



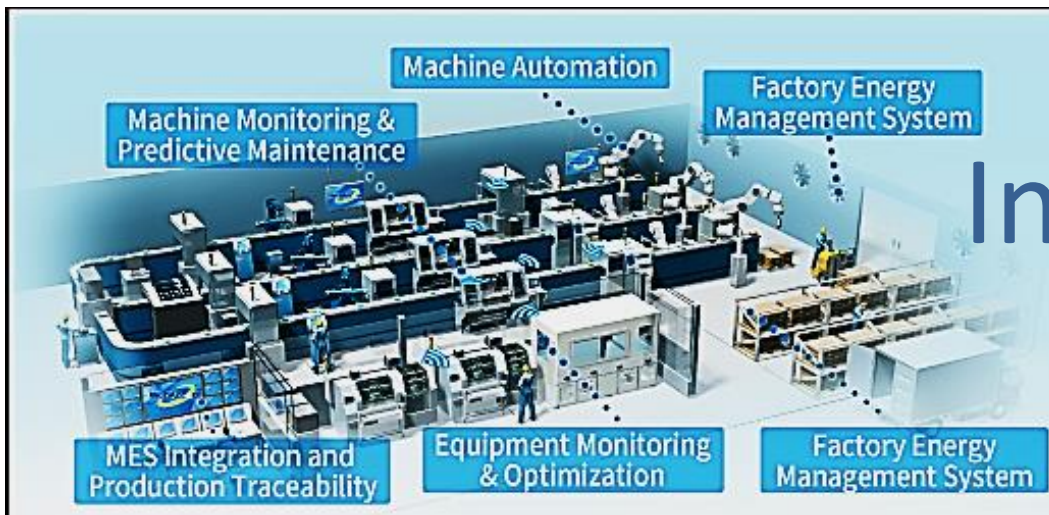
La Progettazione Meccanica Nell'era 4.0

Approcci progettuali e Simulazioni

Ing. Pietro Ladisa

*Presidente Commissione Meccanica Industriale
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma*

Roma, 30 maggio 2024



Industria 4.0

Cambi più frequenti in risposta alle esigenze di mercato

Flessibilità e riconfigurabilità

Automazione

Condivisione delle informazioni tra le isole di produzione in input e output (feedback)

Ottimizzazione continua dei processi

Accorciare la catena di produzione

Smart Manufacturing



Trasformazione digitale

- Canale diretto col Cliente, e-commerce
- Processi produttivi
- Processi di progettazione

Rischio: deresponsabilizzazione!

Flusso d'informazioni

- “Smaterializzazione” del flusso di dati
- Riduzione drastica dei passaggi



Automazione e Connessione

Riduzione drastica dell' intervento esterno, limitato solo al controllo prestazionale.

Automazione può essere **rigida**, ovvero tramite machine specialistiche che fanno solo la stessa funzione meccanica,

o **flessibile** quando la macchina può essere facilmente riconfigurata, digitalmente e da remoto, per cambiare funzioni e parametri di prestazione.



La progettazione meccanica

C'era una volta...

La UNI CNR 10011: le verifiche alle sigma ammissibili

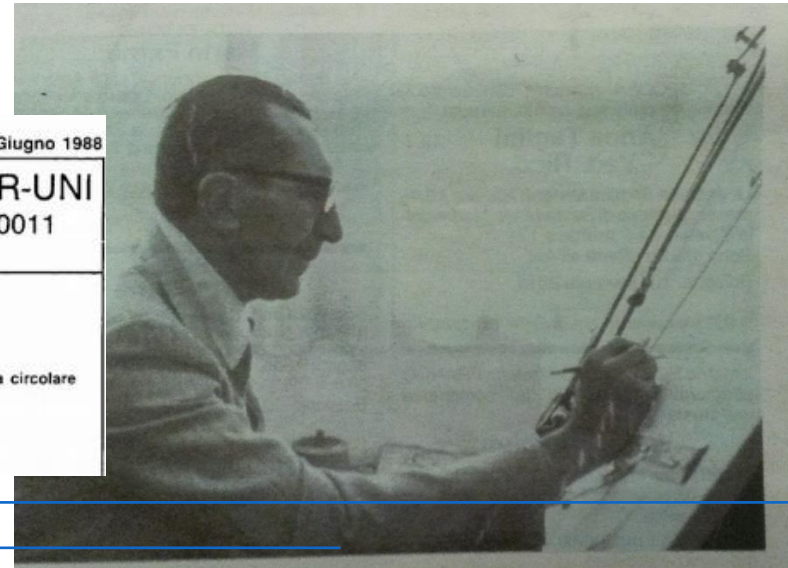
Formule semplici, prescrittive, efficace in fase dimensionante.

Si progettava verificando le sezioni con calcoli a mano, mentre si disegnava al tecnigrafo.

I limiti:

- *Concepita per la sola progettazione dell'acciaio strutturale*, poi di fatto utilizzata impropriamente per vari materiali anche non ferrosi.
- Poco utilizzabile in campo non lineare
- Poco utilizzabile per verifiche prestazionali

Norma italiana		Giugno 1988
Costruzioni di acciaio		CNR-UNI 10011
Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione		
Steel structures — Instructions for design, construction, testing and maintenance		
Il campo di applicazione della presente norma è quello della Legge 5 novembre 1971 N° 1086 precisato dalla circolare N° 11951 emanata in data 14 febbraio 1974 dal Ministero dei Lavori Pubblici.		





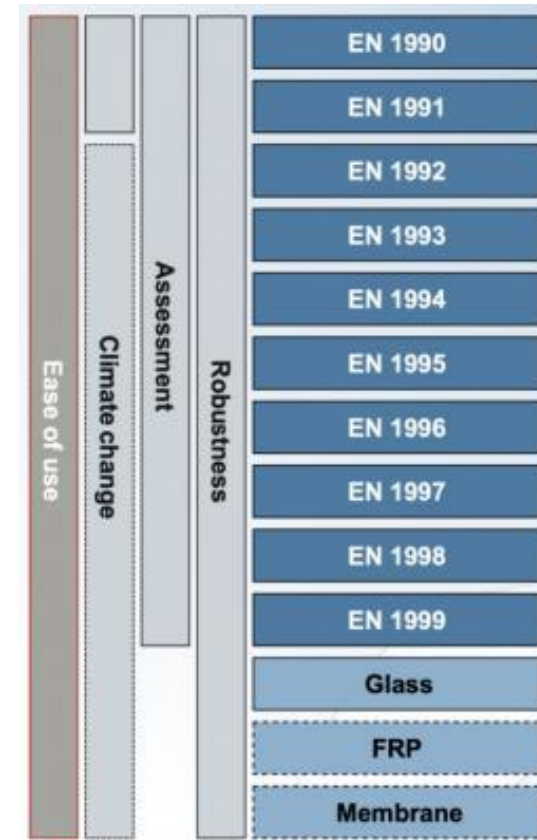
...E poi?

La UNI CNR 10011 una volta decaduta, non è mai stata formalmente sostituita (del resto mai recepita come norma europea).

L'ente europeo di normazione ha poi emesso gli eurocodici, ma non vi è alcun atto formale di «sostituzione» da parte UNI o CNR.

L'eurocodice 0 – EN 1990, definisce il nuovo approccio **«semi-probabilistico»** di verifica agli stati limite, che supera ed amplia il vecchio concetto delle sigma ammissibili, introducendo i **coefficienti parziali di sicurezza** e definendoli caso per caso nei vari eurocodici specifici.

Gli eurocodici successivi, poi, applicano tale approccio ai vari casi di progettazione strutturale (definizione dei carichi, criteri di combinazione; strutture in acciaio, calcestruzzo (armato o no), alluminio, materiali compositi, fibre, ecc.)





Criteri di progettazione prestazionali

I cosiddetti “**Stati Limite di Servizio**”, ad esempio le risposte strutturali di tipo statico e dinamico nelle varie condizioni al contorno ed ambientali

Criteri di verifica ai carichi ultimi

Secondo gli specifici fattori di sicurezza definiti per le tipologie di carico, di stato strutturale e dalle caratteristiche del materiale, I cosiddetti “**Stati Limite Ultimi**”, da applicare ad ogni combinazione di carico da verificare.

***Nota:** tale approccio impone il superamento della singola verifica «a caso peggiore», applicata in passato con la 10011, in quanto ogni caso di carico può avere le sue peculiari condizioni di combinazione che possono sollecitare la struttura nel suo complesso in modo completamente diverso l'uno dall'altro.*



Norme armonizzate

TYPE A: Basic concept and safety design principles for all machine categories

TYPE B: Safety specific aspects used in wide types of machines

TYPE C: Specific for each machine category

EN-Eurocodici:

- EN 1990 EUROCODE 0 – Basic Principles for Structural Design
- EN 1993 EUROCODE 3 – Design of Steel Structures
- EN 1999 EUROCODE 9 - Design of Aluminum Structures
- ...

Norme internazionali, Extra-UE:

- MIL-STD-810 (G) – Test method standard: Environmental engineering considerations and laboratory test
- MIL-STD-889 (B)- Dissimilar Metals
- ISO/TS 15066: 2016 “Robots and robotic devices – collaborative robots”
- ...



Le carenze normative

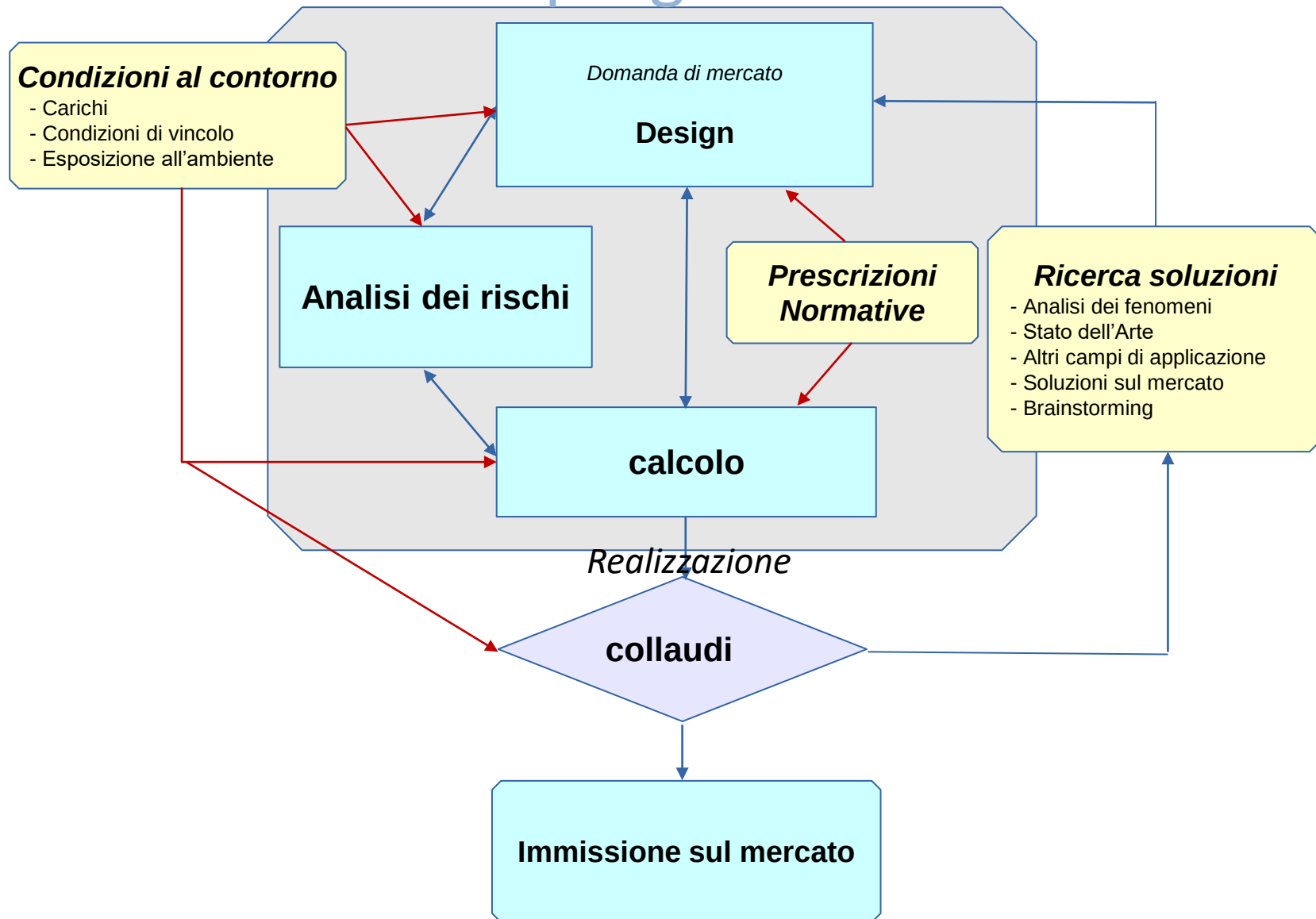
Nella emissione della legislazione europea in campo meccanico (direttive, regolamenti, ecc.) e nelle conseguenti norme armonizzate **si fa poco riferimento agli eurocodici**, per quanto questi sono di fatto molto utili al progettista nell'attuare il suo flusso di verifica, lasciando una lacuna importante nella normativa cogente.

L'approccio definito con gli eurocodici è ben concepito ed **utilizzabile nella progettazione strutturale applicata alla meccanica**, tenendo presente che:

Nella definizione applicativa (eurocodici 1 e successivi) la metodologia è tendenzialmente orientata alla progettazione civile infrastrutturale ed edile, con scarsa attenzione agli scenari specificatamente industriali o impiantistici, in particolare per le applicazioni in fibra e materiali compositi. **Questo però non ne impedisce l'applicabilità** della metodologia alla progettazione industriale e meccanica in generale.



La progettazione meccanica





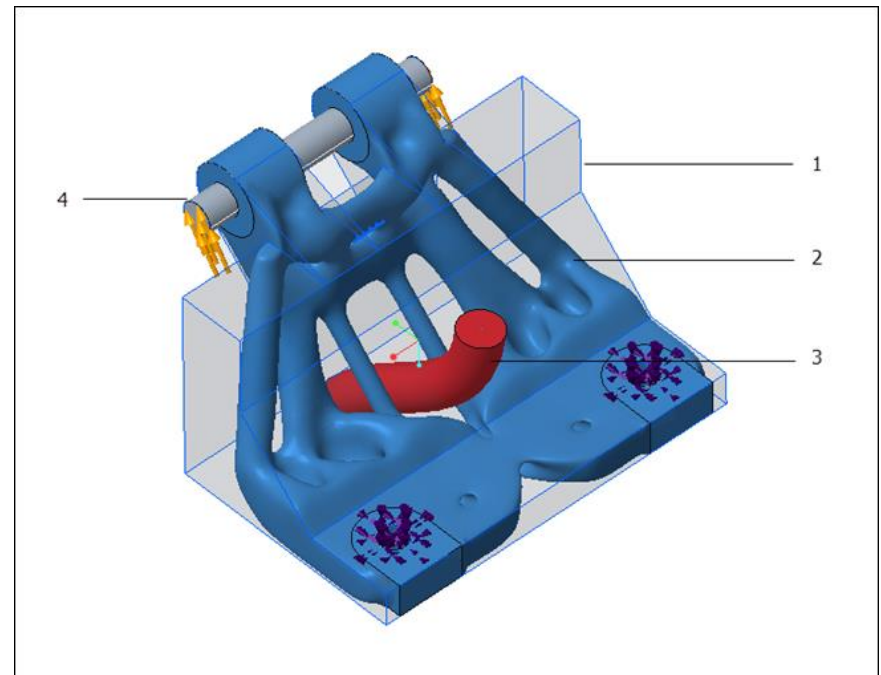
La progettazione meccanica

L'ottimizzazione strutturale (industria 4.0)

- Riduzione dei costi
- Riduzione di rischi dovuti ai pesi eccessivi o eccessive rigidzze
- Facilità di maneggio

I rischi:

L'illusoria presunzione di conoscere perfettamente tutti gli scenari di carico o di condizioni al contorno, può indurre un design «estremo», esteticamente sorprendente, ma che, di conseguenza, potrà portare a una drastica riduzione di affidabilità in condizioni di servizio effettive





Modularità e standardizzazione

- **Intercambiabilità** dei componenti
- **Flessibilità** di funzione ottenuta per sola modifica del layout d'impianto
- **Uso di componentistica certificata** disponibile a catalogo
- Essenzialità nel design: *“Tutto quello che non c'è, non si rompe.”*

I vantaggi di un approccio di questo tipo sono immediati e risultano in un drastico abbattimento dei costi di processo, di costruzione, di certificazione e di manutenzione.



BS 18004:2008 Risk evaluation matrix		Potential Human Injury		
		<i>slight injuries</i>	<i>Medium injuries</i>	<i>Serious injuries, death</i>
Probability	Very Improbable	Very Low Risk	Very Low Risk	High Risk
	Improbable	Very Low Risk	Medium Risk	Very High Risk
	Probable	Low Risk	High Risk	Very High Risk
	Very Probable	Low Risk	Very High Risk	Very High Risk

I rischi:

- *Rischi nei confronti della sicurezza delle persone*
- *Rischi relativi al prodotto (qualità) e alla risposta del mercato*
- *Rischi nei confronti dell'ambiente*



Identificazione dei rischi

- ✓ Meccanici
- ✓ Elettrici
- ✓ Termici e d'incendio
- ✓ Acustici
- ✓ Da vibrazioni
- ✓ Da radiazioni
- ✓ Chimici - biologici
- ✓ Ergonomici
- ✓ Diffusione non controllata d'informazioni
- ✓ Altri (caso per caso)
- ✓ Combinazioni di rischio, simultaneità (fette di formaggio)

Un'analisi di rischio propriamente eseguita

- **Rende chiare indicazioni** per la progettazione a calcolo e per i collaudi
- Indica tutto quello che va definito per la manutenzione ordinaria, gl'intervalli e la vita operativa

Valutazioni specifiche (FMECA) sono previste per valutare la propagazione del rischio e le criticità del flusso produttivo.



L'analisi dei rischi

Definizione del rischio	Probabilità	Gravità	rischio	Azione	Res.
Pericoli dovuti ad energia:					
Scariche elettriche o contatti elettrici <i>I materiali ed i trattamenti sono conduttivi e le parti componenti non generano campi elettrici</i>	I	DL	MR		
Contatto con parti ad elevata temperatura <i>I materiali ed i trattamenti sono termicamente conduttivi e le parti componenti non generano calore</i>	I	DM	MR		
Pressioni ed azioni meccaniche <i>Eventuali azioni meccaniche su parti del corpo possono insorgere nella fase di montaggio ma solo per azione umana diretta e non per forze elettromotrici</i>	P	DL	LR		
Movimenti inattesi del dispositivo <i>Eventuali movimenti inattesi possono essere dovuti al solo effetto del peso delle parti durante il montaggio</i>	P	DL	LR		
Azioni dovute a parti mobili <i>Le parti mobili hanno libertà limitata ed il loro movimento è di natura esclusivamente passivo</i>	I	DL	VLR		
Pericoli biologici:					
Incompatibilità biologica di parti o componenti <i>Schede di sicurezza trattamenti: all. C</i>	MI	DL	VLR		
Tossicità di parti o componenti <i>Schede di sicurezza trattamenti: all. C</i>	I	DM	MR		
Allergenicità di parti o componenti <i>Schede di sicurezza trattamenti: all. C</i>	I	DM	MR		
Pirogenicità di parti o componenti <i>Materiali non pirogenici con trasmissibilità termica medio alta</i>	I	DM	MR		
Pericoli ambientali:					
Funzionamento al di fuori delle condizioni ambientali previste <i>L'impiego dell'attrezzatura è specifico per applicazioni satellitari in ambienti controllati</i>	MI	DM	VLR		
Incompatibilità con altri dispositivi <i>Progettazione eseguita con stretto controllo di materiali e trattamenti a contatto</i>	I	DL	VLR		
Rotture meccaniche accidentali <i>L'eventuale rottura della banda di serraggio porta a perdita improvvisa della funzione</i>	I	DG	VHR	Az2	MR
Pericoli associati all'uso:					
Pericoli da movimentazione manuale <i>Eventuali pericoli da movimentazione possono essere dovuti al solo effetto del peso delle parti durante il montaggio</i>	P	DL	LR		
Etichettatura inadeguata	P	DL	LR		
Istruzioni per l'uso inadeguate	I	DG	VHR	Az3	MR
Uso improprio ragionevolmente prevedibile	I	DM	MR		
Ingombro, spigoli vivi, parti taglienti, ecc	P	DM	HR	Az4	MR
Perdita di funzionalità ed invecchiamento:					
Degradazione dei materiali componenti	I	DG	VHR	Az1	MR
Manutenzione inadeguata	I	DM	MR		
Uso prolungato oltre la fine-vita di un dispositivo	P	DG	VHR	Az5	MR
Perdita di integrità	I	DG	VHR	Az6	MR
Reimpiego improprio	I	DM	MR		



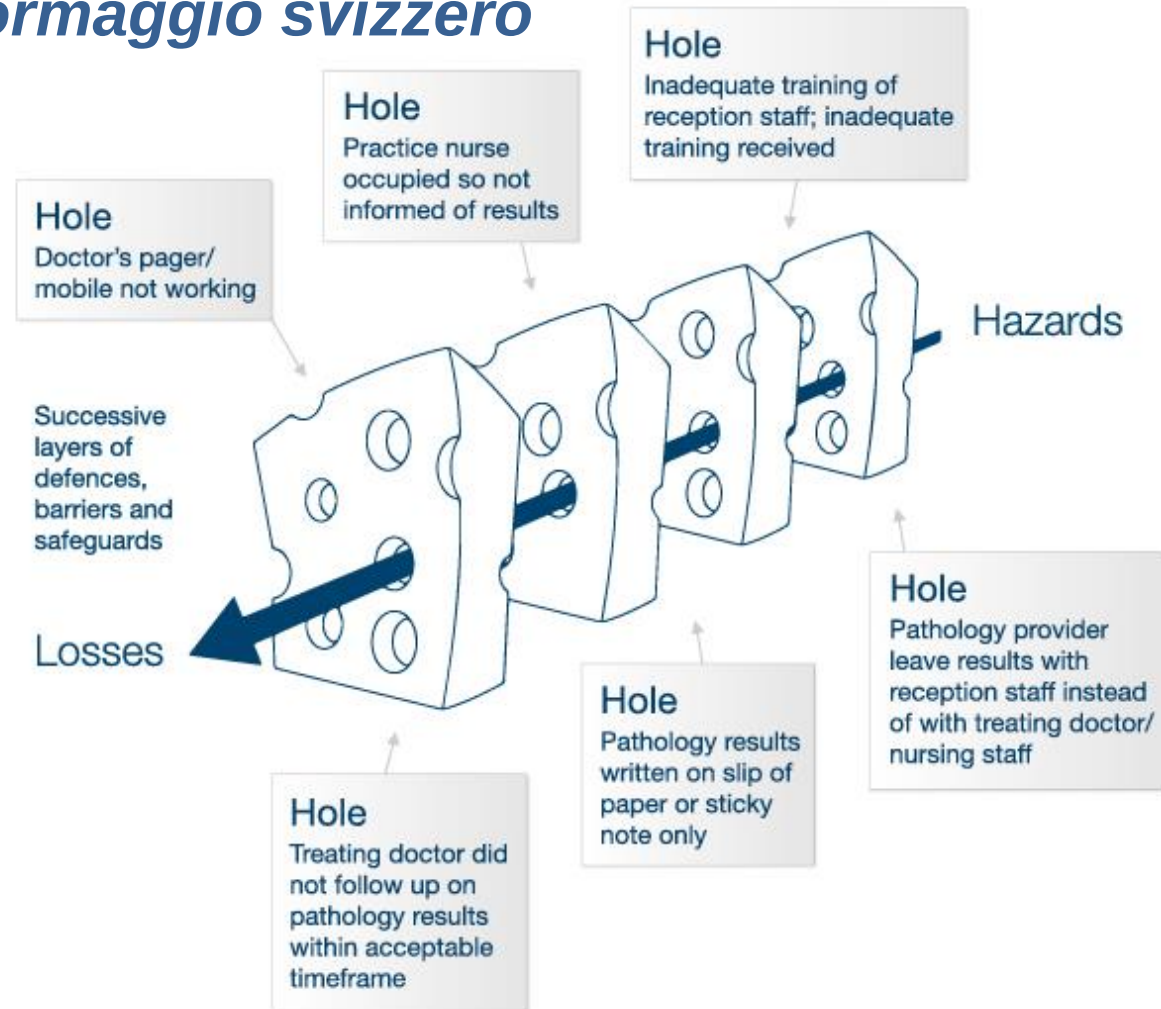
Individuazione dei rischi ambientali

- *Materiali*
- *Trattamenti superficiali*
- *Componenti*

Attenzione alla **catena certificativa** attraverso l'assemblaggio dei componenti, dei sottoassiemi e dell'impianto nel suo complesso.



Le fette di formaggio svizzero



Some holes due to active failure. Other holes due to latent conditions (resident "pathogens").



- **Intelligenza artificiale**

Nuovi RESS relativi all'intelligenza artificiale, applicata a **macchine** progettate per operare con **vari livelli di autonomia**.

Misure di sicurezza per limitare il loro comportamento all'interno di quanto previsto nella valutazione dei rischi.

Misure per le **macchine mobili autonome** (ovvero senza guidatore, come i sistemi AGV sempre più diffusi non solo nella logistica).

- **Nuovi prodotti ad alto rischio**

L'allegato I del nuovo Regolamento Macchine sostituisce l'allegato IV della Direttiva Macchine 2006/42/CE

Aggiunge nuovi prodotti e categorie di macchine ad alto rischio come i **componenti di sicurezza** e **macchine che integrano sistemi con comportamento auto-evolutivo**.



- **Cybersecurity**

Le macchine connesse alla rete dovranno essere progettate in modo da evitare possibili attacchi informatici che possano renderle pericolose.

Viene introdotto un nuovo RESS inerente la protezione da un'alterazione accidentale o intenzionale per i sistemi informatici, in particolare per quelli che governano la sicurezza e l'affidabilità dei sistemi di controllo.



- **COBOT: Collaborazione uomo-macchina**

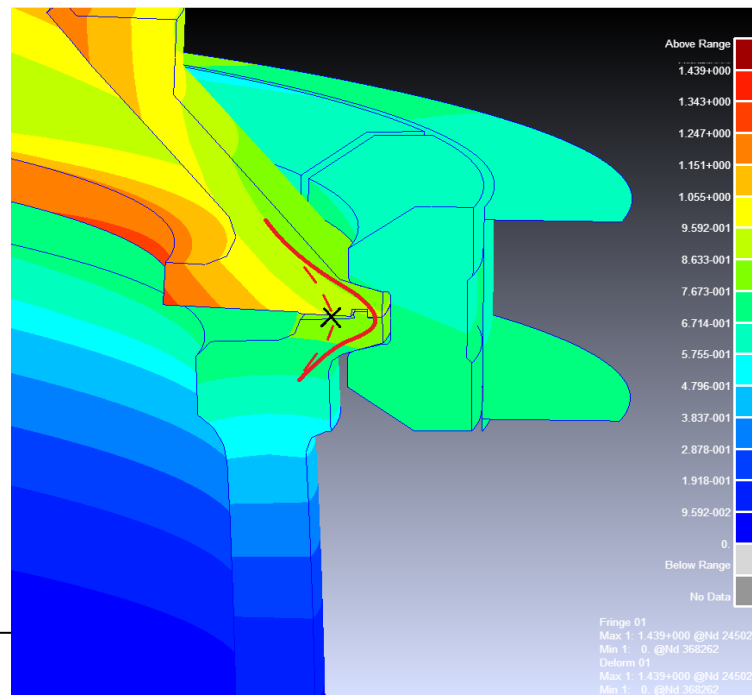
Modificando il RESS relativo agli elementi mobili, vengono introdotti nuovi requisiti per le applicazioni collaborative, riferendosi ai “**COBOT**”, ovvero Robot collaborativi che condividono la stessa area dei lavoratori.

ISO/TS 15066: 2016 “Robots and robotic devices – collaborative robots”

Risks detection in the use of robots and related mitigation and protective actions to be adopted

Il calcolo

E i rischi legati al calcolo



Poniamoci le domande:

1. *Tutti i punti di connessione sono stati verificati lungo tutti i percorsi di carico?*
2. *Abbiamo sufficiente confidenza nel modello di calcolo? Come lo verifichiamo?*
3. *A quale livello di dettaglio di modellazione dobbiamo arrivare per ottenere un risultato affidabile sulle verifiche?*
4. *Quali limiti di attendibilità possono avere i nostri risultati?*

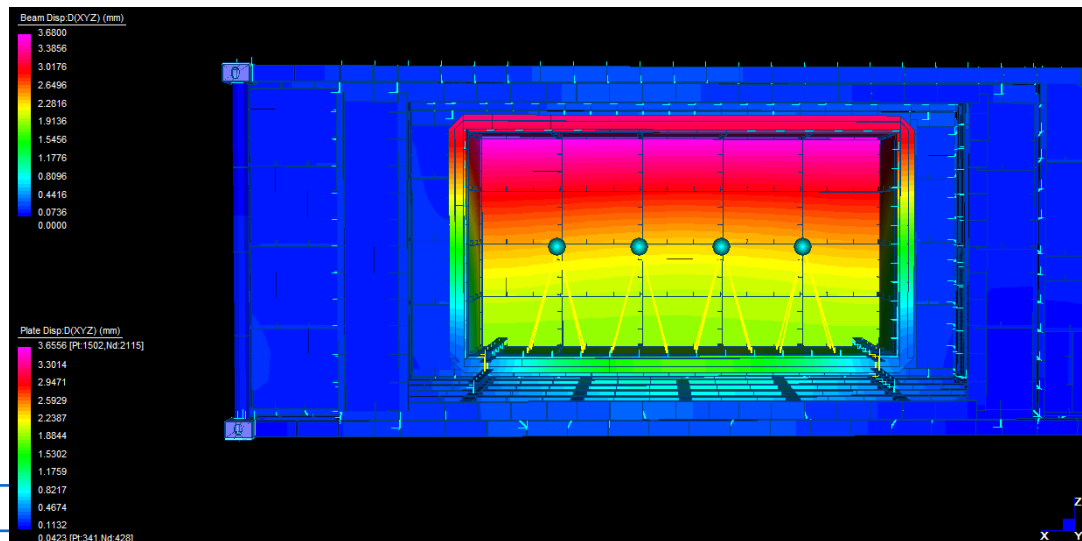
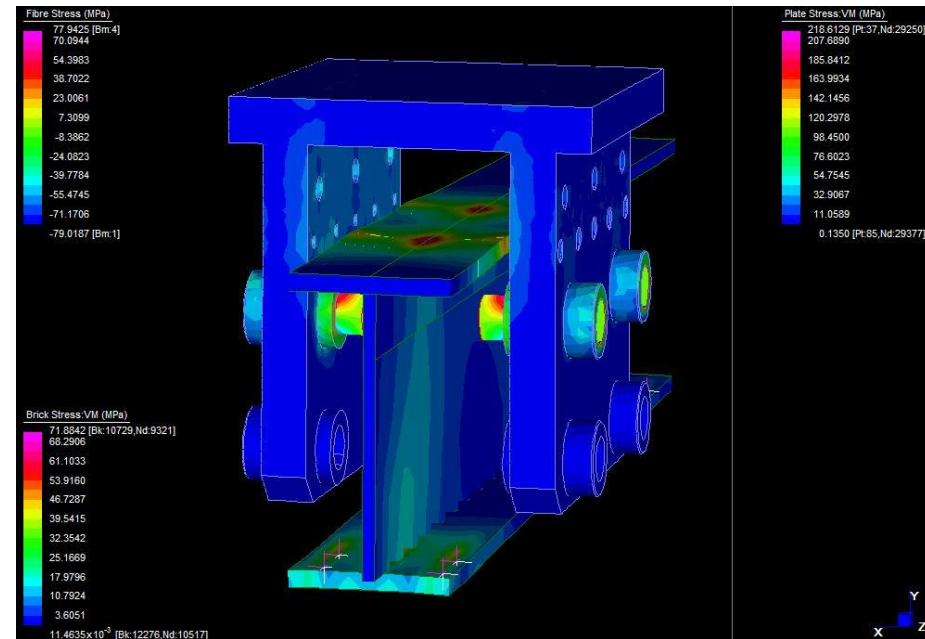
Tenere presente

Il calcolo si basa SEMPRE su ipotesi semplificative, che **VANNO VERIFICATE**

Il calcolo

La modellazione adeguata:

- *al contesto*
- *Alle tipologie di carichi e condizioni al contorno*
- *Alle verifiche da effettuarsi*





Il calcolo

Coerenza *del Sistema di unità di misura che stiamo utilizzando*

Assolutamente necessario quando si effettuano verifiche in campo dinamico e/o non lineare

La coerenza delle unità di misura che stiamo adottando si verifica tramite l'analisi dimensionale del primo principio della dinamica:

$$F = m a$$

La prova di carico è una prova sulla struttura costruita. Cura particolare dev'essere prestata affinché la struttura non sia inutilmente danneggiata durante il test (non distruttivo). Questo richiede un monitoraggio continuo del carico e della risposta elastica. (Definizione secondo Eurocodice 1)

Acceptance proof load test

It is a static load proof test higher than maximum operative conditions, but less than design load.

Proof load value:

$$P = WLL \times f_p \times f(d)$$

Where:

WLL: work limit load, the maximum limit static gross mass

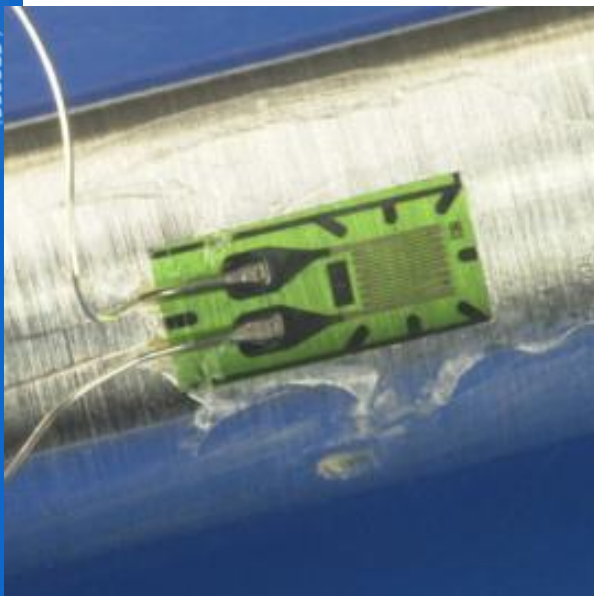
f_p: proof factor = 1.1 to 1.25

f(d): dynamic factor: defined to envelope nominal dynamic accelerations considered in the design to be given in m/s².

For example for handling-hoisting tools we usually obtain:

$$P = WLL \times 1.25 \times 1.2 \times 9.81 = 1.5 \times WLL \times 9.81 \text{ [N]}$$





Strain gauges

Lo strain gauge è un sensore di deformazione locale lungo una data direzione, sfruttando la variazione di resistenza elettrica di un conduttore.

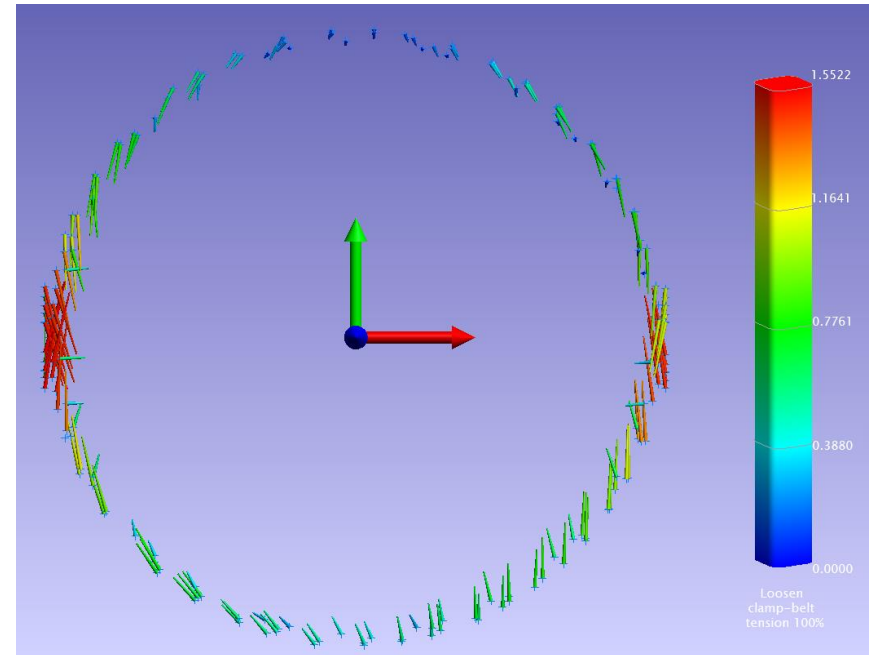
Esso va sempre collegato ad un circuito di comparazione e calibrazione, tipicamente a ponte di Wheatstone, di solito all'interno della centralina elettronica che ne consente l'elaborazione e la visualizzazione della misura.



Comparatori

Il comparatore è ancora molto usato in fase di verifica di collaudo per la semplicità di posizionamento e uso.

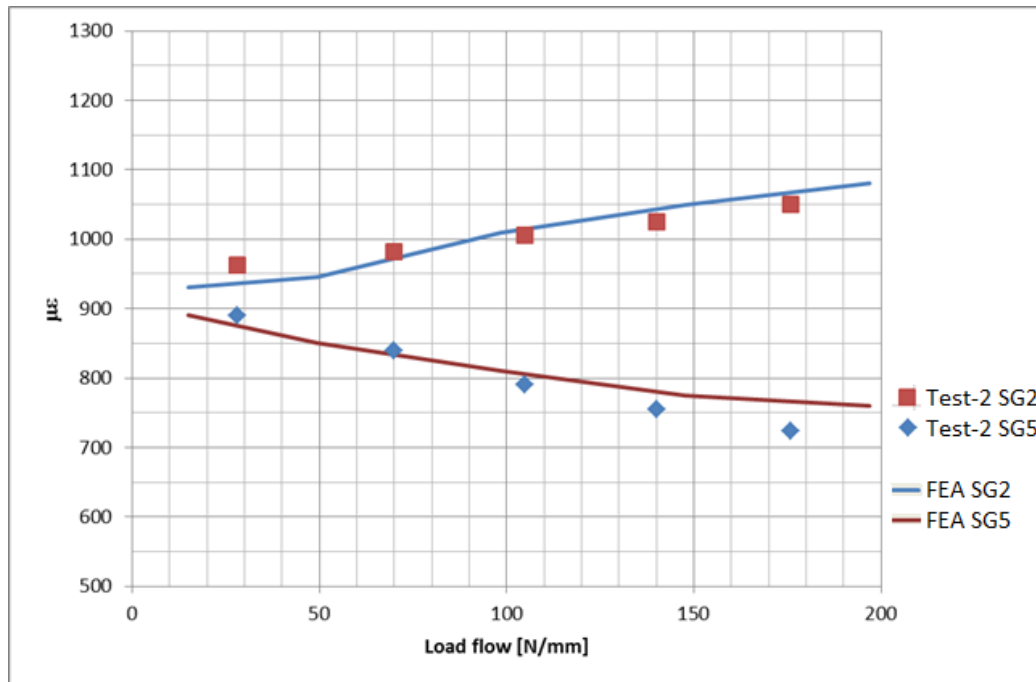
Esso è principalmente costituito da un tastatore scorrevole che senza indurre alcun carico aggiuntivo, se non pochi grammi, rileva per contatto la posizione di una superficie fuori dal suo piano, la cosiddetta '**freccia**'.



Fotogrammetria e rilievo laser scanning

Tecniche utilizzabili durante le prove statiche, rilevando, per fotogrammetria 3D, lo spostamento quindi la deformazione assoluta della struttura interessata.

Il rilievo 3d dell'oggetto si effettua sull'oggetto, sia esso a riposo che in condizioni di carico.

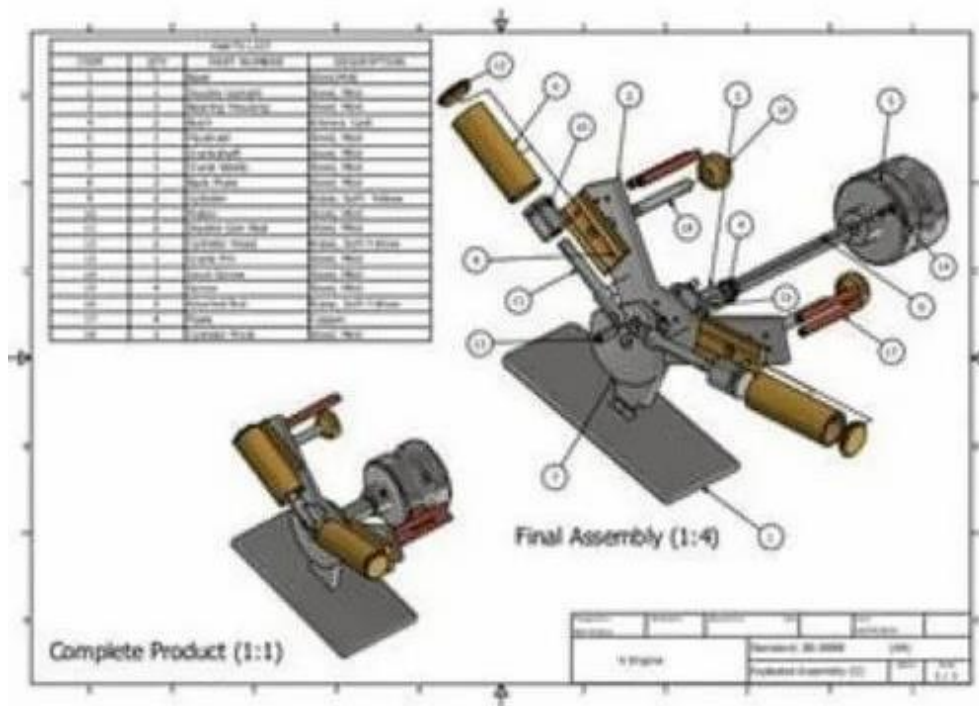


Correlazioni dei test con calcoli e FEA

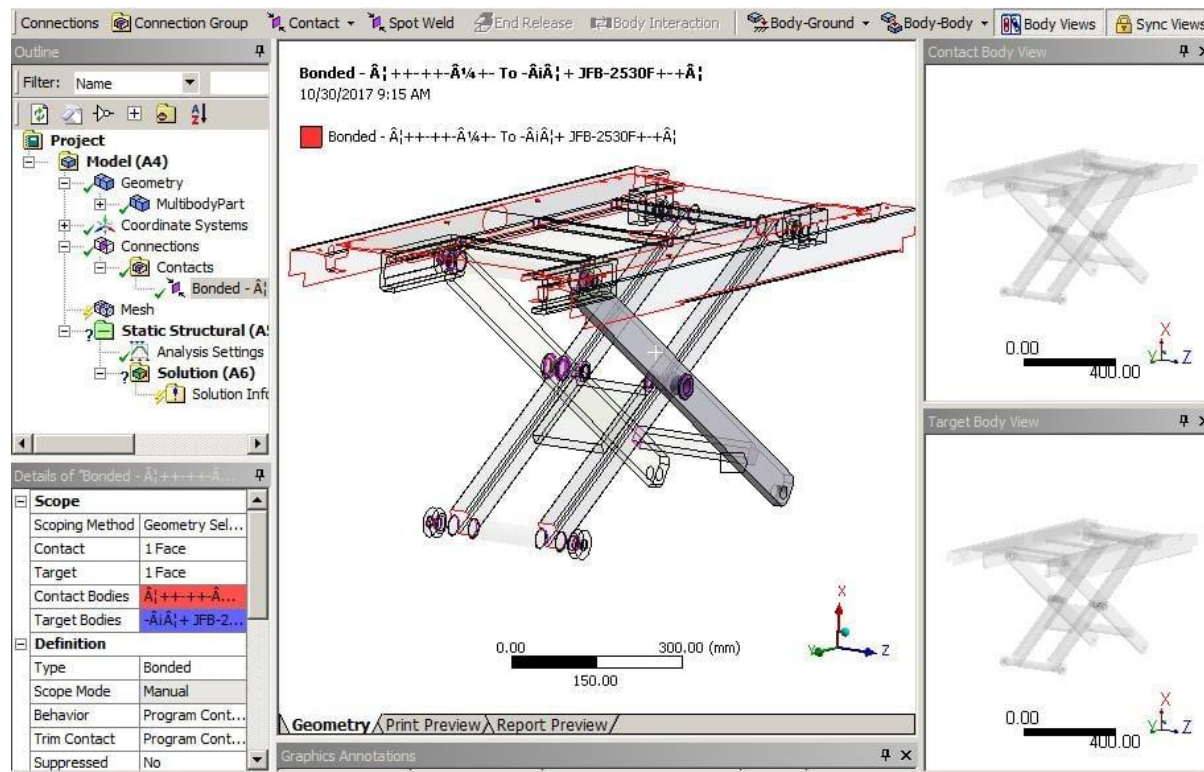
Una volta effettuata la campagna di collaudi, è possibile effettuare confronti accurati con quanto predetto in fase di calcolo.

Questo è possibile alle seguenti condizioni:

- Rispetto delle condizioni di vincolo
- Rispetto delle condizioni di carico
- Esaustività ed accuratezza di quanto misurato



- ***La definizione geometrica: il CAD***
- ***Implementazioni funzionali: il CAE***
- ***Verifiche a Calcolo: metodologie FEA e Multibody***



- *Disegnazione parametrica*
- *Disegnazione di Sistema – Assiemi – Equipaggiamenti - Componenti*
- *Definizione di vincoli: gradi di libertà e interconnessioni*
- *I formati d'interscambio*



Modellazione e Calcolo ad Elementi Finiti

➤ ***Gli step di modellazione:***

- ✓ Scelta discretizzazioni 1D, 2D, 2D
- ✓ Meshing, controlli di qualità sul meshing
- ✓ Definizioni proprietà dei materiali e degli elementi
- ✓ Vincoli e collegamenti, condizioni al contorno

➤ ***Tipologie di analisi***

- ✓ Lineare statica o dinamica
- ✓ Non lineare in base alle non linearità dei materiali e/o delle condizioni al contorno (contatti con o senza attrito)

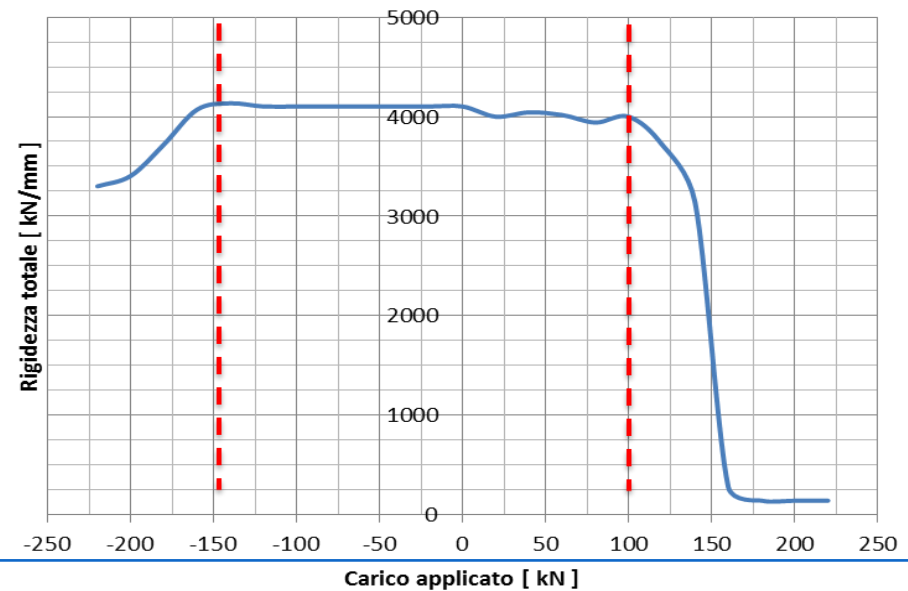
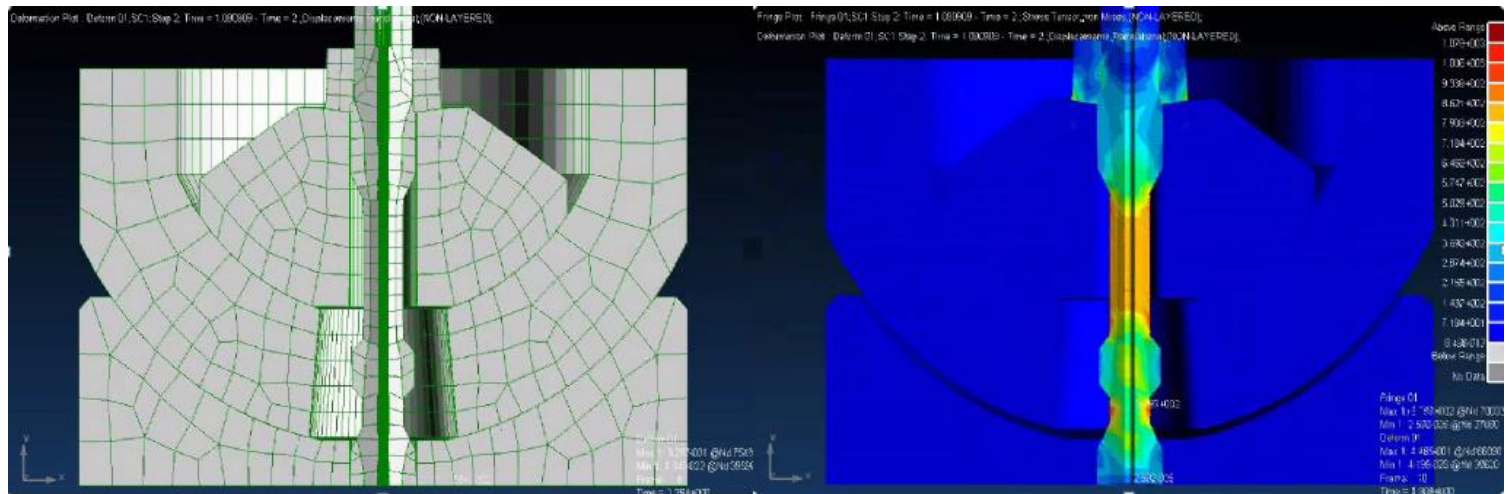
➤ ***Modellazioni e analisi di assieme***

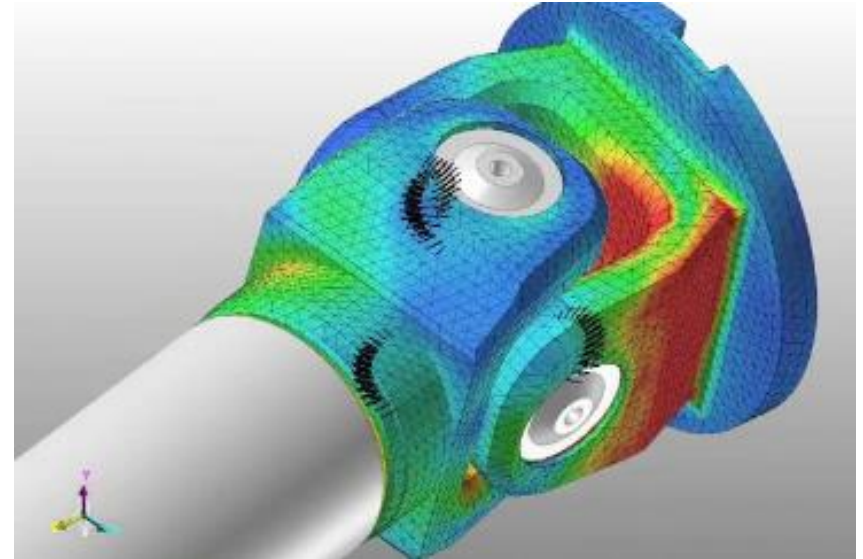
- ✓ Condizioni di contatto: scorrimenti, attriti, separazioni, ecc.
- ✓ Cinematiche di movimento
- ✓ Giunzioni precaricate



Modellazione e Calcolo ad Elementi Finiti

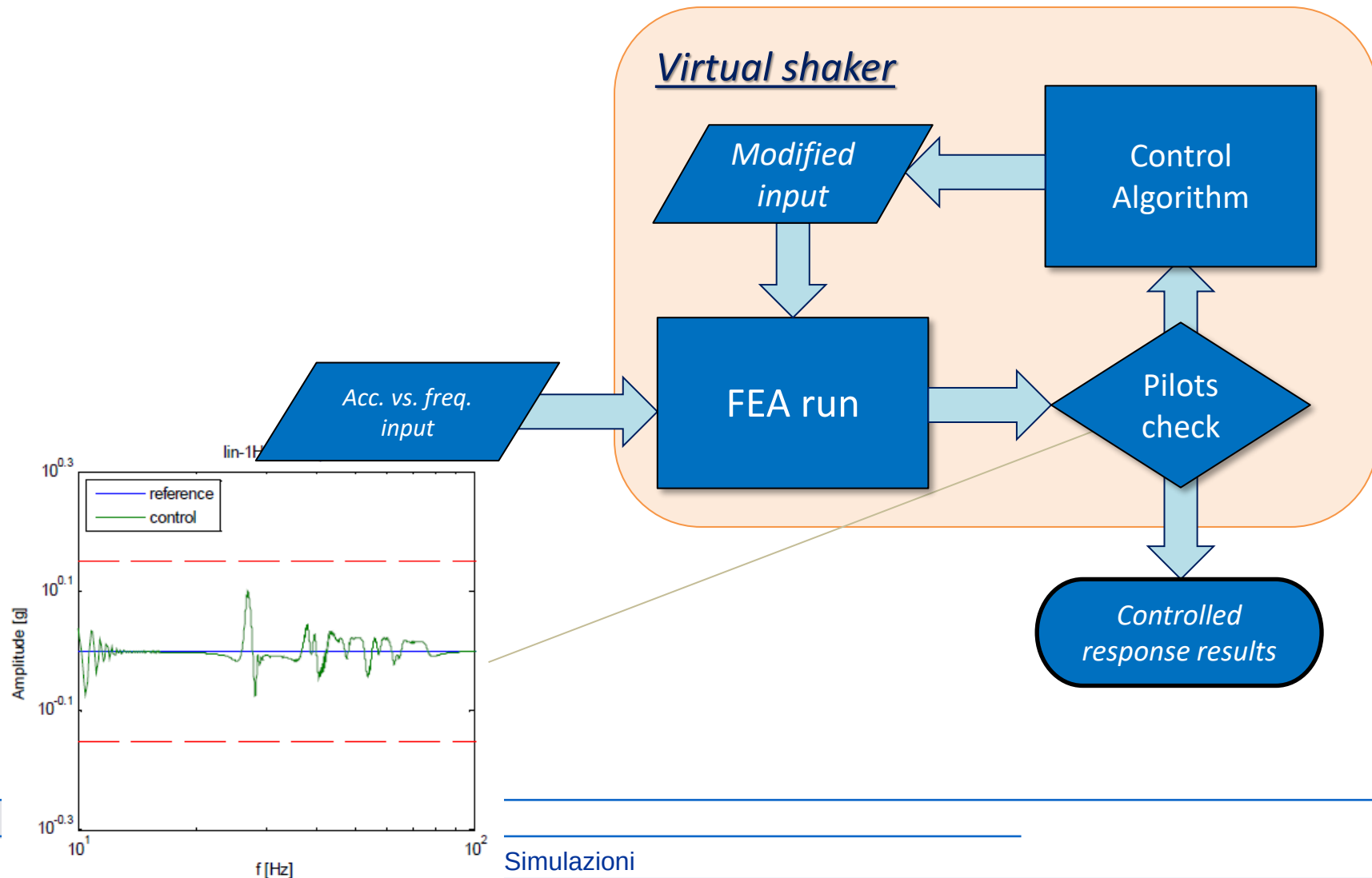
Nonlinear contact analysis for characterization of a spherical joint





- ***Modellazione Multicorpo***
- ***Simulazioni***
- ***Corpi rigidi e corpi deformabili***

Control loop





II Software

Software Proprietari

Pacchetti basati su NASTRAN

ANSIS

ABAQUS

Straus7

...

CAD - CAE

3DS SolidWorks

3DS CATIA - ENOVIA

Autodesk Inventor

PTC CREO (ex Pro/Engineer)

...

Open-Source (licenze GPL)

EDF Code_Aster

Calculix

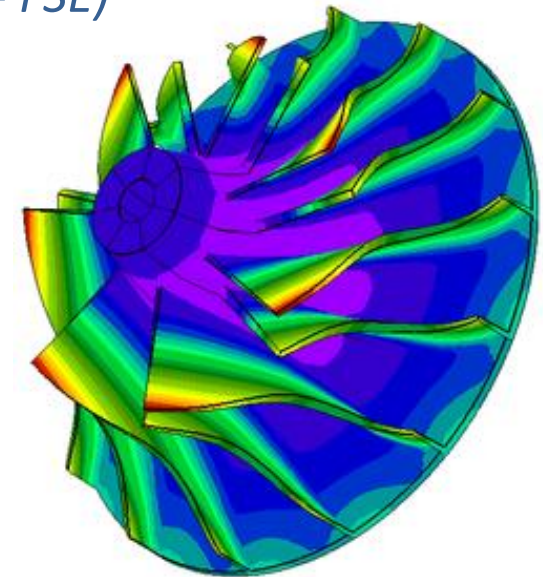
Elmer

OpenFOAM (CFD)

NIST FDS (CFD - FSE)

FreeCAD

...



L'approccio “lesson learnt”



Beijing – At least 32 workers dead for leak of steel fusion - Reuters

Per fare tesoro dell'esperienza al termine di un progetto, o dopo un evento imprevisto che incide su costi e tempi.

L'analisi dei rischi nella fase di pianificazione della produzione si basa sempre sull'esperienza precedente, ma la probabilità di eventi imprevisti e sconosciuti è sempre superiore a zero.

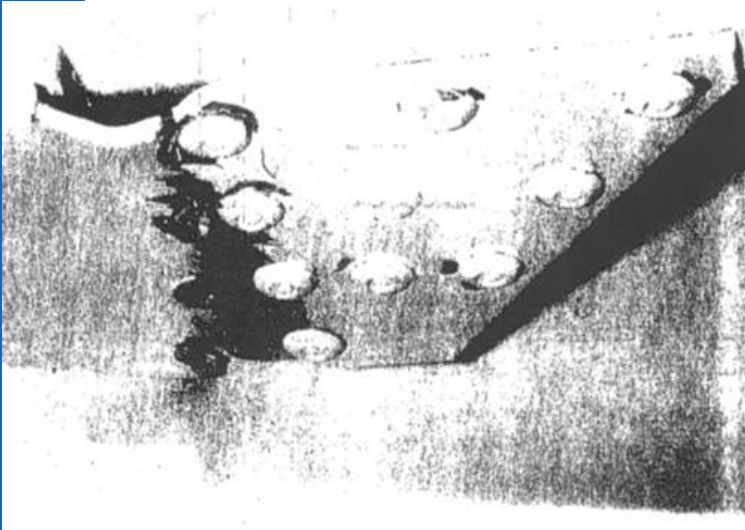
Il suo valore può essere minimizzato se ogni evento imprevisto è ben memorizzato e valutato nel momento in cui si verifica, dall'origine dell'evento fino al suo verificarsi.

È la lezione da imparare.



L'approccio “lesson learnt”

- **Detect mistakes** and missing actions that caused the hazardous or unpredicted event
- **Detect all the event related risks** even if they didn't happen consequently.
- **Define the possible improvement areas** in particular where the previously adopted actions and optimization solutions were not effective and foreseen.



The Method is applicable both to:

- ✓ Technical phases, design or operative
- ✓ To project management



*Ti mancherà il suono del quattro cilindri e di un'elica di legno,
Il canto del vento tra i tiranti mentre voli.
E ti mancheranno le persone di qui che conoscono quella musica.*

Che la creano.

“Out of My Mind: The Discovery of Saunders-Vixen” – Titolo Italiano: “le ali del tempo”
Richard Bach

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Ing. Pietro Ladisa