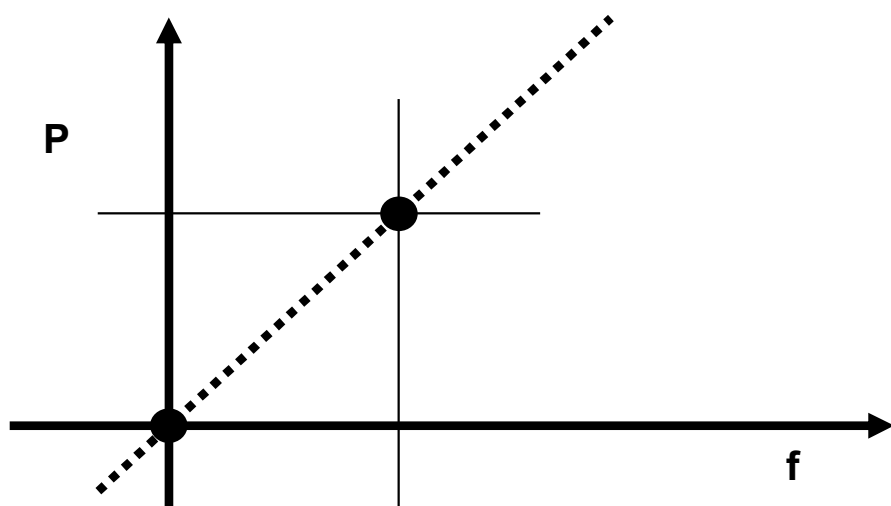
Materiali – lineari elastici

- **Continuo** = privo di discontinuità
- Omogeneo = ugualmente costituito in tutti i suoi punti
- Isotropo = ugualmente costituito in tutte le direzioni uscenti da ogni suo punto
- **Lineare** = effetti proporzionali alle cause
- Elastico = trasformazioni “causa – effetto” reversibili

Meccanica dei continui lineari elastici



$$f = \frac{1}{3} \frac{Pl^3}{EJ}$$





Ogni struttura (materiale) soggetta alle sue normali condizioni operative si degrada riducendo nel tempo il suo livello di integrità strutturale

Integrità strutturale: capacità di assolvere

- alla funzione (strutturale) prevista
- nel modo e nelle condizioni previste
- per il tempo previsto



Integrità strutturale

Il deterioramento dell'integrità strutturale si manifesta solitamente con la comparsa di difetti di vario genere.

Già durante la fase della fabbricazione si possono generare difetti a causa dei processi di fabbricazione (es. saldatura, fusione, etc.).

I controlli non distruttivi hanno lo scopo di permettere l'individuazione di eventuali difetti presenti nella struttura.

I CnD non sono una semplice misura ma un processo diagnostico che mira alla valutazione dell'integrità strutturale.

Integrità strutturale

Non sempre si tiene conto della presenza di difetti, come nel caso della progettazione a vita infinita.

In altri casi si segue l'approccio detto *safe-life*, basato cioè sulla previsione di una vita finita del componente.

In alcuni casi è necessario accettare la presenza di difetti e tenere conto della loro eventuale pericolosità mediante un approccio *fail-safe* (si accetta la presenza di difetti, valutandone la pericolosità) oppure *damage tolerant* (vengono usati i parametri della Meccanica della Frattura per tenere sotto controllo i difetti e valutarne la crescita e la pericolosità).

Questo approccio richiede che si possa evidenziare la presenza di difetti e valutarne l'entità, mediante i Controlli non Distruttivi.

Ogni tecnica di controllo è caratterizzata da una minima dimensione del difetto rilevabile.

Meccanica del danno

- Tipo di danneggiamento = **effetto visibile del danno** - caratteristiche fisiche del danno che possono essere rilevate (fatica \Rightarrow **difetti**)
- Meccanismo di danneggiamento = cause e modalità di avere un danno (corrosione, fatica)



Difetto

- Esercizio \Rightarrow alternanza dei carichi \Rightarrow irreversibilità \Rightarrow meccanismi di danneggiamento \Rightarrow degrado
- Degrado = fenomeno irreversibile con cause ed effetti fortemente localizzati \Rightarrow effetto visibile (tipo di danneggiamento) \Rightarrow **difetto**
- Difetto = localizzato – irreversibile – misurabile – correlato ai meccanismi di danneggiamento ed alla entità del danno \Rightarrow parametro di controllo
- Difetto = sintesi della “storia/danneggiamento” pregressi

Difetto

- Zona danneggiata e livello di danno \Rightarrow parametro di controllo del danno / integrità strutturale \Rightarrow presenza e dimensione del difetto \Rightarrow “**difetto rilevato**”
- Max livello di danno (minimo integrità strutturale) accettabile \Rightarrow **massimo difetto accettabile**
- A / R criterio di Accettazione / Rigetto \Rightarrow **Difetto rilevato vs massimo difetto accettabile**



Classificazione dei difetti

- **Difetti di dimensioni non rilevabili**
- **Difetti di dimensioni non registrabili**
- **Difetti di dimensioni registrabili**
- **Difetti di dimensione limite accettabile**
- **Difetti non accettabili:**
 - **Accettabili perché in zona poco sollecitata**
 - **Rigettabili indipendentemente dalla posizione**



Classificazione dei difetti

- **in base all'origine:**
 - **fabbricazione**
 - **esercizio**
- **in base alla forma:**
 - **planare**
 - **volumetrica**
 - **ramificata**
 - **nube di difetti, etc.**
- **in base al tipo**
 - **cricca**
 - **delaminazione**
 - **taglio**
 - **inclusione di scoria**
 - **porosità**
 - **mancanza di materiale di apporto, etc.**



Classificazione dei difetti

- **in base alla posizione :**
 - nel materiale di base o di apporto
 - superficiale
 - sub-superficiale
 - interno

- **in base al livello:**
 - grado (dimensione del difetto)

Tables IWB-3410-1,
IWB-3510-1

1989 SECTION XI — DIVISION 1

TABLE IWB-3410-1
ACCEPTANCE STANDARDS

Examination Category	Component and Part Examined	Acceptance Standard
B-A, B-B	Vessel welds	IWB-3510
B-D	Vessel nozzle welds	IWB-3512
B-E	Partial penetration welds in vessels	IWB-3522
B-F, B-J	Dissimilar and similar metal welds in piping	IWB-3514
B-G-1	Bolting greater than 2 in. in diameter	IWB-3515
		IWB-3517
B-G-2	Bolting 2 in. in diameter and less	IWB-3517
B-H, B-K-1	Integral attachments for vessels, piping, pumps, and valves	IWB-3516
B-L-1, B-M-1	Welds in pumps and valves	IWB-3518
B-L-2, B-M-2	Pump casings and valve bodies	IWB-3519
B-N-1, B-N-2, B-N-3	Interior surfaces and internal components of reactor vessels	IWB-3520
B-O	Control rod drive housing welds	IWB-3523
B-P	Pressure retaining boundary	IWB-3522
B-Q	Steam generator tubing	IWB-3521

TABLE IWB-3510-1
ALLOWABLE PLANAR FLAWS

Material: Ferritic steels that meet the requirements of NB-2331 and G-2110(b) of Section III

Aspect Ratio, ¹ a/l	Volumetric Examination Method, Nominal Wall Thickness, ^{1,2} t , in.					
	$2\frac{1}{2}$ and less		4 to 12		16 and greater	
	Surface Flaw, ⁵ a/t , %	Subsurface Flaw, ^{3, 4} a/t , %	Surface Flaw, ⁵ a/t , %	Subsurface Flaw, ^{3, 4} a/t , %	Surface Flaw, ⁵ a/t , %	Subsurface Flaw, ^{3, 4} a/t , %
0.0	3.1	3.4Y	1.9	2.0Y	1.4	1.5Y
0.05	3.3	3.8Y	2.0	2.2Y	1.5	1.7Y
0.10	3.6	4.3Y	2.2	2.5Y	1.7	1.9Y
0.15	4.1	4.9Y	2.5	2.9Y	1.9	2.1Y
0.20	4.7	5.7Y	2.8	3.3Y	2.1	2.5Y
0.25	5.5	6.6Y	3.3	3.8Y	2.5	2.8Y
0.30	6.4	7.8Y	3.8	4.4Y	2.9	3.3Y
0.35	7.4	9.0Y	4.4	5.1Y	3.3	3.8Y
0.40	8.3	10.5Y	5.0	5.8Y	3.8	4.3Y
0.45	8.5	12.3Y	5.1	6.7Y	3.9	4.9Y
0.50	8.7	14.3Y	5.2	7.6Y	4.0	5.6Y

NOTES:

- (1) For intermediate flaw aspect ratios a/l and thickness t , linear interpolation is permissible. Refer to IWA-3200(b).
- (2) Component thickness t is measured normal to the pressure retaining surface of the component. Where the section thickness varies, the average thickness over the length of the planar flaw is the component thickness.
- (3) The total depth of a subsurface flaw is $2a$.
- (4) $Y = [(S/t)/(a/t)]$ or (S/a) . Y is the flaw-to-surface proximity factor, and S is defined in IWA-3310 and IWA-3320. If $S < 0.4d$, the subsurface flaw is classified as a surface flaw. If $Y > 1.0$, use $Y = 1.0$.
- (5) Applicable to flaws in surface region B-E shown in Fig. IWB-2500-5 only if the maximum postulated defect of G-2120, Appendix G of Section III, is justified. If a smaller defect is used, refer to IWB-3410.2.

Sistema Ispezioni

- Qualificazione del personale (I , II, III livello) Qualificazione del laboratorio / struttura operativa che esegue l'ispezione
- Conoscenza dell'impianto su cui si effettua l'ispezione: disegni, materiale; normative (di progetto, di fabbricazione, di installazione); condizioni operative; rilevanza del componente, ecc.
- Piano delle ispezioni; tecnica e procedure di ispezione; modalità di gestione dei dati (criteri di A/R); ecc



Norme

Suddivisione in livelli e sistema di certificazione

- **I livello: esecuzione dell'esame;**
- **II livello: interpretazione dei risultati e valutazione di rispondenza alle specifiche;**
- **III livello: organizzazione del sistema di PnD, stesura specifiche e procedure, addestramento del personale.**

La suddivisione nei 3 livelli si applica a ciascuna tecnica di PnD.



Norme

UNI EN ISO 9712:

NORMA EUROPEA	Prove non distruttive Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive	UNI EN ISO 9712
		LUGLIO 2012
	Non-destructive testing Qualification and certification of NDT personnel	
	La norma stabilisce i principi per la qualificazione e la certificazione del personale incaricato di effettuare prove non distruttive (PND) in campo industriale. Il termine "industriale" implica l'esclusione delle applicazioni nel campo della medicina.	



Norme

Levels of qualification

UNI EN ISO 9712:

6.1 Level 1

6.1.1 An individual certified to Level 1 has demonstrated competence to carry out NDT according to written instructions and under the supervision of Level 2 or Level 3 personnel. Within the scope of the competence defined on the certificate, Level 1 personnel may be authorized by the employer to perform the following in accordance with NDT instructions:

- a) set up NDT equipment;
- b) perform the tests;
- c) record and classify the results of the tests according to written criteria;
- d) report the results.

6.1.2 Level 1 certified personnel shall neither be responsible for the choice of test method or technique to be used, nor for the interpretation of test results.

Norme

UNI EN ISO 9712:

Levels of qualification

6.2 Level 2

An individual certified to Level 2 has demonstrated competence to perform NDT according to NDT procedures. Within the scope of the competence defined on the certificate, Level 2 personnel may be authorized by the employer to:

- a) select the NDT technique for the testing method to be used;
- b) define the limitations of application of the testing method;
- c) translate NDT codes, standards, specifications, and procedures into NDT instructions adapted to the actual working conditions;
- d) set up and verify equipment settings;
- e) perform and supervise tests;
- f) interpret and evaluate results according to applicable standards, codes, specifications or procedures;
- g) carry out and supervise all tasks at or below Level 2;
- h) provide guidance for personnel at or below Level 2;
- i) report the results of NDT.

Norme

Levels of qualification

UNI EN ISO 9712:

6.3 Level 3

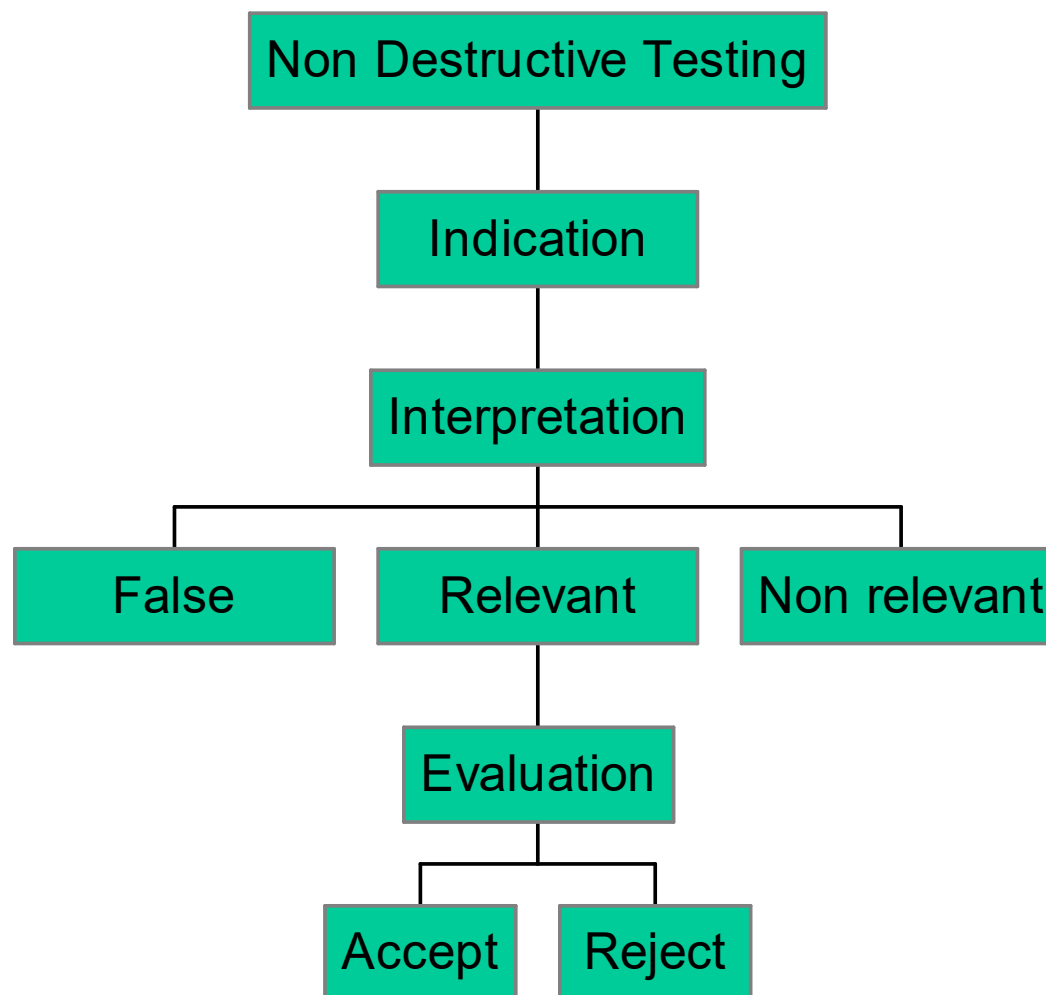
6.3.1 An individual certified to Level 3 has demonstrated competence to perform and direct NDT operations for which he is certified. Level 3 personnel have demonstrated:

- a) the competence to evaluate and interpret results in terms of existing standards, codes, and specifications;
- b) sufficient practical knowledge of applicable materials, fabrication, process, and product technology to select NDT methods, establish NDT techniques, and assist in establishing acceptance criteria where none are otherwise available;
- c) a general familiarity with other NDT methods.

6.3.2 Within the scope of the competence defined on the certificate, Level 3 personnel may be authorized to:

- a) assume full responsibility for a test facility or examination centre and staff;
- b) establish, review for editorial and technical correctness, and validate NDT instructions and procedures;
- c) interpret standards, codes, specifications, and procedures;
- d) designate the particular test methods, procedures, and NDT instructions to be used;
- e) carry out and supervise all tasks at all levels;
- f) provide guidance for NDT personnel at all levels.

Ispezione \Rightarrow A/R



Prove non Distruttive

- Si intendono Prove non Distruttive (NDT) l'insieme delle procedure e delle tecniche volte alla valutazione della difettosità / integrità di materiali o di manufatti senza alterare o distruggerne lo stato
- Le NDT possono essere utilizzate anche per:
 - Caratterizzazione della microstruttura e composizione chimica
 - Stima delle proprietà fisiche del materiale
 - Valutazione dello stato di tensione

Prove non Distruttive

- Visual inspection
- Metodo radiografico
- metodo ultrasonoro
- metodo magnetoscopico
- metodo dei liquidi penetranti

- metodo delle correnti indotte
- metodo della rilevazione di fughe (prove di tenuta)
- Emissione acustica
- Termografia
-



Norme

ASTM International

The Society of Automotive Engineers (SAE)

ASME International

The International Organization for Standardization (ISO)

The American Welding Society (AWS)

UNI EN

etc.

Campi di applicazione

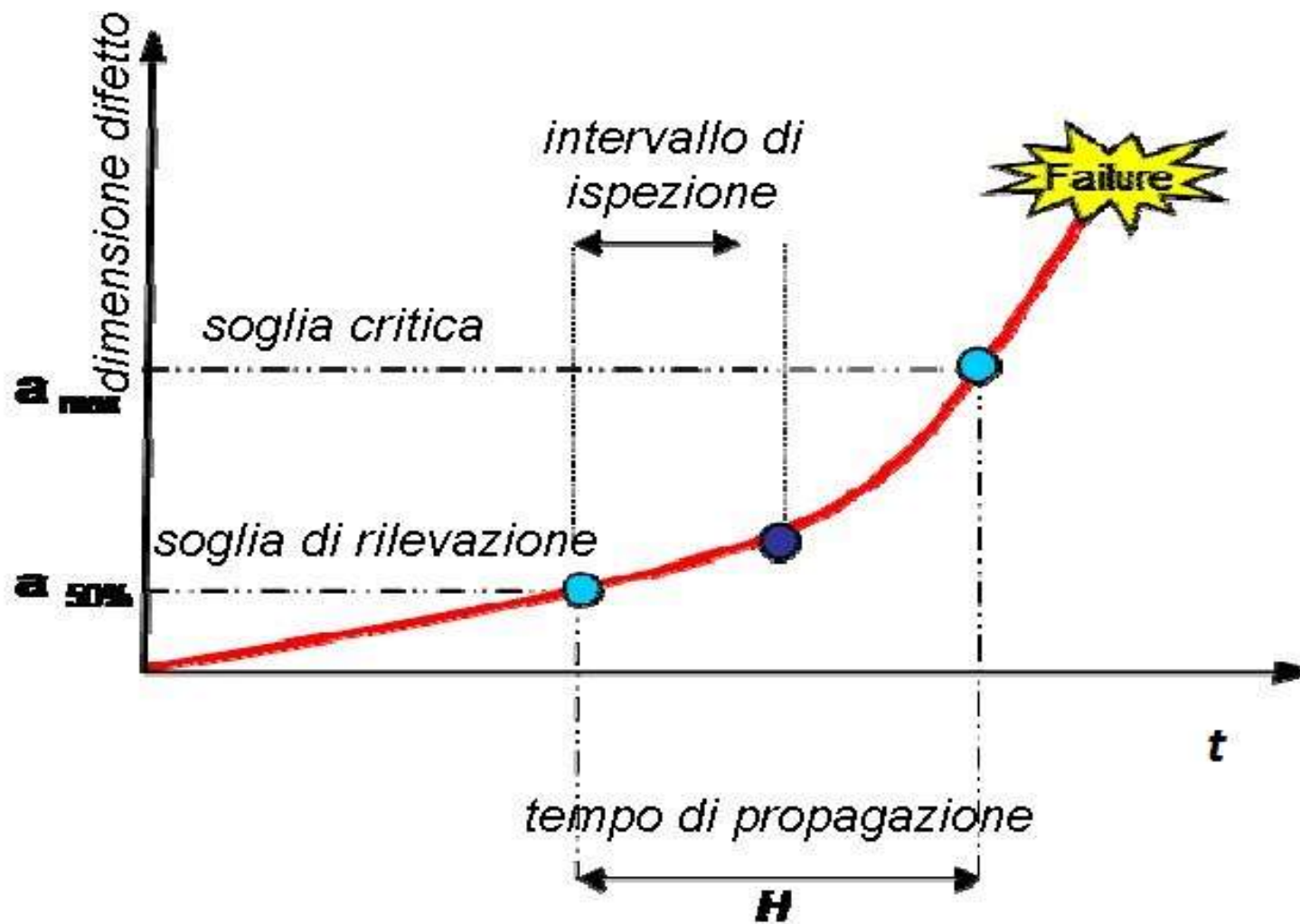
Le NDT sono utilizzate in molte fasi della produzione dei componenti

- nello sviluppo del prodotto;
- Per verificare la qualità dei materiali in ingresso;
- Per controllare e migliorare il processo produttivo;
- Per controllare i trattamenti termici e superficiali;
- Per controllare il processo di assemblaggio;
- Per monitorare il componente in esercizio (inservice inspections)

NDT, nel campo dell'integrità strutturale vengono eseguite allo scopo di rilevare:

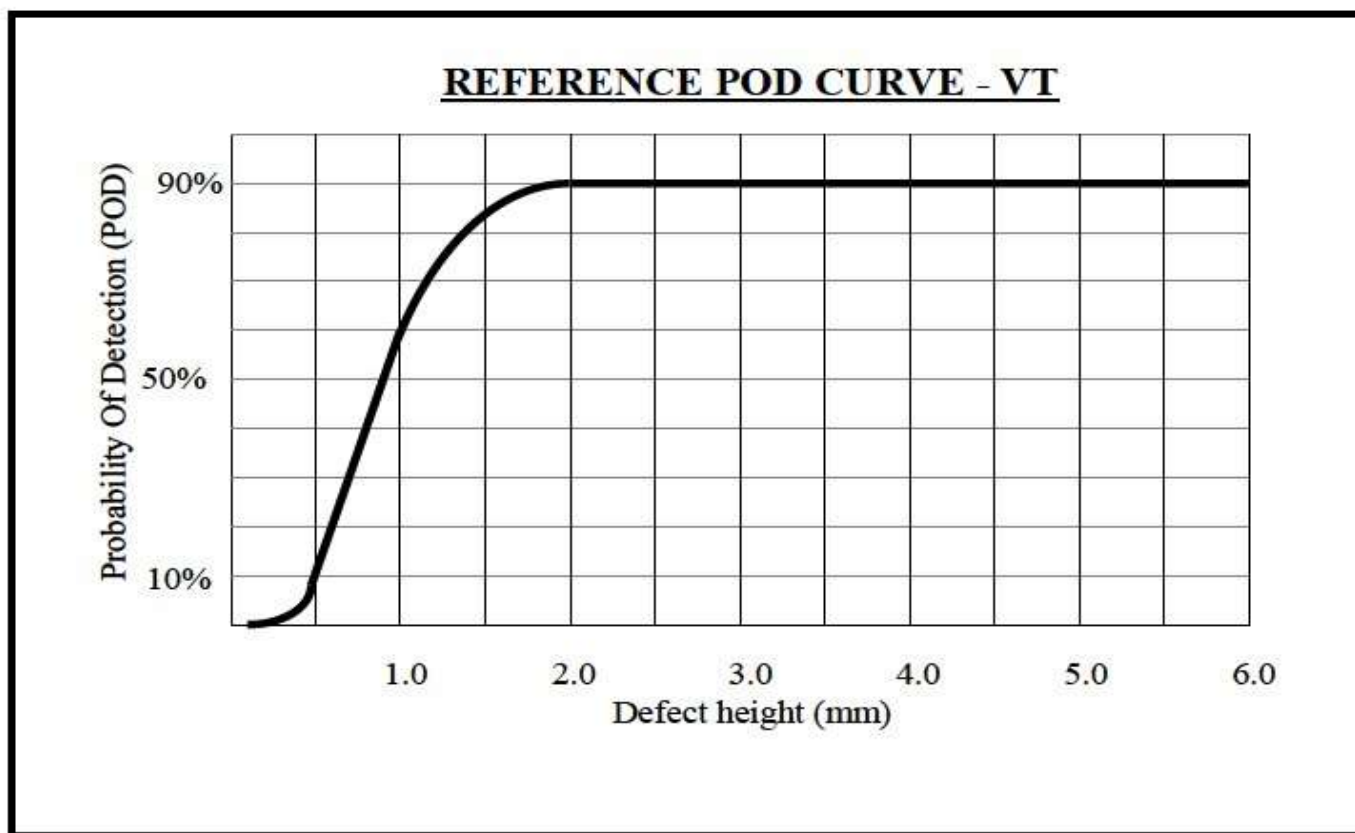
- la presenza di eventuali difetti (rilevazione - detection)
- di identificarne la tipologia (caratterizzazione - characterization),
- quando possibile e se richiesto definirne:
 - la posizione (collocazione - location)
 - le dimensioni (dimensionamento - sizing)

Valutazione della vita residua



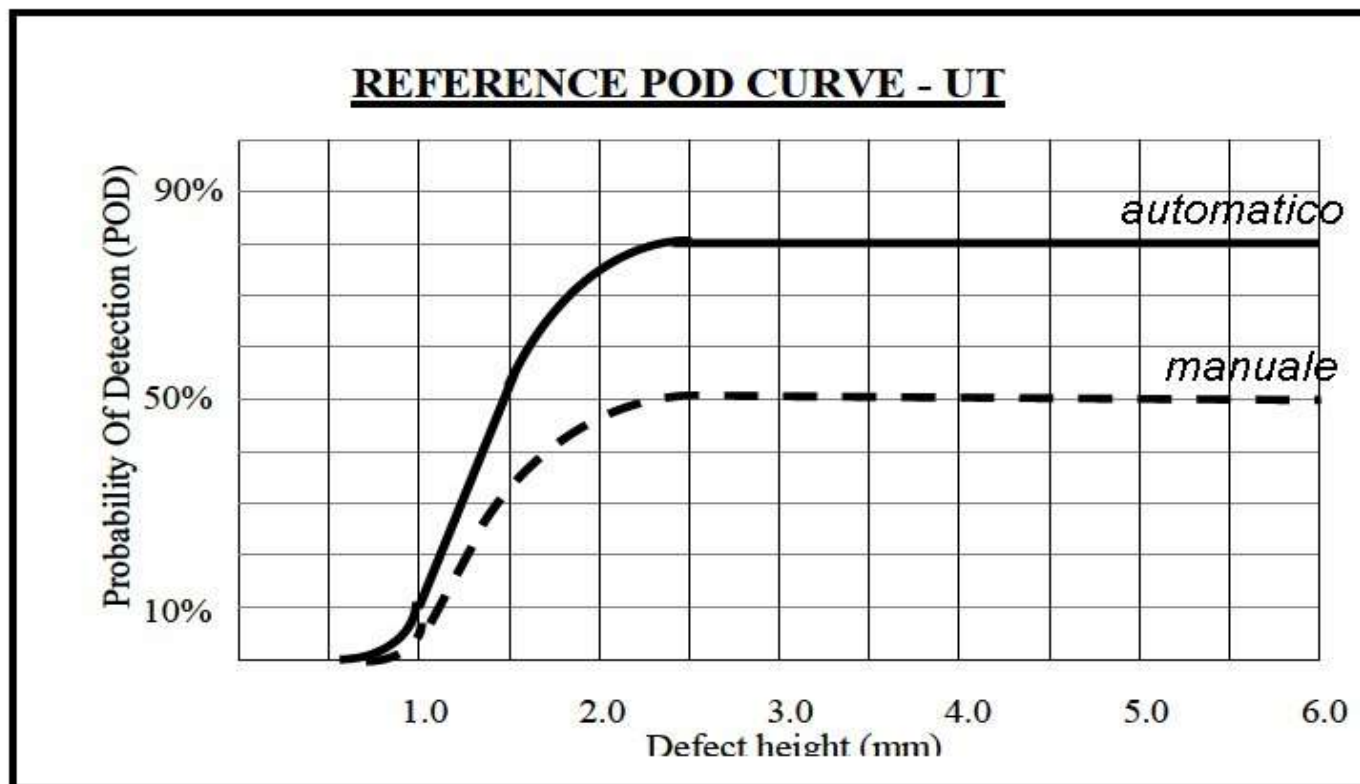
Valutazione della vita residua: POD

Probability of detection : POD



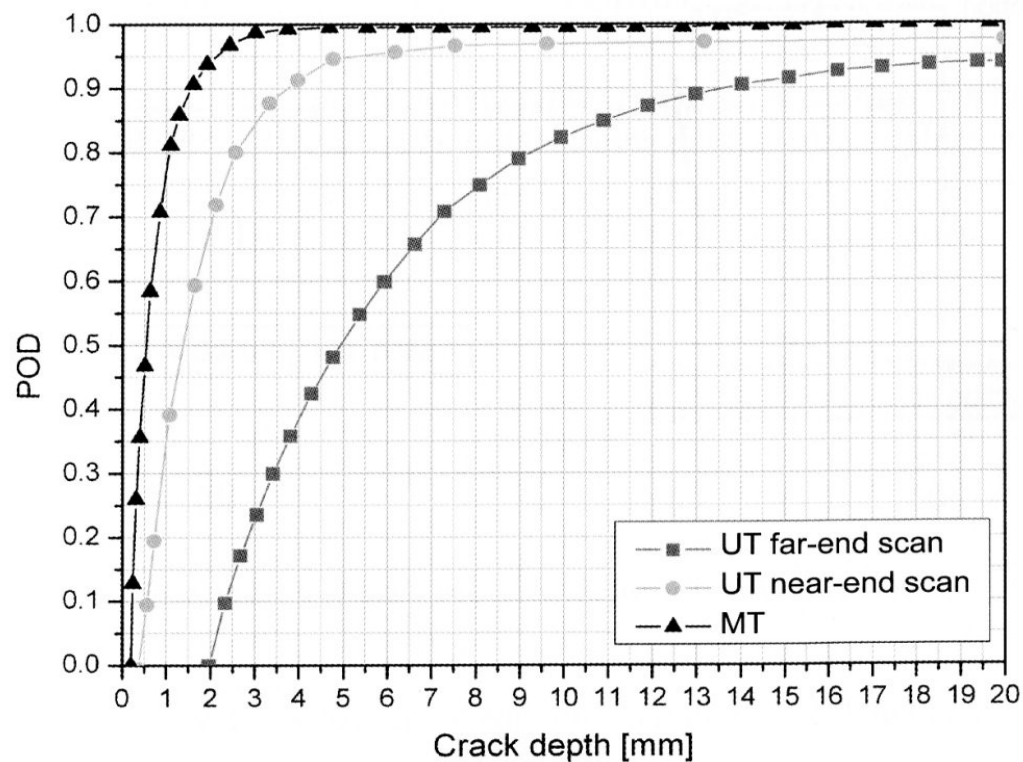
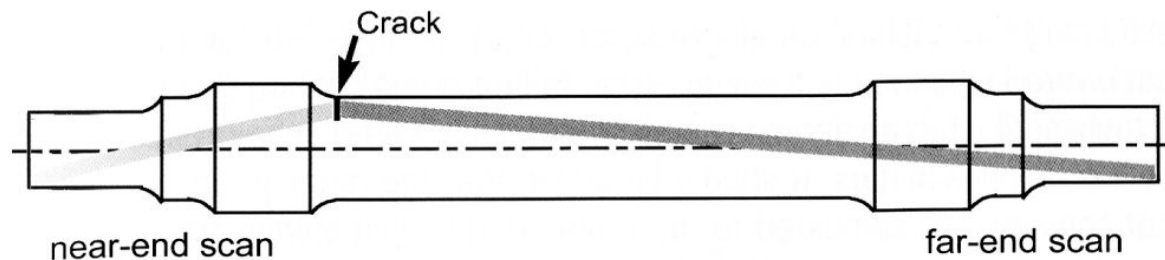
POD – Ispezione visiva

Valutazione della vita residua: POD



POD – Ultrasuoni

Valutazione della vita residua: POD



UT: ultrasuoni
MT: magnetoscopia

POD – Esempio con assile ferroviario

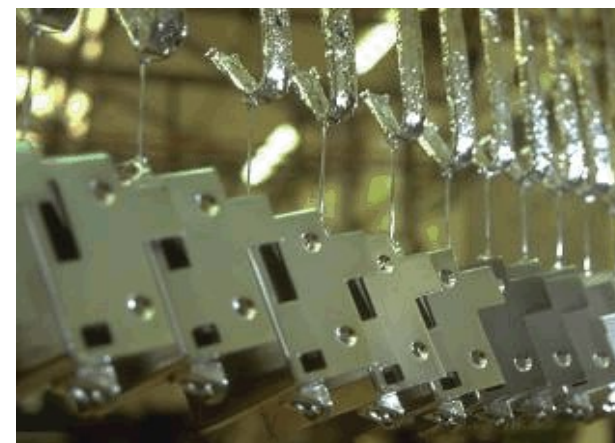
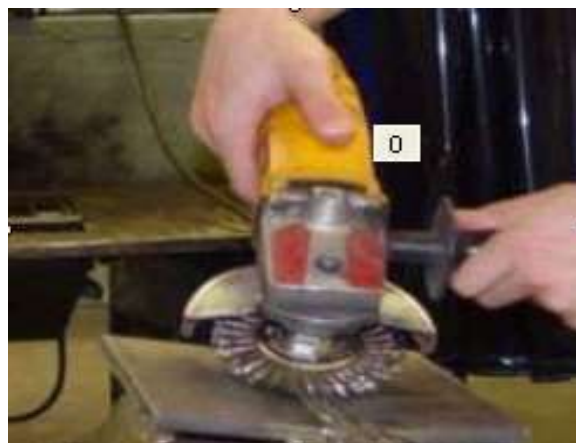
Ispezione di prodotti grezzi

Forgiati, fusi, estrusi, ecc.



Ispezione di semilavorati o prodotti lavorati

Prodotti lavorati, saldati, trattamenti superficiali e termici, ecc.

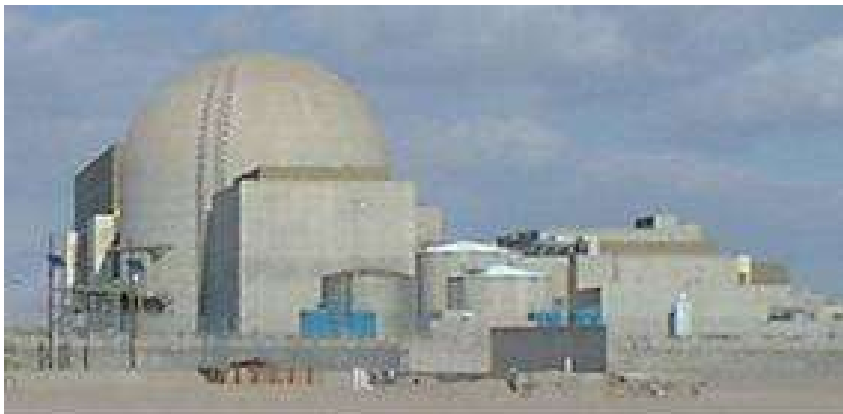


Integrità strutturale *In-Service Inspection*

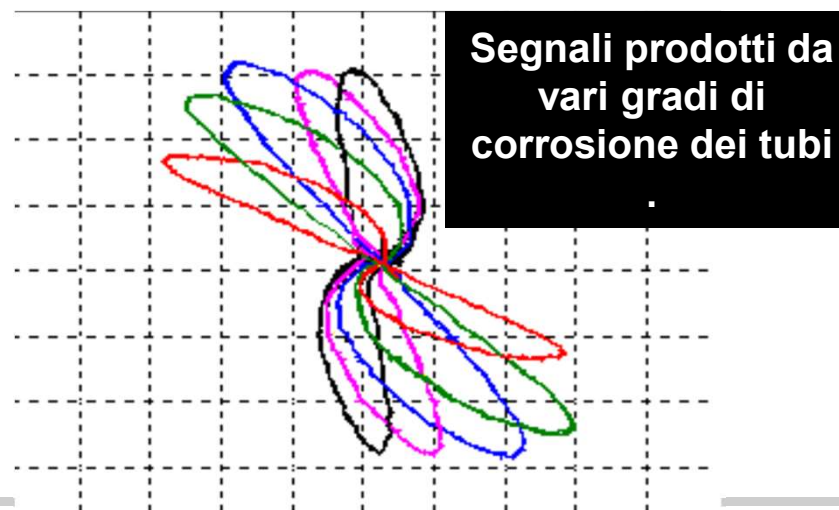
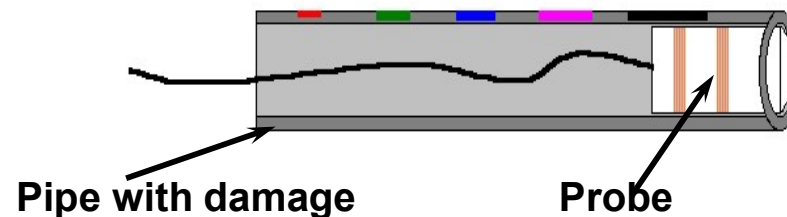
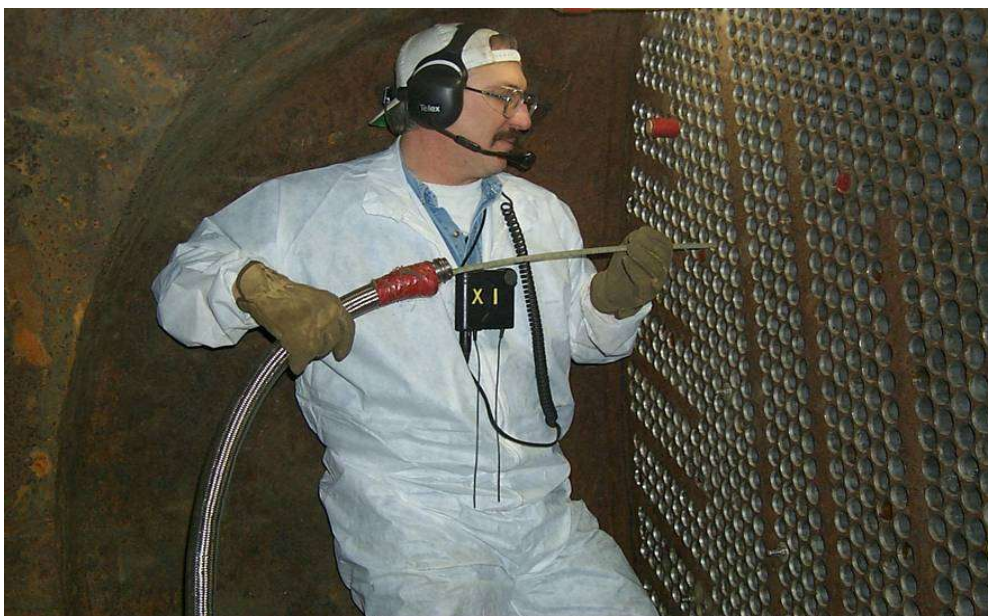
- Cricche
- Corrosione
- Erosione
- Ecc.



Ispezione degli impianti

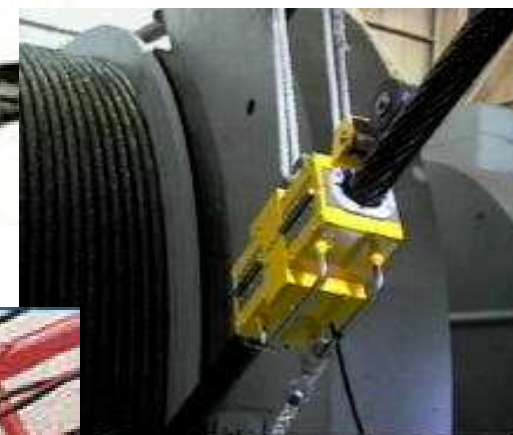
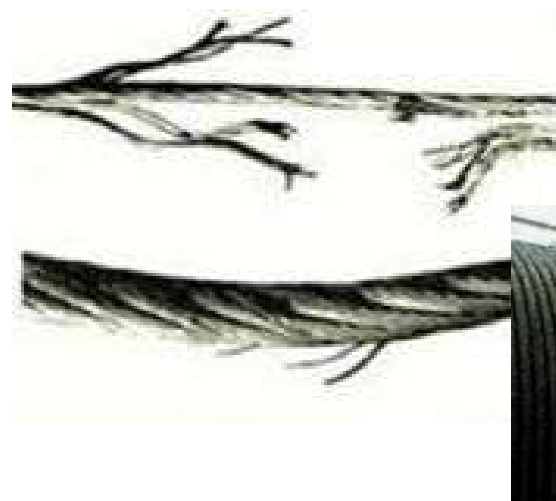


Esempio di controllo con correnti indotte in scambiatore di calore.



Ispezioni dei cavi

Ispezioni visive

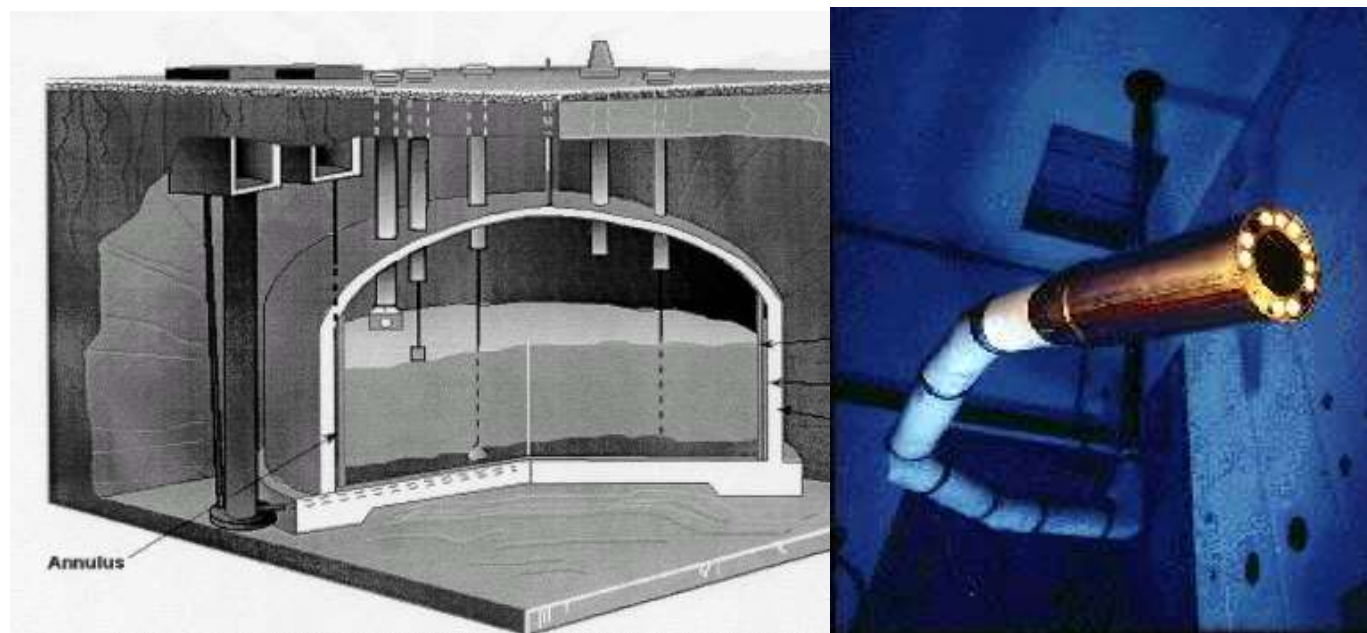


Ispezione dei recipienti

Ispezione ultrasonora robotizzata

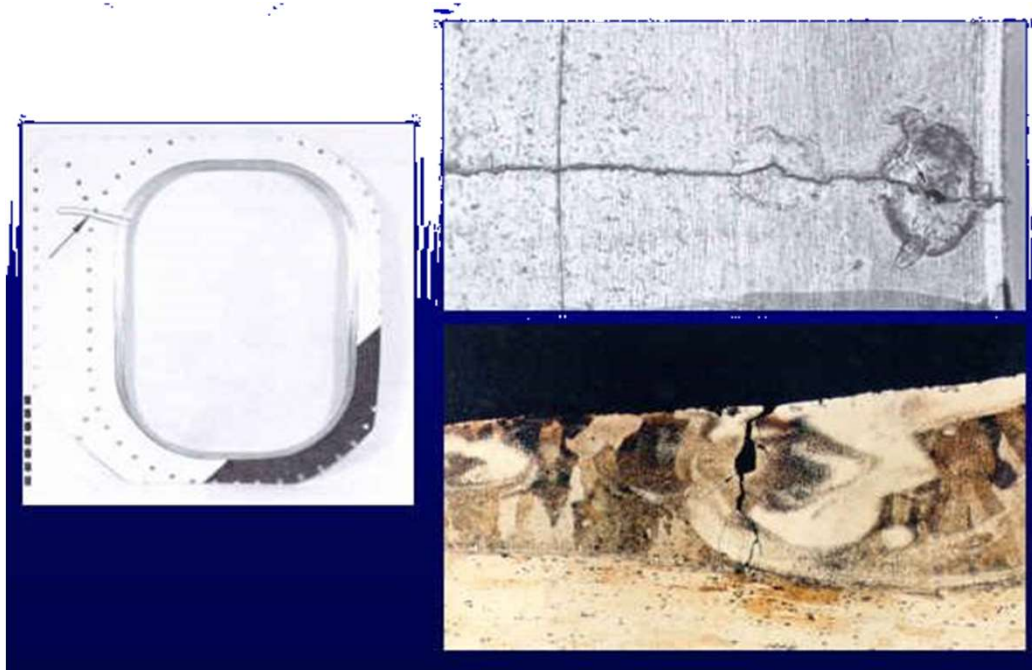


Ispezione visiva con fibre ottiche



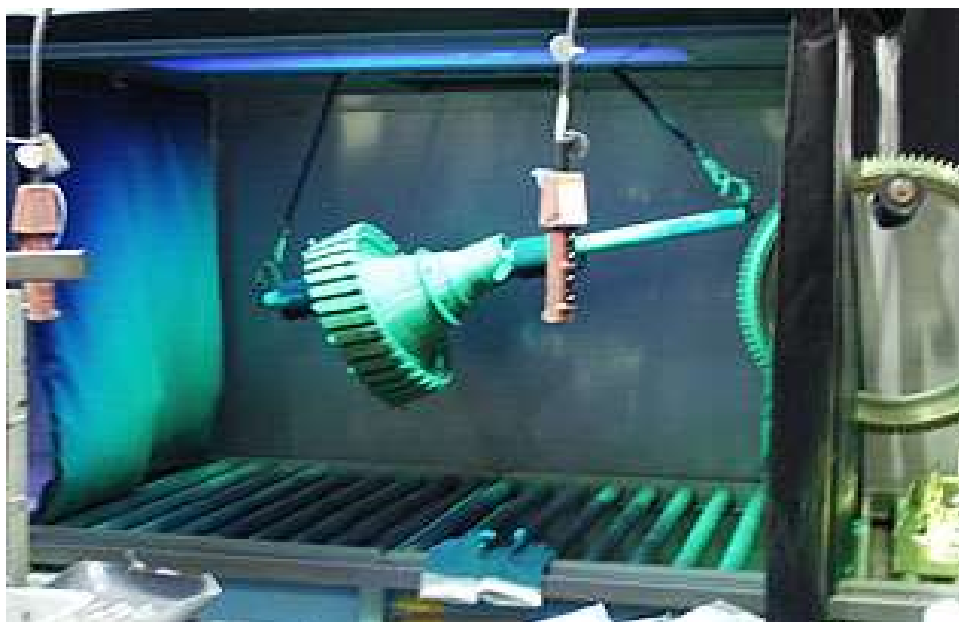
Ispezione di strutture aeronautiche

- Raggi x e ultrasuoni estensivamente utilizzati per rilevare cricche di fatica

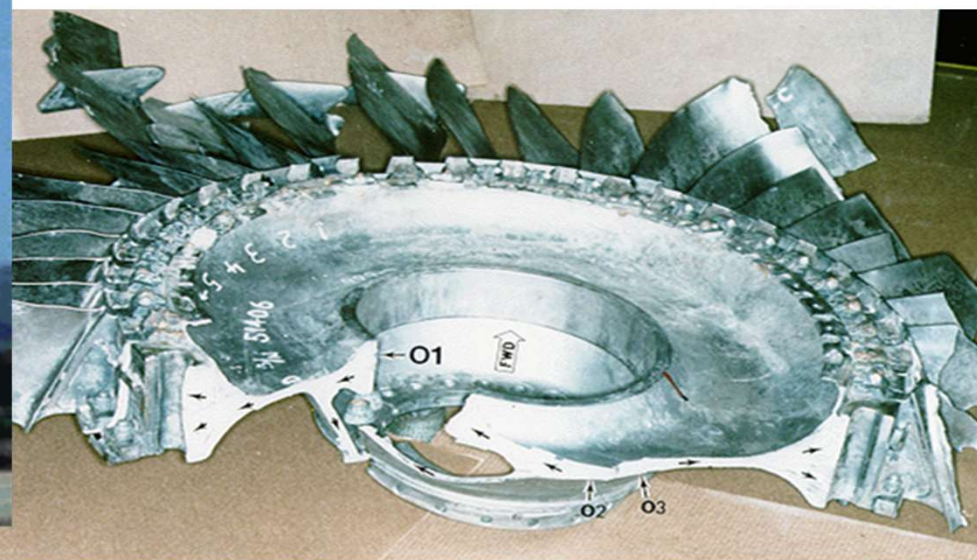


Turbine aeronautiche

- **Principalmente liquidi penetranti, magnetoscopia e US.**



Analisi delle cause di incidenti



Recipienti in pressione

Principalmente raggi x e ultrasuoni



Ispezioni materiali ferroviario (assili, ruote, rotaie, ecc.)



Ispezione dei ponti

- Corrosione, difetti
- (ispezione visiva, emissioni acustiche, ultrasuoni)



Ispezione dei gasdotti

**Ispezione visiva, radiografia,
ultrasuoni, magnetoscopia...**



Photo Courtesy of Inuktun



Photo Courtesy of Yxlon International

Ispezione visiva



Metodo di base e comune di ispezione

Si utilizzano boroscopi, fibre ottiche, ingrandimenti, specchi, ecc.

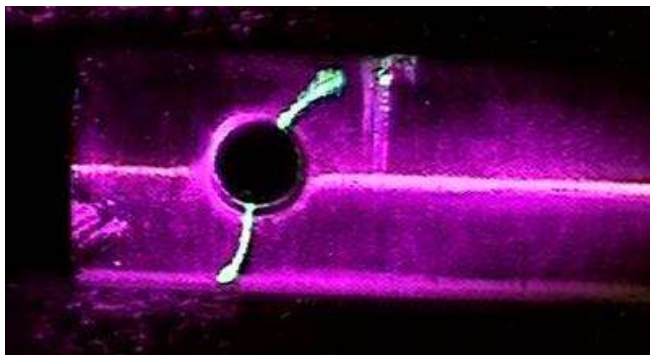


Robot permettono l'ispezioni in parti inaccessibili o pericolose, come gasdotti, strutture sottomarine, ecc.

Liquidi penetranti

Possono individuare difetti di tipo superficiale

- Liquido penetrante, con bassa tensione superficiale
- lavaggio
- Sviluppo , con polvere che tira in superficie il liquido penetrante
- Analisi visiva (anche con vernice fluorescente e luce UV per aumentare la sensibilità)



Tecniche

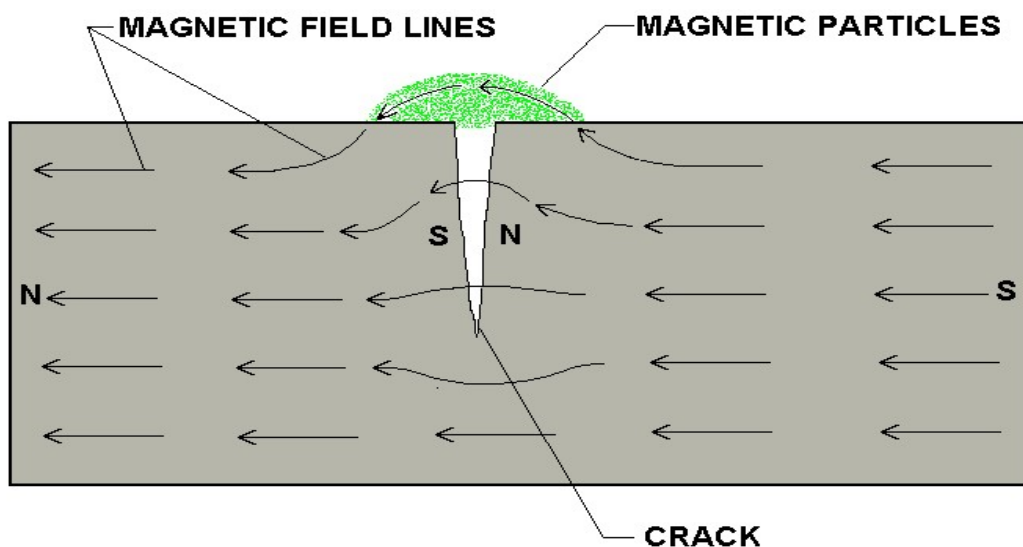
Metodo dei liquidi penetranti



Magnetoscopia

Il componente viene magnetizzato e poi spruzzato con un liquido fluorescente contenente particelle ferrose ed osservato con luce UV.

Le particelle si dispongono lungo le linee di flusso magnetico sulla superficie del componente. Se ci sono difetti, le linee di flusso si alterano

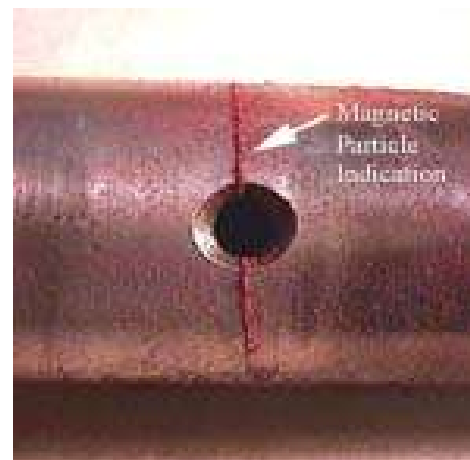


Magnetoscopia

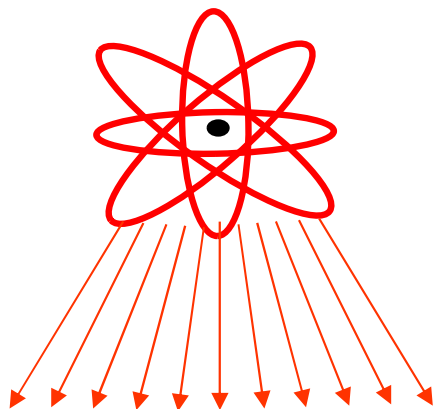


Tecniche

Metodo magnetoscopico



Raggi X



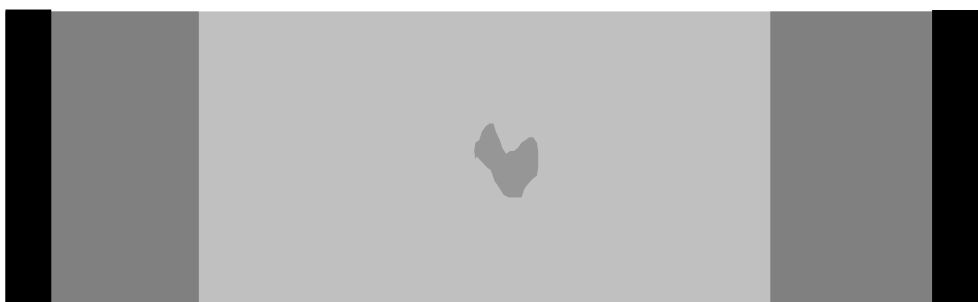
Il componente è interposto tra la sorgente di raggi X e la lastra.

Il materiale assorbe parte dell'energia dei raggi x e solo una parte arriva ad impressionare la lastra.

Se c'è un vuoto interno al materiale, si ha minore assorbimento e quindi una maggiore esposizione della lastra



Lastra X-ray



Lastra vista da sopra



= minore esposizione



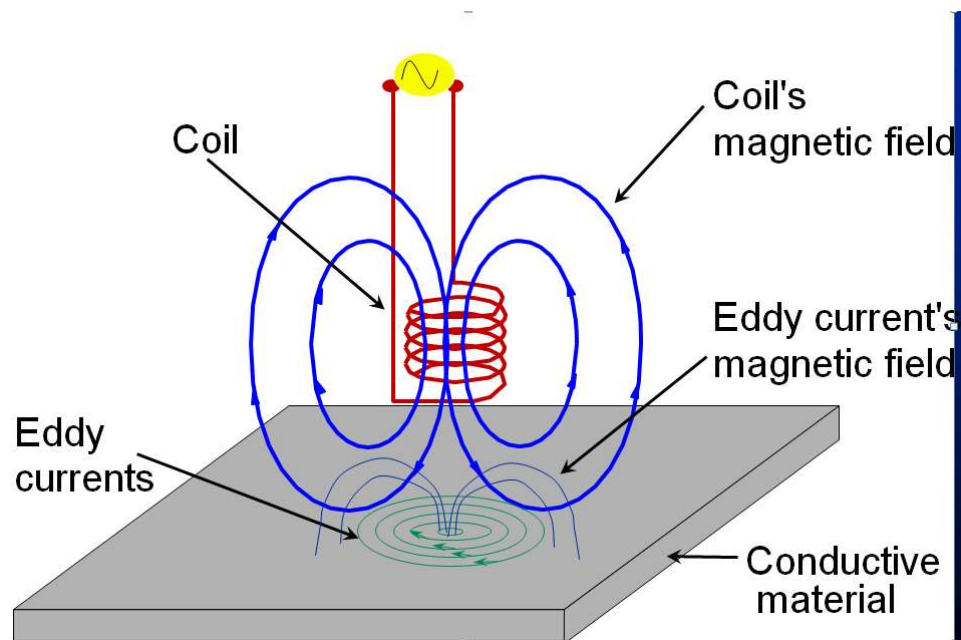
= maggiore esposizione

Tecniche

Metodo radiografico



Correnti indotte



campo magnetico generato da una bobina alimentata da corrente alternata, che produce nel pezzo da esaminare delle correnti indotte. Tali correnti influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate.

La presenza di una qualsiasi discontinuità, modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito, la cui variazione è indice di possibile difettosità.

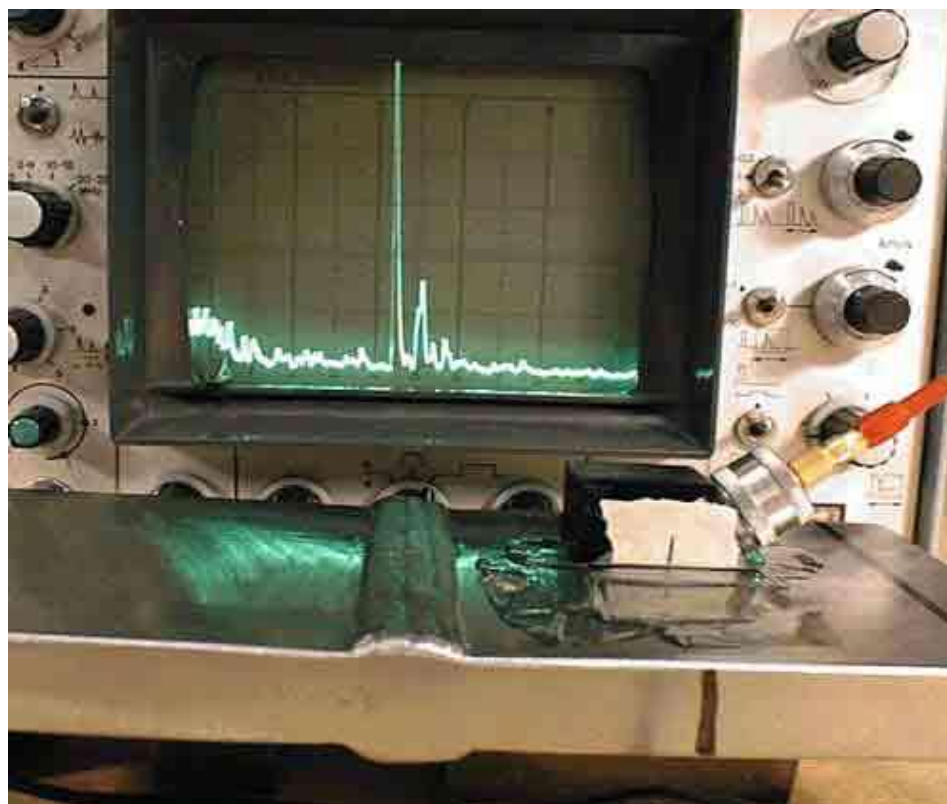


Ispezione con ultrasuoni

- L'ispezione con ultrasuoni fornisce informazioni sulla situazione interna in un componente in termini di variazione delle modalità di propagazione e riflessione di una onda ultrasonora nel passaggio, attraverso il componente (difettato) da un pulsatore (generatore di onde ultrasonore) ad un ricevitore

Tecniche

Metodo ultrasonoro



Tecniche

- Metodo delle correnti indotte
- Rilevazione delle fughe (prove di tenuta)
- Emissione acustica
- Termografia
- Ispezione visiva

macro danneggiamento

- Misure di resistività elettrica
- Misure di durezza
- Precipitati
- Tecnica di replica
- Rilevazione di vuoti, etc.

micro danneggiamento