

Evoluzione delle norme internazionali

fib Model Code 2010

Prof. Ing. Giuseppe Mancini
Politecnico di Torino - Italy

fib SAG 5

Maggio 2002 - Febbraio 2011

1° Draft completo : Marzo 2010

Draft finale : Giugno 2011

Articolato in 10 Capitoli

1. Scopo
2. Terminologia
3. Principi di base
4. Principi per il progetto strutturale
5. Materiali
6. Caratteristiche di interfaccia
7. Progetto
8. Costruzione
9. Conservazione
10. Smontaggio (demolizione), riciclo, riuso

1. Scopo

- ❑ È documento di base per codici

Regionali
(Eurocodici)

Locali
(Nazionali)

- ❑ Contiene il background dei modelli proposti
- ❑ È documento operativo per le usuali condizioni di progetto

❖ Principali aspetti innovativi

Introduzione del tempo come parametro di progetto



Le strutture non devono solo essere
sicure / funzionali / robuste ma anche durevoli



Resistenza al deterioramento e necessità di
garantire la vita di servizio di progetto



- Impiego di materiali con adeguate proprietà
- Definizione di appropriati stati limite di durabilità
- Valutazione della probabilità di non superamento di tali stati limite
- Idoneo conceptual design
- Metodi di costruzione appropriati
- Pianificazione del percorso di manutenzione

❖ Orientamento al progetto prestazionale



Definizione di
appropriati
stati limite

Approfondita
conoscenza
materiali

Idonea
definizione
delle azioni e
loro
combinazioni

Modelli e
metodi di
progetto/verifica

- ❖ Verifica degli stati limite
Metodi basati su un approccio probabilistico



Safety formats raccomandati

Probabilistico

Coefficienti
parziali

Resistenza
globale

Deterministico

Completa
protezione

❖ Progetto per la sostenibilità



Orientamento al progetto sostenibile

❖ Strutture esistenti

Strategie per la conservazione

Ispezione e monitoraggio

Valutazione

Criteri decisionali

Progetto interventi

Certificato dopo intervento

3. Principi di base

Tre fondamentali requisiti prestazionali

Funzionalità

Sicurezza
(inclusa la
robustezza)

Sostenibilità
(in accordo ad
ISO 15392)



Rispetto dei requisiti prestazionali accertato
tramite la valutazione della probabilità di non
superamento dei corrispondenti S.L.

| | Stato limite | Indice di sicurezza β (50 anni) |
|--------------------------|--|---|
| Funzionalità | Deformazione Fessurazione Vibrazione ecc. | ~ 1.5 |
| Sicurezza strutturale | Capacità portante Collasso progressivo ecc. | ~ 3.8 |
| Sostenibilità | Limiti alle emissioni Impatto sulla società Estetica | ? |

4. Principi del progetto strutturale

Situazioni di progetto

Persistenti
($t_R = 50/100$ anni)

Transitorie
($t_R \approx 1$ anno)

Accidentali

Sismiche

Strategie di progetto

Situazioni
persistenti e
transitorie

Situazioni
accidentali e
sismiche

Sostenere
le azioni

Evitare le
azioni

Sostenere
le azioni

Evitare le
azioni

Fornire
robustezza

Metodi di progetto e Safety Formats

Metodo stati limite $\rightarrow g(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = 0$ [Funzione di stato limite]

- a) Safety Format probabilistico: β, t_R
- b) Metodo coefficienti parziali: fattori γ
- c) Metodo della resistenza globale: γ^*_R alla resistenza strutturale (Analisi non lineare)
- d) Metodo di soddisfacimento: insieme di valori da un insieme di alternative (Durata di vita strutturale)
- e) Metodo di impedimento: lo S.L. considerato non può essere raggiunto

a) $P_f = \text{Prob} \{g(\mathbf{s}, \mathbf{r}) \leq 0\}$

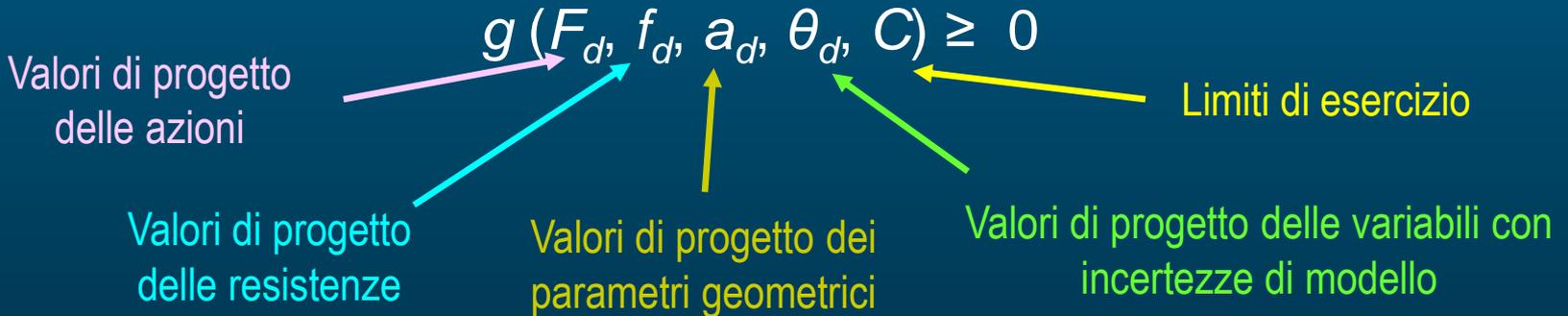


$$P_f = \text{Prob} \{r(\mathbf{R}) \leq s(\mathbf{S})\} = \text{Prob} \{R \leq S\}$$

b) Separazione delle incertezze e variabilità tramite assegnazione alle variabili di valori di progetto



Separazione non corretta per superfici di S.L. non lineari, per variabili mutuamente correlate, per design by testing



c)

$$s(F_d) \leq r(R_d)$$



$$R_d = R_m / \gamma_R^*$$

oppure

$$R_d = R_m / (\gamma_R^* \cdot \gamma_{Rd})$$

1.0 / 1.06 / 1.10

d) Insieme di regole relative a:

Progetto

Scelta dei
materiali e
loro proprietà

Procedure
di
esecuzione

5. Materiali

5.1 Calcestruzzo

- $C \leq 120 \text{ MPa}$ → Resistenza normale (NSC)
- $C > 120 \text{ MPa}$ → Alta resistenza (HSC)
- Classificazione per:

Resistenza
(Classi)

Densità
LWC
NWC
HWC

- Resistenza a compressione

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$$

8 MPa

- Resistenza a trazione

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3}$$

C ≤ 50

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot \ln(1 + 0.1 \cdot (f_{ck} + \Delta f))$$

C > 50

- Energia di frattura

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18}$$

Energia richiesta per propagare una fessura di area unitaria - G_F in [N/m]

- Resistenza per tensioni multiassiali (Ottosen)

$$\alpha \frac{J_2}{f_{cm}^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cm}} + \beta \frac{I_1}{f_{cm}} - 1 = 0$$

- Modulo di Elasticità

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3}$$

t = 28 gg

21500 MPa

Aggregati (0.7 ÷ 1.2)

- Diagramma σ - ε per carichi di breve durata

Compressione

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right)$$

Trazione

Non fessurato

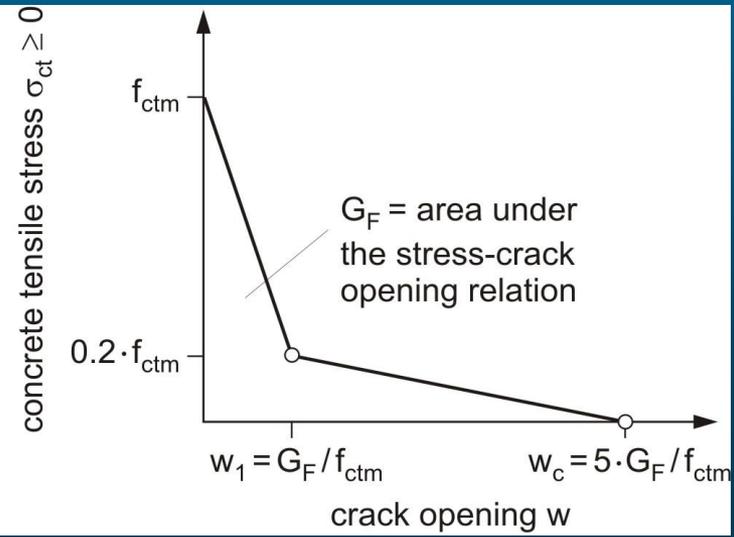
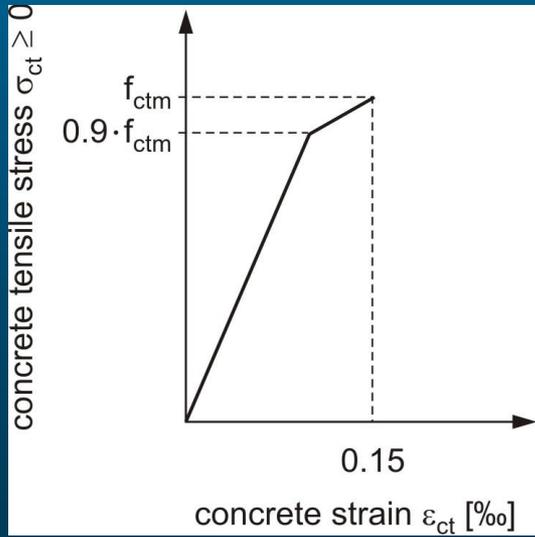
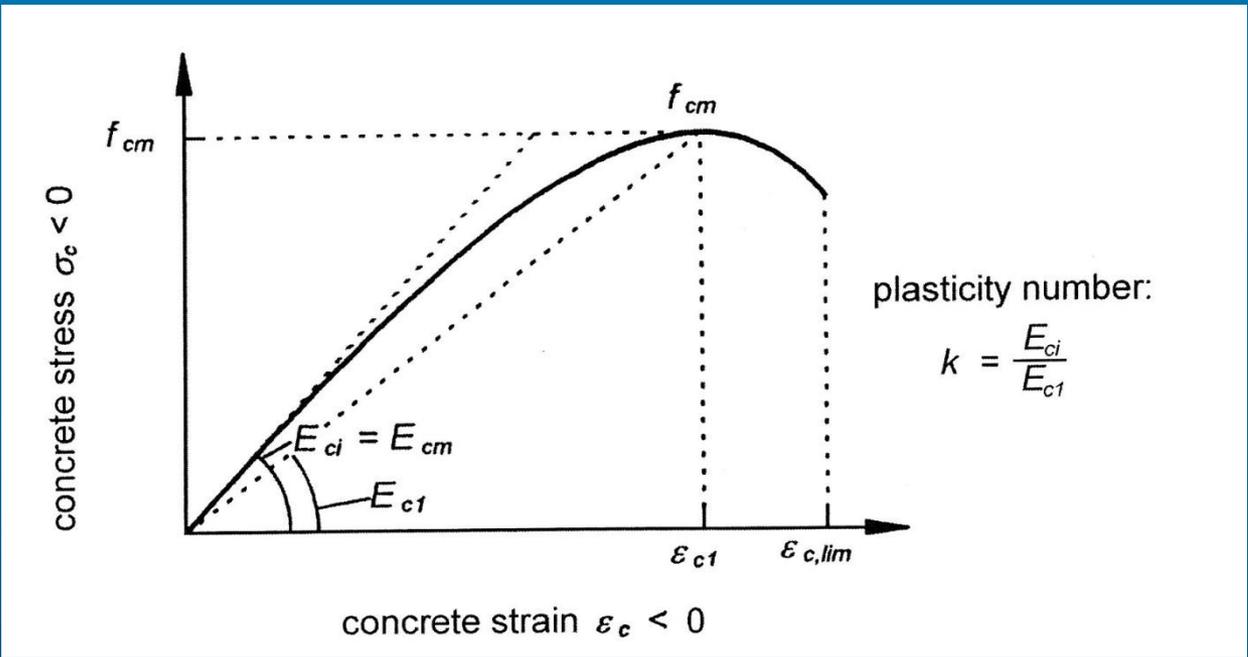
Fessurato



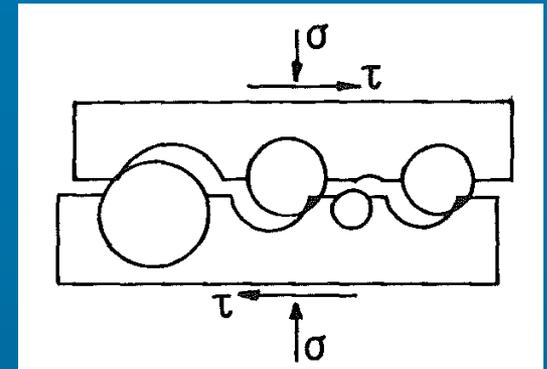
Bilineare



Relazione bilineare
tra resistenza residua
a trazione ed apertura
della fessura



- Shear-friction in campo fessurato



$$\tau = C_f \{-0.04 f_c + [1.8 w^{-0.8} + (0.292 w^{-0.7} - 0.25) f_c] \delta\}$$

$$\sigma = C_f \{-0.06 f_c + [1.35 w^{-0.63} + (0.242 w^{-0.55} - 0.19) f_c] \delta\}$$

$C_f = 1.00$ Aggregati non frantumati

$C_f = 0.35$ Aggregati frantumati

Apertura della
fessura

Spostamento lungo
la fessura

- Effetti del tempo

Sviluppo della resistenza nel tempo

Resistenza sotto azioni permanenti
(Sustained)

Sviluppo del modulo di elasticità nel
tempo

Viscosità e ritiro

- Effetti della temperatura

Maturazione

Dilatazione

Resistenza a compressione ($0^{\circ} \leq T \leq 80^{\circ} \text{ C}$)

Resistenza a trazione ($0^{\circ} \leq T \leq 80^{\circ} \text{ C}$)

Modulo di elasticità ($0^{\circ} \leq T \leq 80^{\circ} \text{ C}$)

Viscosità e ritiro ($0^{\circ} \leq T \leq 80^{\circ} \text{ C}$)

Effetto alte/basse temperature

- Resistenza a fatica

Compressione/
compressione

Compressione/
trazione

Trazione/
trazione

- Impatto \Rightarrow Effetto della velocità di variazione di deformazione e tensione

- Trasporto di liquidi e gas

Permeazione

Diffusione

Suzione
capillare

- Proprietà relative alla durabilità
 - ✓ Progressione della carbonatazione

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot R_{NAC,0}^{-1} \cdot C_S} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

- ✓ Ingresso dei cloruri

$$C(x,t) = \left(C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right) \right] \right)$$

- ✓ Cicli di gelo e disgelo
- ✓ Alkali reazione
- ✓ Degrado dovuto ad acidi
- ✓ Progressione del dilavamento

Acciaio da C.A.

Resistenza / Duttività / $\sigma-\varepsilon$

Resistenza a fatica

Comportamento a temperature estreme

Proprietà tecnologiche

Piegabilità

Saldabilità

Coefficiente di espansione termica

Tipi speciali di acciaio

Zincati

Rivestiti

Inox

Modellazione per il progetto

Acciaio da C.A.P.

Resistenza / Duttività / σ - ϵ

Resistenza a fatica

Comportamento a temperature estreme

Proprietà tecnologiche

Rilassamento

Resistenza alla stress corrosion

Coefficiente di espansione termica

Tipi speciali di acciaio

Zincati

Protetti con prodotti organici

Viplati

Modellazione per il progetto

Sistemi di precompressione (Post)

Ancoraggi / Accoppiatori

Guaine

Iniezioni

Protezione

Temporanea
Definitiva



PL1/PL2/PL3

Precompressione

Tensioni alla tesatura

Perdite immediate

Deformazione elastica

Attrito

Rientro cunei

Effetto curing

Perdite differite

Ritiro

Viscosità

Rilassamento

Allungamento al tensionamento

Disposizioni costruttive

Armatura non metallica



FRP

Fibre (FRC)

Comportamento in trazione / compressione

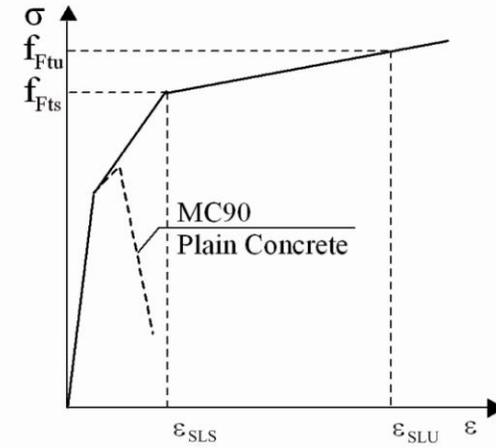
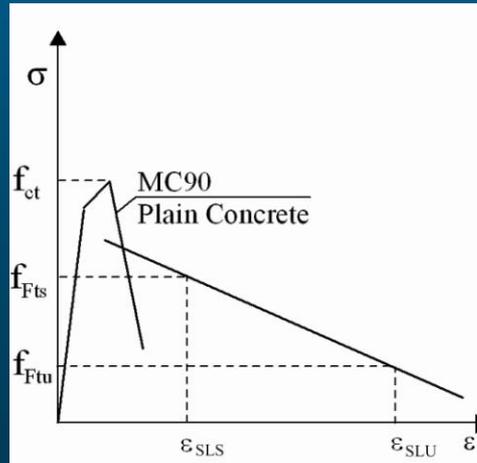
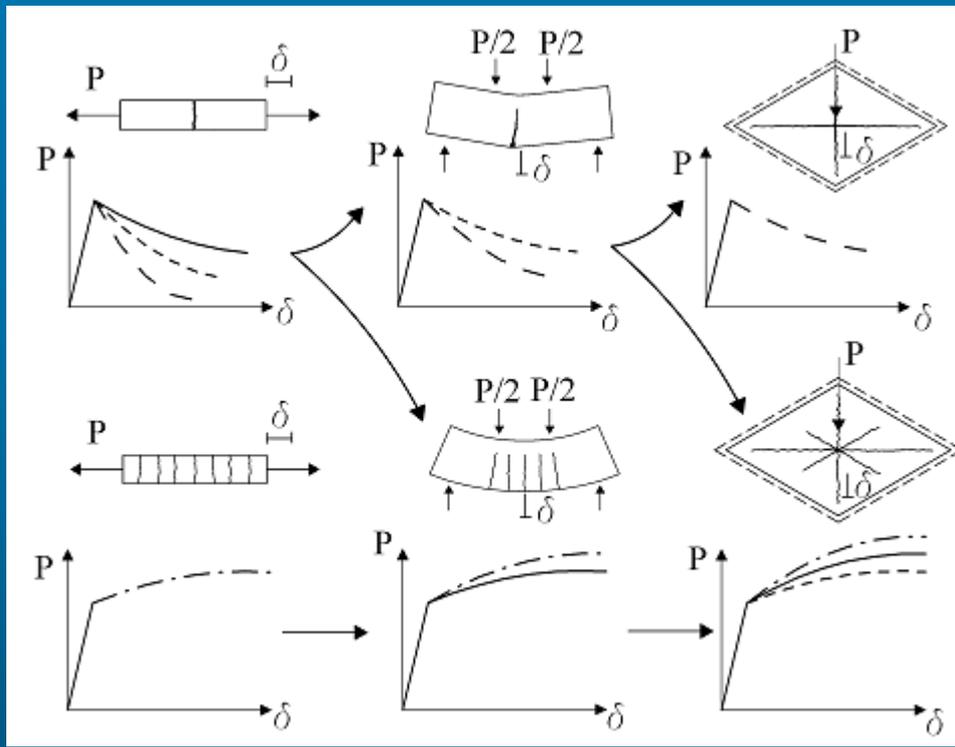
Leggi costitutive

Classificazione

Diagrammi σ - ε per S.L.E.

Coefficienti parziali per S.L.U.

Fattore di orientamento



6. Caratteristiche di interfaccia

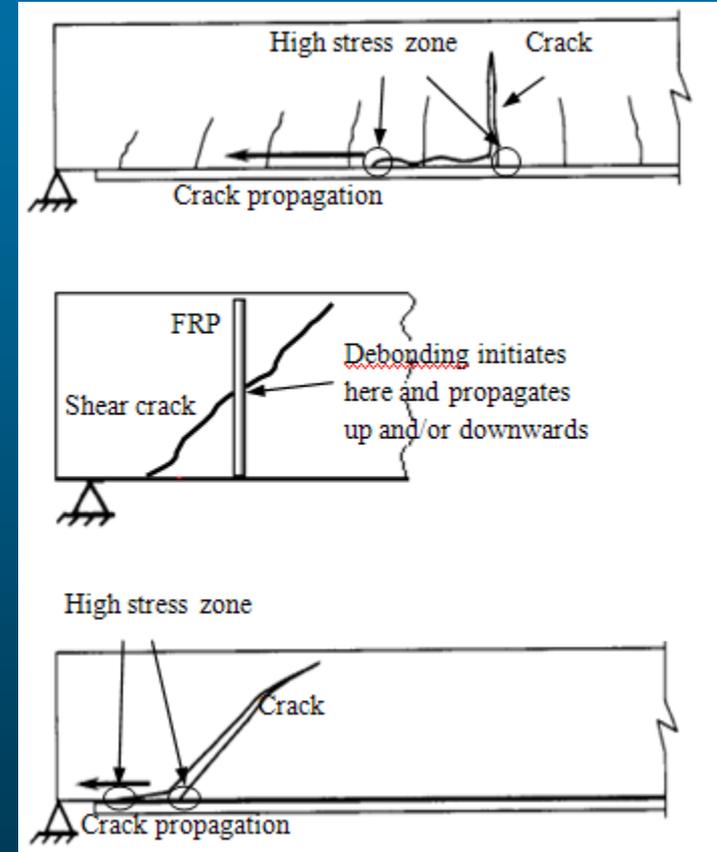
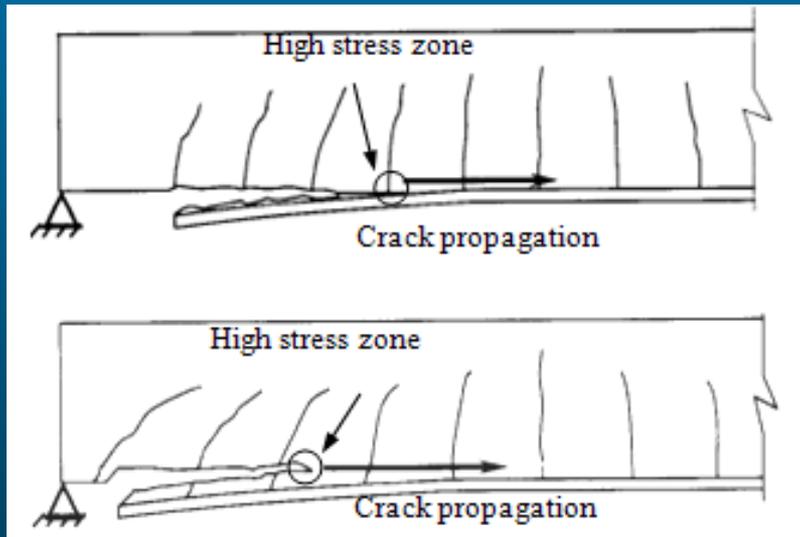
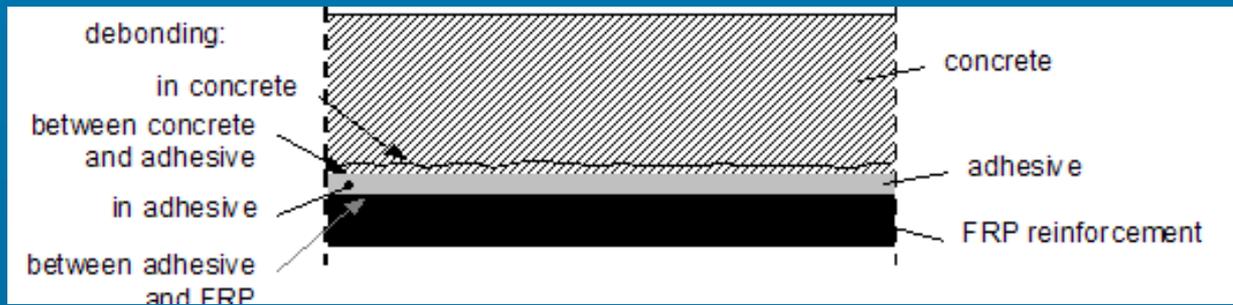
Bond - Slip

Ancoraggio e sovrapposizioni

Ancoraggio dei trefoli prestesi

Aderenza in armatura non metallica

Rotture per debonding di FRP



Shear friction

Caratteristiche di interfaccia (Rugosità)

Molto lisce
Lisce
Corrugate
Molto corrugate

Meccanismo di trasferimento del taglio

Adesione
Interlock
Attrito
Effetto Dowel

Modellazione e progetto

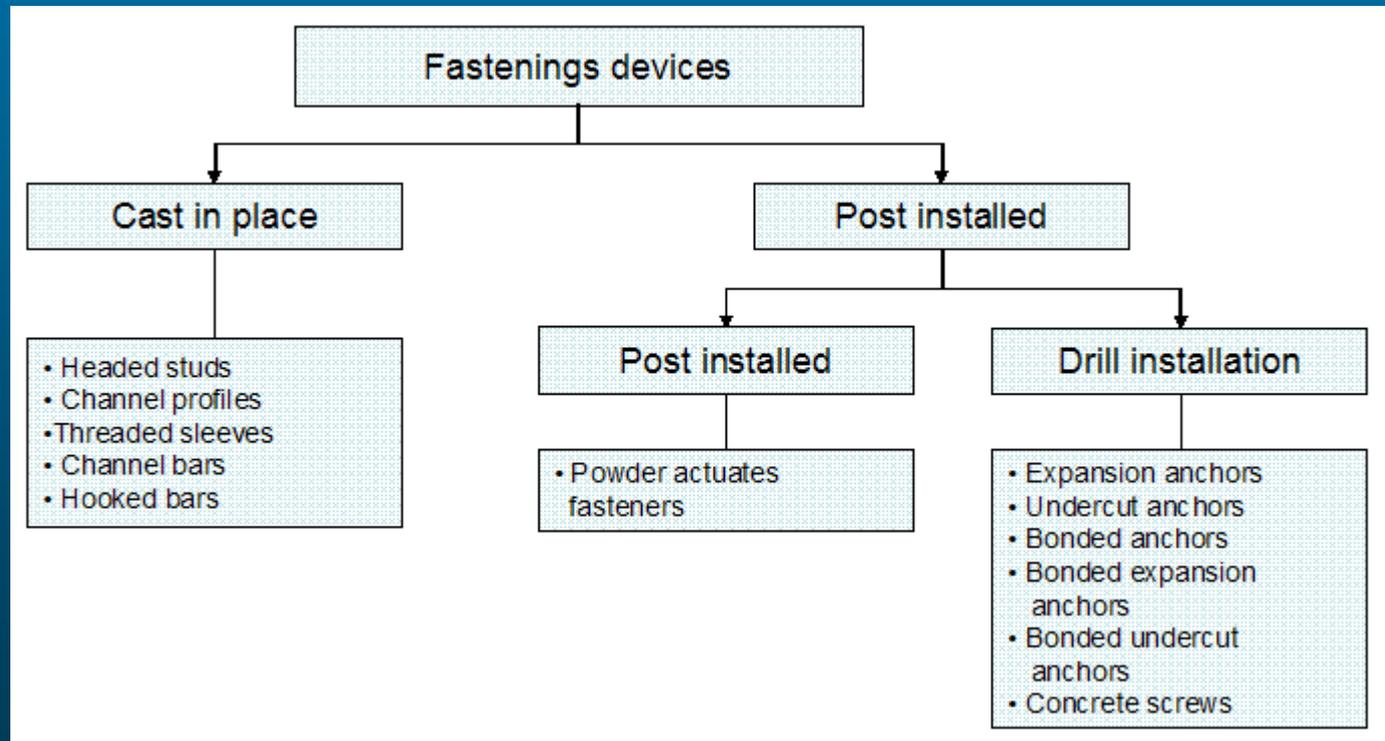
$$\tau_u = \underbrace{\tau_c}_{\text{Adhesion / interlocking}} + \underbrace{\mu \cdot (\rho \cdot \kappa \cdot f_y + \sigma_n)}_{\text{friction}} + \underbrace{\alpha \cdot \rho \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}}}_{\text{Dowel action}} \leq \beta \cdot v \cdot f_{cc}$$

Connessioni acciaio - calcestruzzo

Adesione

Interlock per
forma

Ancoraggi



7. Design

Analisi strutturale



- Elastica
- Elastica con redistribuzione
- Plastica
- Non lineare

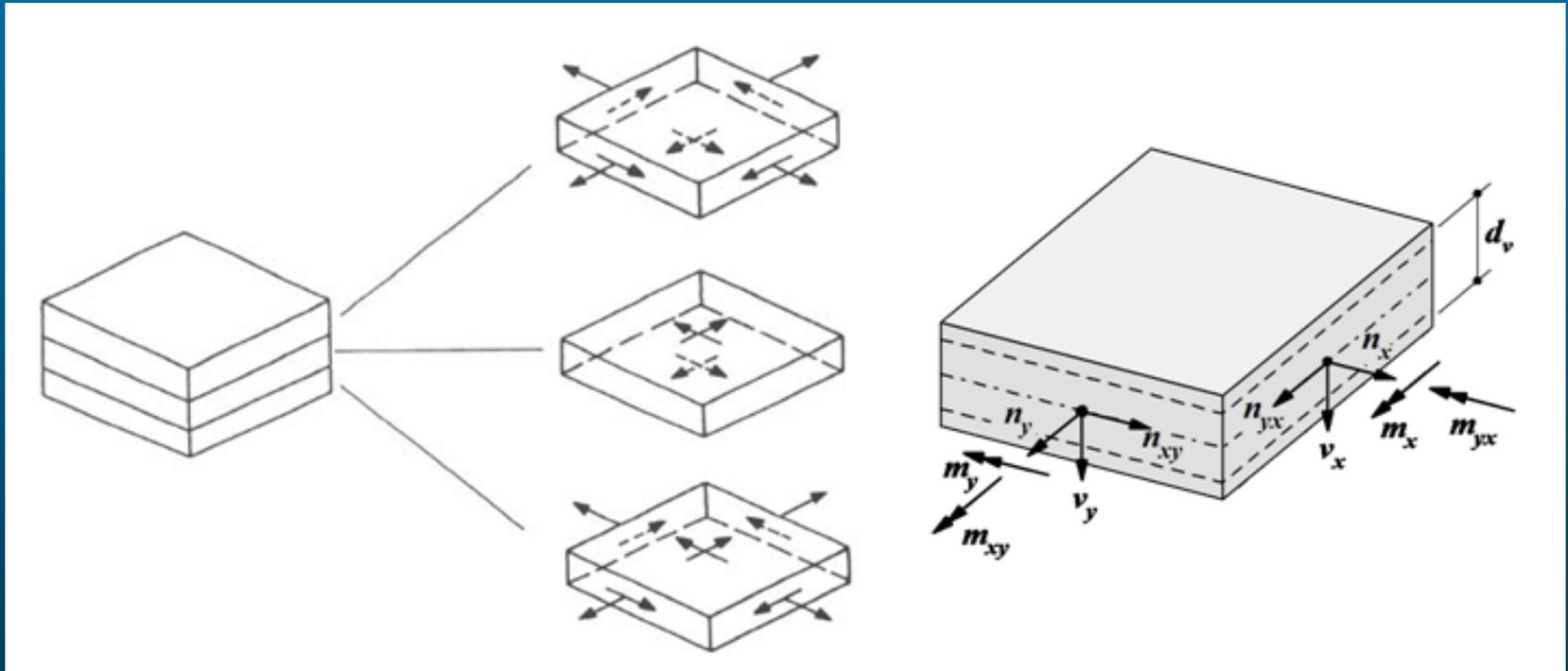
Dimensionamento

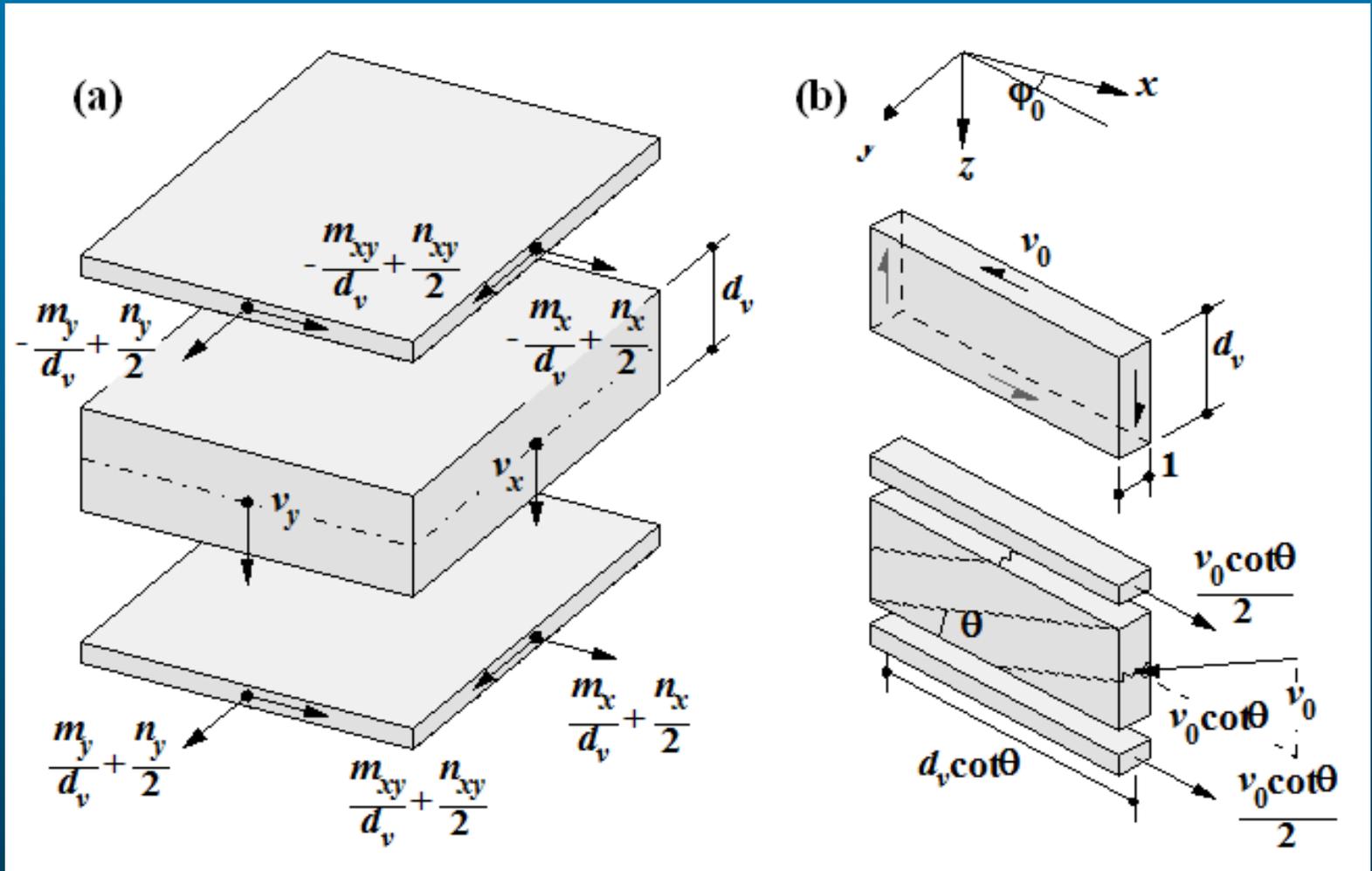


- Calcestruzzo
- Acciaio C.A.
- Acciaio C.A.P.

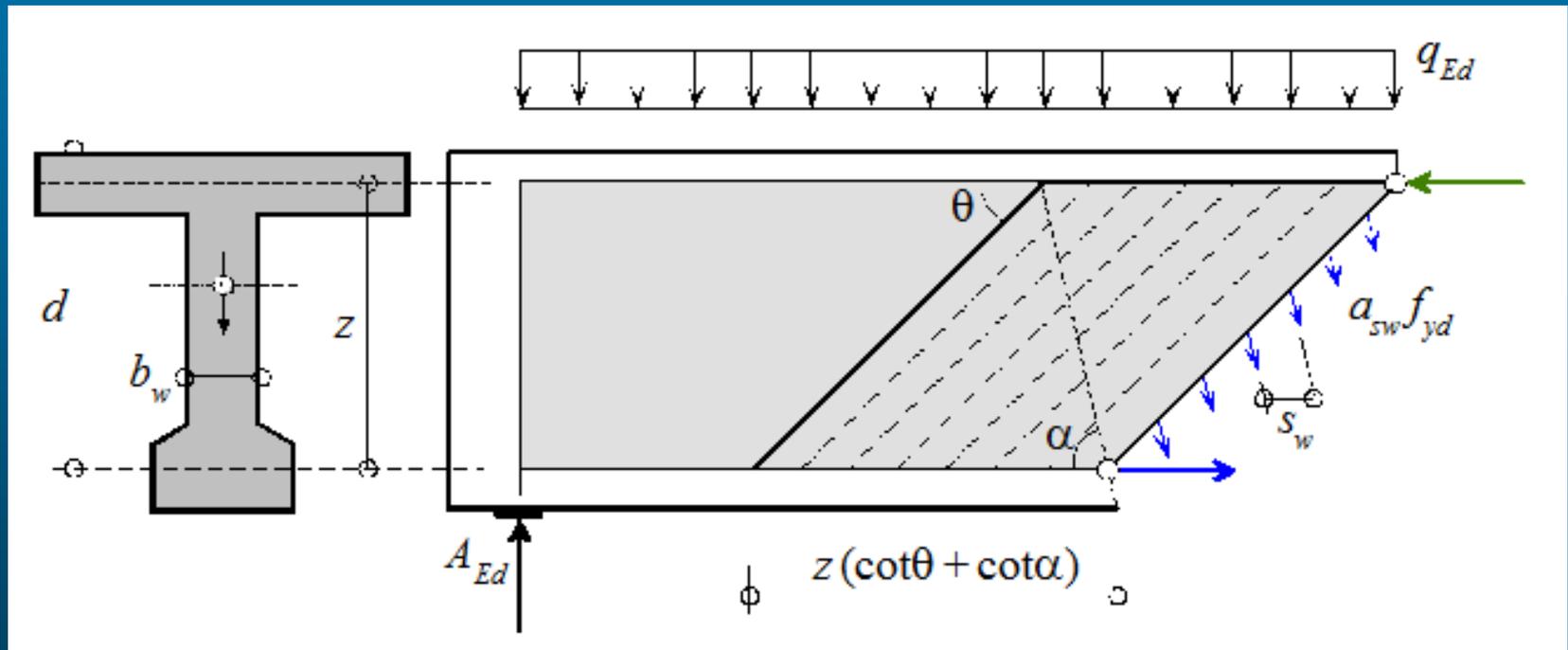
Stati limite ultimi

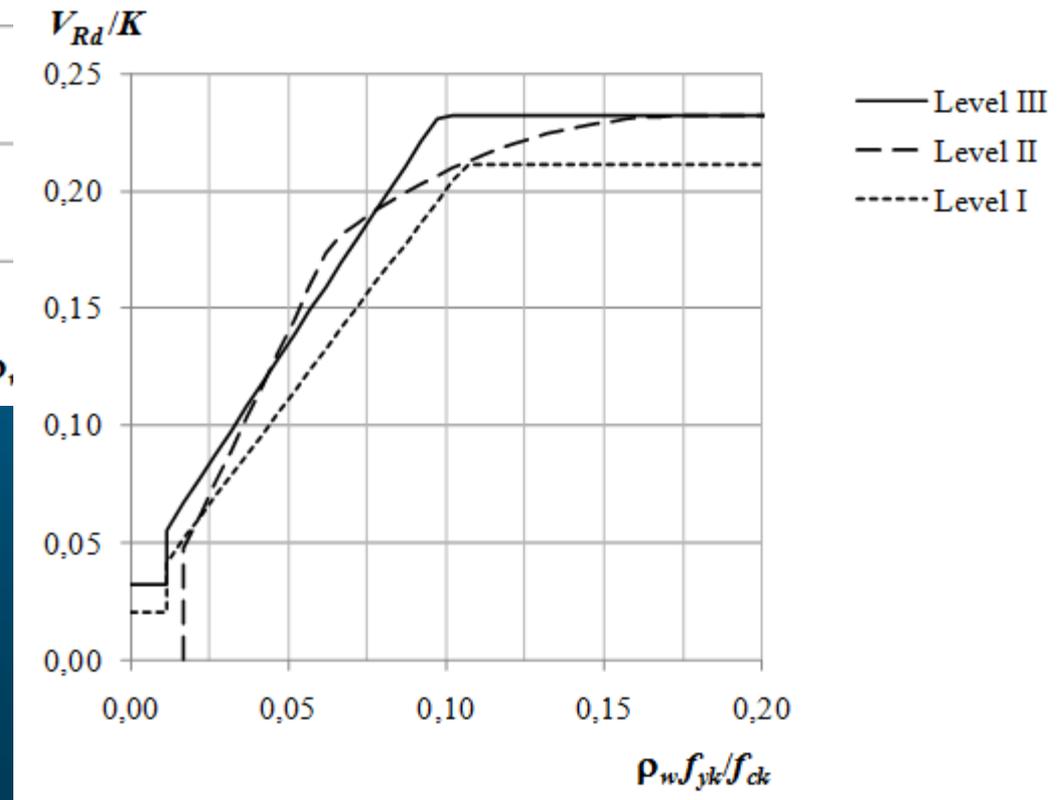
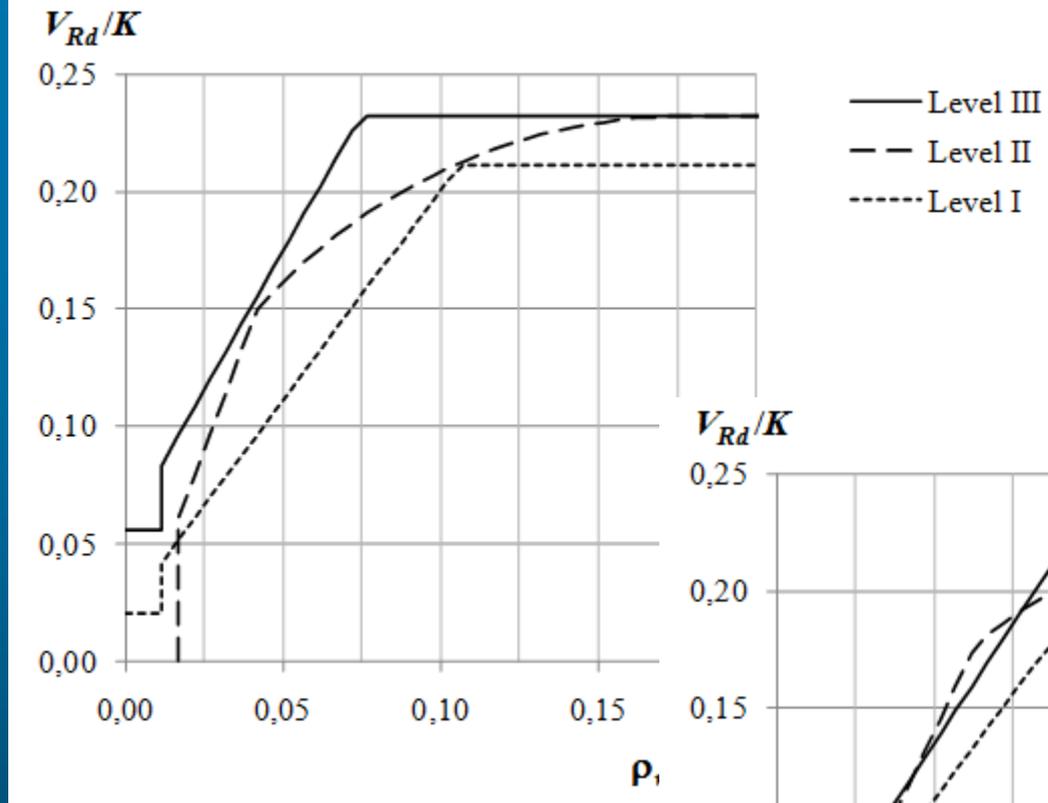
- Flessione e sforzo assiale
- Shells





- Taglio → 3 livelli di modellazione



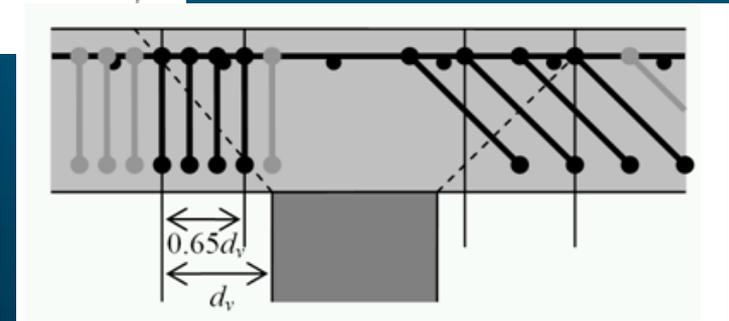
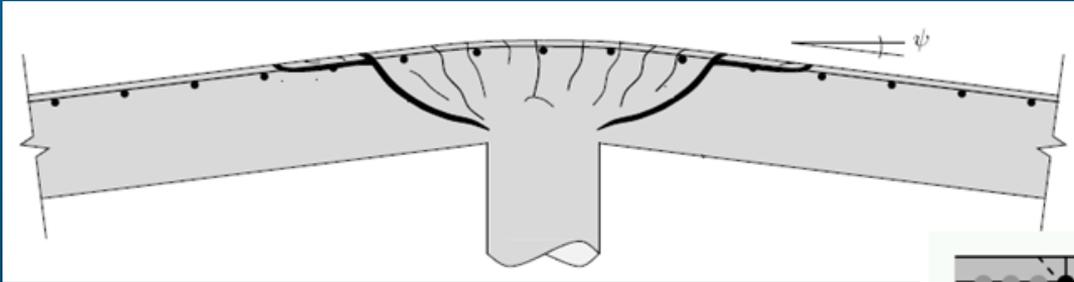


Comparison of level I, II and III results:
 $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$, $z = 300 \text{ mm}$, $d_g = 16 \text{ mm}$
 and $e_x = 0$ (upper diagram) and
 $e_x = 0.0005$ (lower diagram);
 $K = b_w z f_{ck} / g_c$.

- Taglio in calcestruzzi gettati in più fasi

$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd}$$

- Punzonamento → Nuovo modello plastico basato sulla capacità di rotazione delle solette attorno alle zone di appoggio



- Strut and Tie

→ Progetto

Strut Tie Nodo

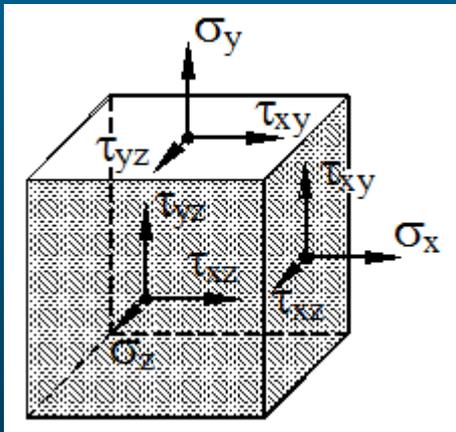
Simile a EN 1992-1-1

- Instabilità

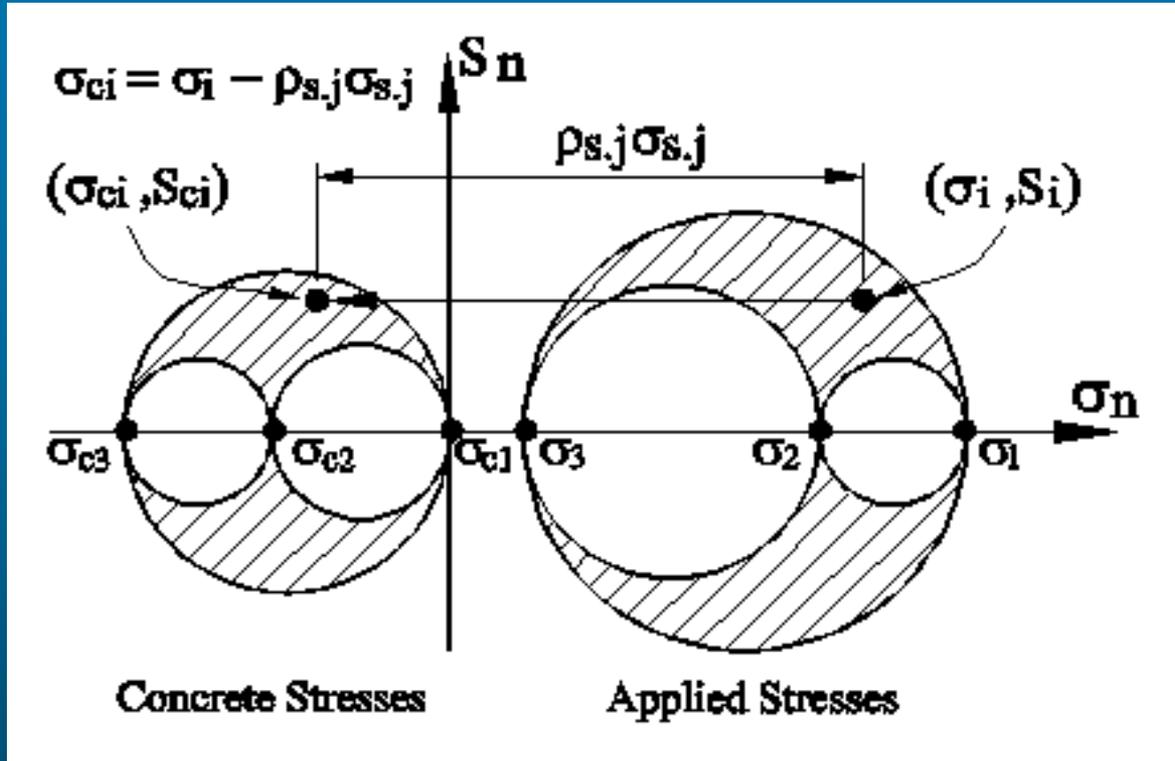
Simile a EN 1992-1-1

- Elementi 3D

→ Approccio plastico

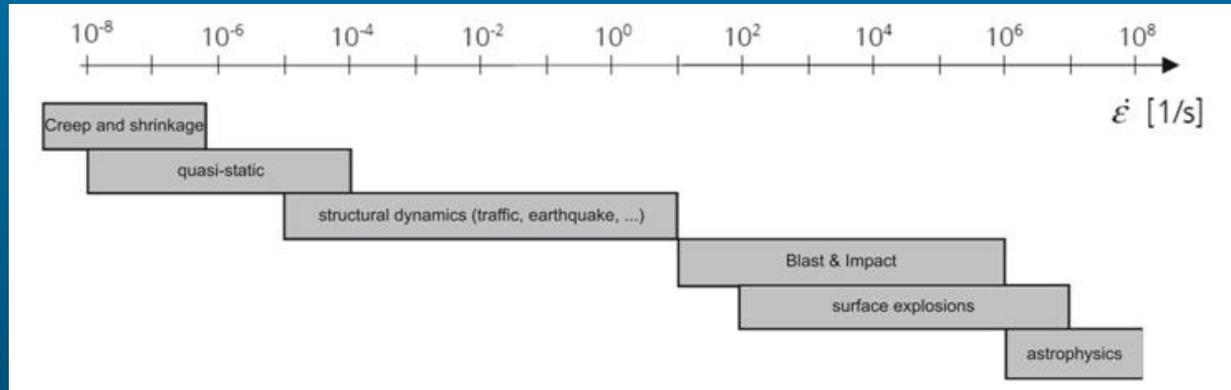


$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\sigma_{cx} + \sigma_{sx}) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & (\sigma_{cy} + \sigma_{sy}) & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_{cz} + \sigma_{sz}) \end{bmatrix}$$



Ridistribuzioni $\rightarrow \Delta\theta \leq 15^\circ$

- Fatica
 - Procedura semplificata ($N \leq 10^8$ cicli)
 - Verifica con un singolo livello di carico
 - Verifica con spettro di carico → Palmgren-Miner
- Impatto ed esplosione



- 3 approcci*
- Carichi equivalenti quasi statici ← Livello 1
 - Curve pressione-tempo standardizzate ← Livello 2
 - Calcolo NL specifico con ausilio di codici specifici ← UFC3-340-02

- Seismic design → **Format**
(Orientato a EN 1998)

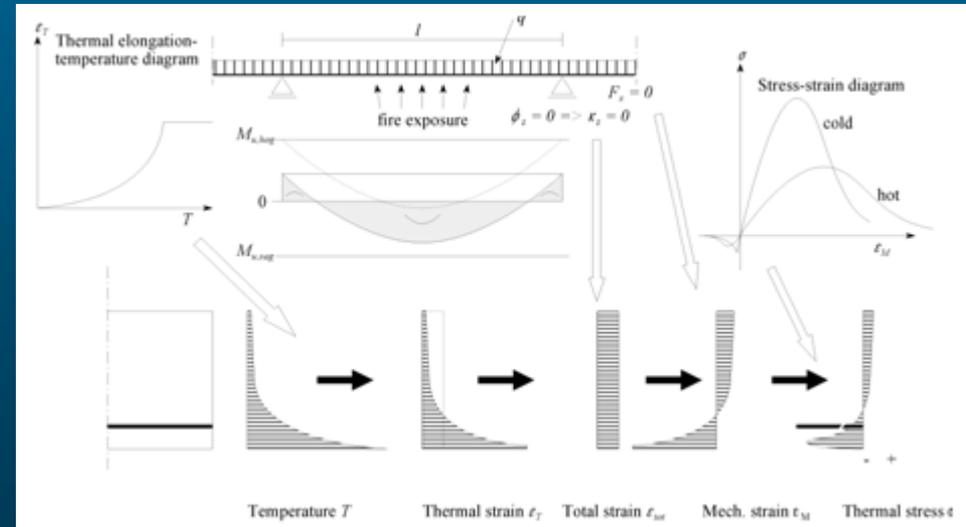
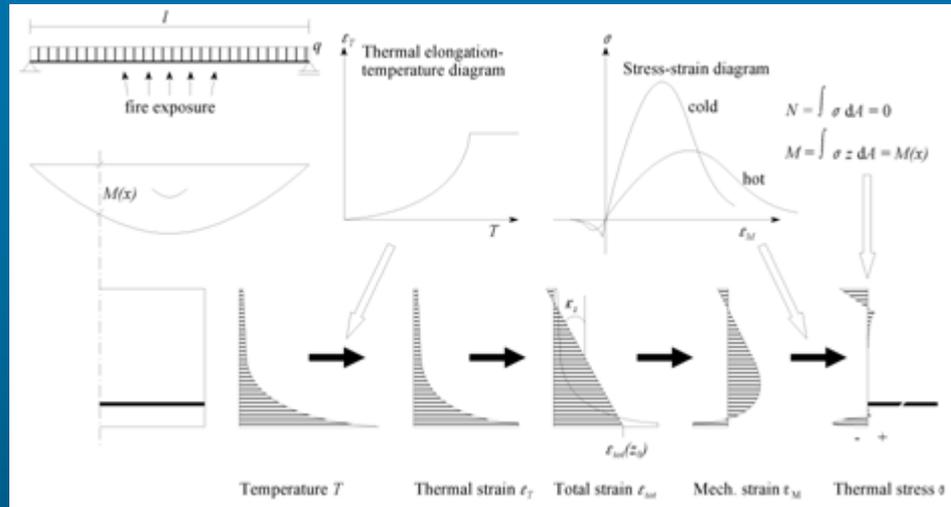
- Analisi non lineare
- Analisi lineare
Semplificata Modale

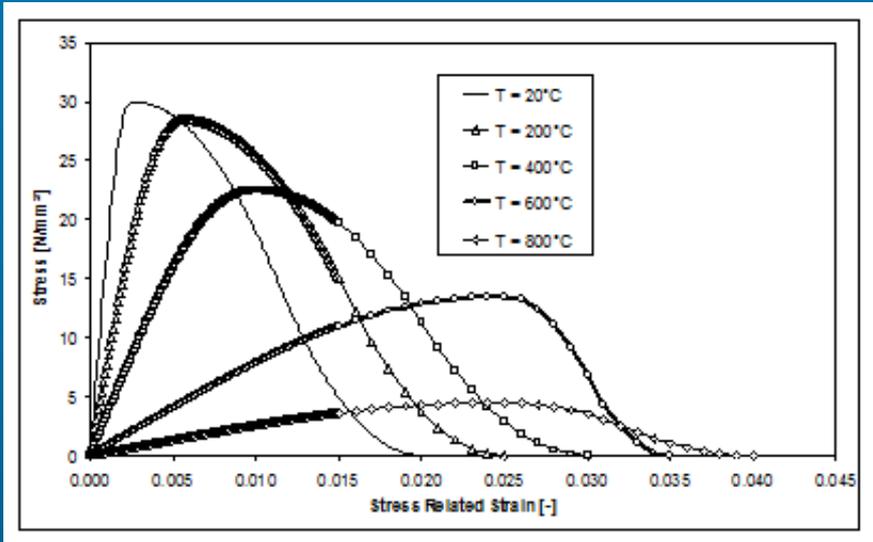
- SLU per condizioni estreme di temperatura

- Condizioni di fuoco
- Condizioni criogeniche

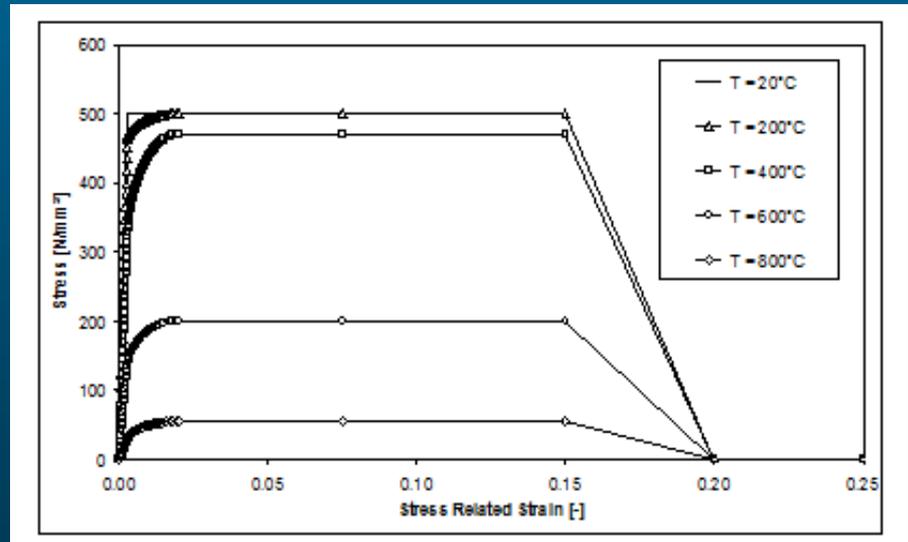
■ Fuoco

- Effetti diretti ed indiretti del fuoco





- Comportamento dei materiali



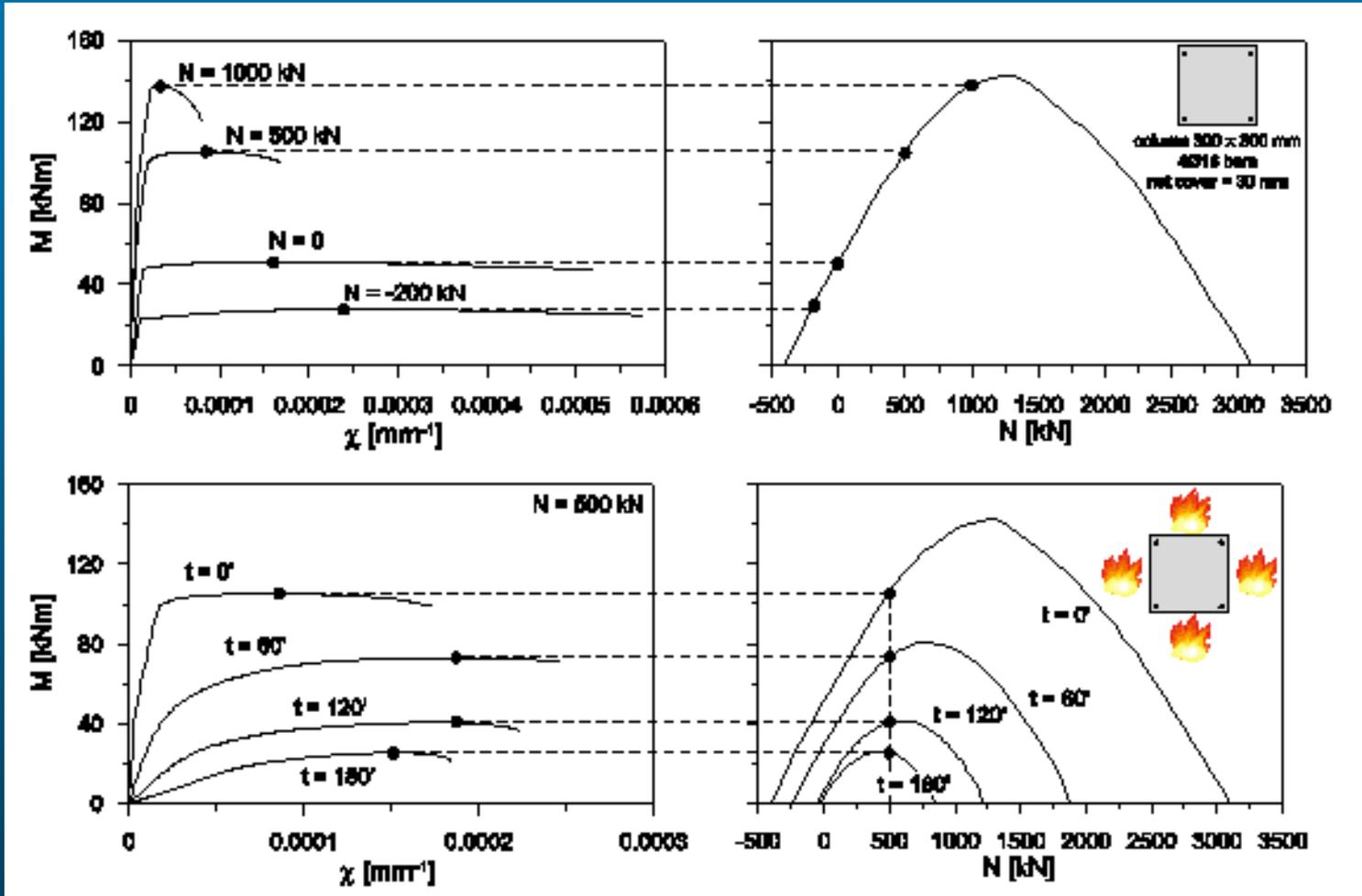
- Metodi di calcolo \Rightarrow Analisi sezionale



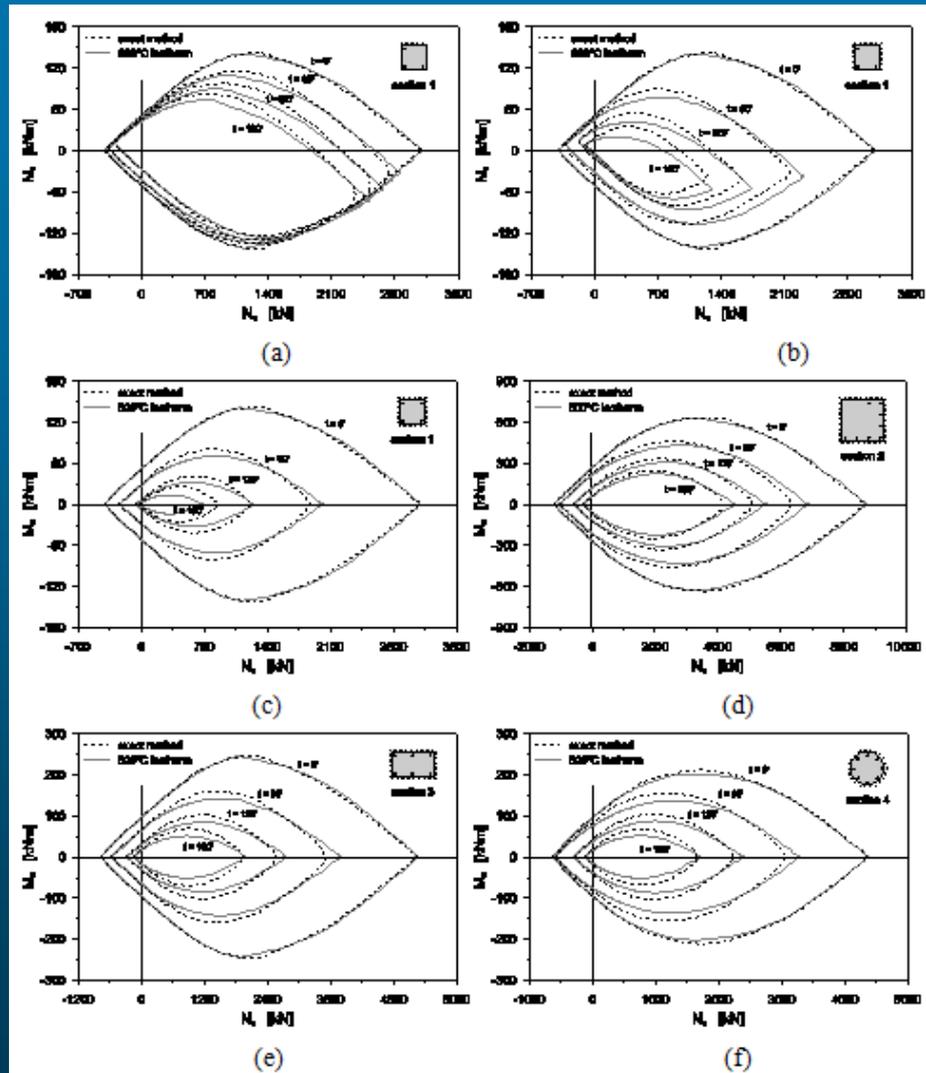
Uso di dati
tabulati
(livello 1)

Uso di isoterme di
riferimento
Metodo delle zone
(livello 2)

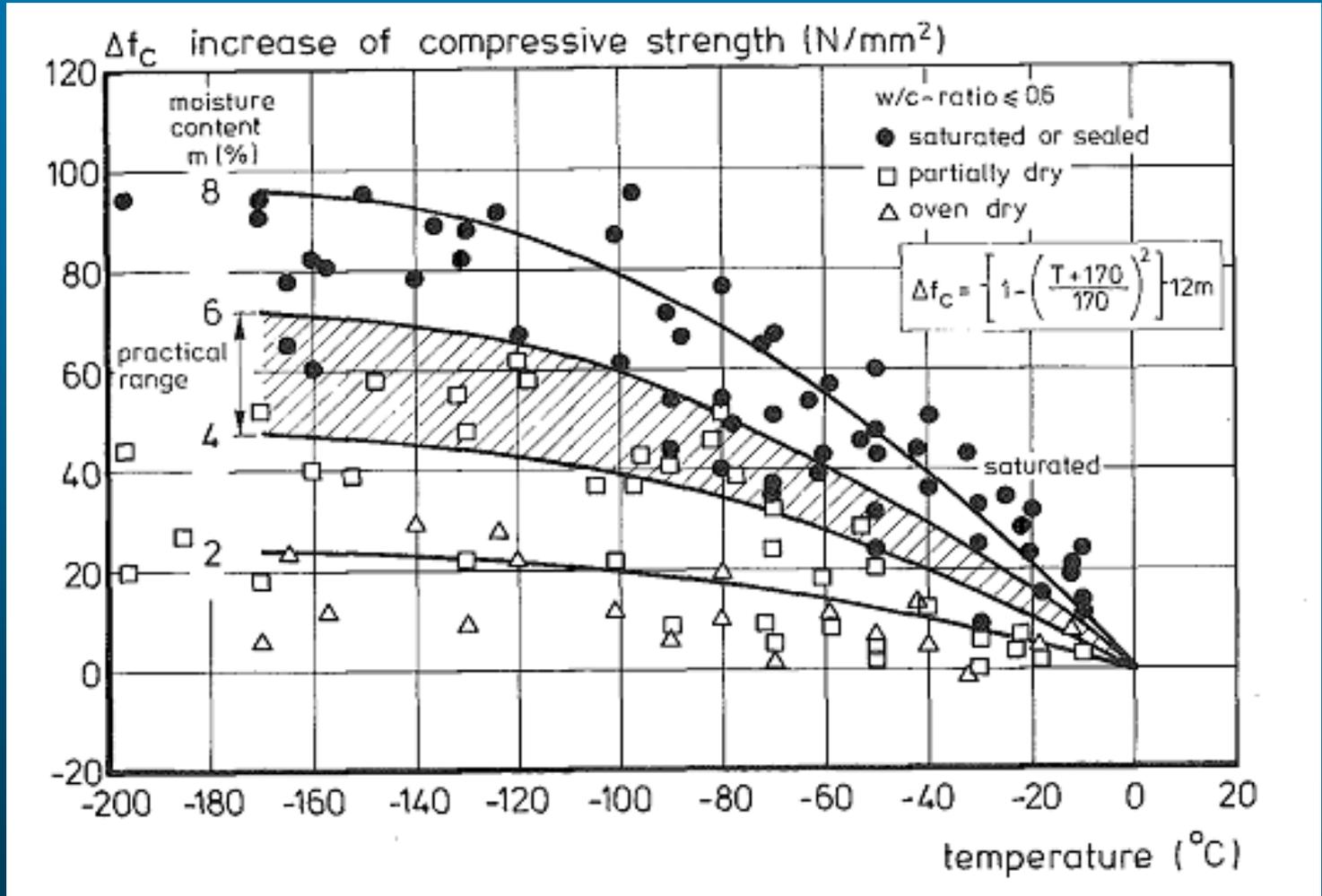
Uso di leggi $\sigma-\varepsilon$
dipendenti da T
con procedura
incrementale
(livello 3)



• Metodi di calcolo \Rightarrow Elementi strutturali



■ Temperatura criogenica



■ Stati Limite di Esercizio

Tensioni

Apertura
fessure

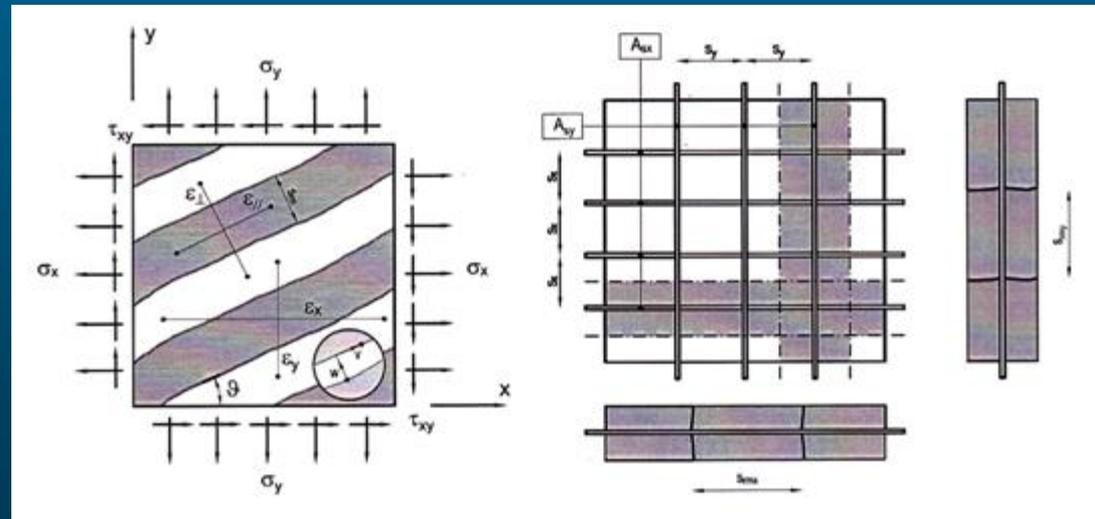
Deformazione

Vibrazioni



*Effetto dello spessore
del copriferro*

■ Fessurazione in 2D



- Vibrazione

| Structures | Frequency (s ⁻¹) f_{crit} |
|---|---|
| Gymnasia and sports halls | 8.0 |
| Dance rooms and concert halls without permanent seating | 7.0 |
| Concert halls with permanent seating | 3.4 |
| Structures for pedestrians and cyclists | See below* |

* Natural frequencies between 1.6 and 2.4 s⁻¹ and between 3.5 and 4.5 s⁻¹ are to be avoided in structures for pedestrians and cyclists. Joggers can also cause vibrations in structures with natural frequencies between 2.4 and 3.5 s⁻¹.

- SLU e SLE per strutture FRC

Flessione e
forza assiale
in travi

Taglio e
torsione in
travi

Lastre

Piastre

- Stati limite associati alla durabilità



Basati sul Model Code for Service Life Design
(Bull. 34)



Influenza delle fessure sulla corrosione delle
armatura

- Robustezza
Strategie

Limitare il danno strutturale

Dare sufficiente resistenza agli elementi chiave della struttura

Ridurre la probabilità di intervento della azione o la sua intensità

Ridurre gli effetti della azione sulla struttura

Mitigare le conseguenze del collasso

- **Sostenibilità**

Impatto
sull'ambiente

Impatto
sulla
società

Estetica

- **Verifiche tramite simulazioni numeriche**



NL FEM



Validazione

Prove di base sui
materiali

Prove su
struttura

Test di sensitività
della mesh



- Safety Formats per l'analisi N.L.

Metodo
probabilistico

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(\alpha \beta)$$

Metodo del
coefficiente
globale

$$\gamma_{Gl} = 1.27$$

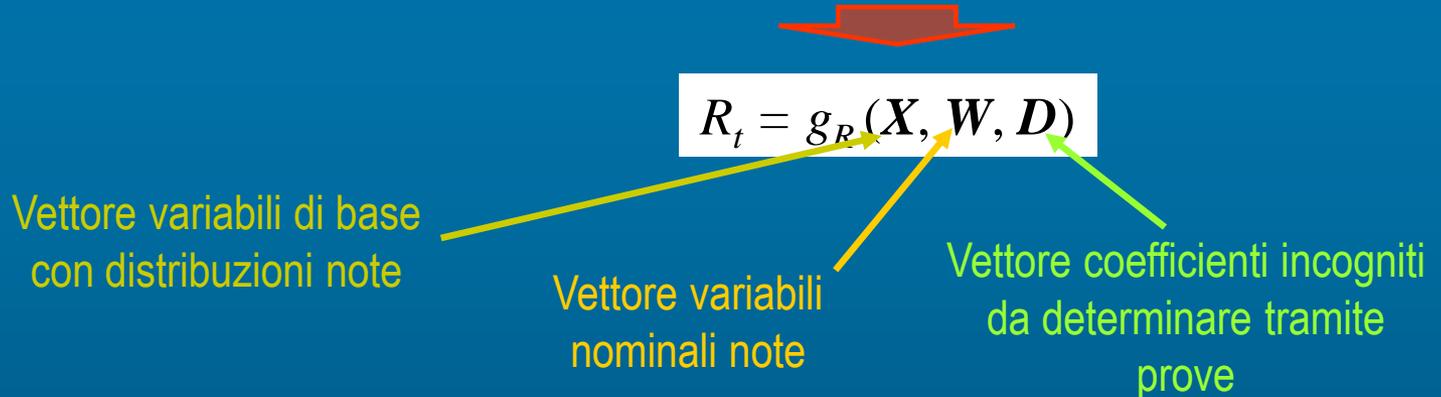
Metodo del
coefficiente di
variazione della
resistenza

$$\gamma_R = \exp(\alpha_R \beta V_R)$$

Metodo dei
coefficienti
parziali

$$R_d = r(f_d, \dots)$$

- Design by testing \Rightarrow Modello di base fisico o empirico



- Stima coefficienti "D"

Metodo
minimi
quadrati

Metodi di max
probabilità
(verosimiglianza)

Analisi di
regressione
Bayesiana

8. Costruzione

Gestione della qualità

Lavorazione acciaio da C.A.

Lavorazione acciaio da C.A.P.

Messa in
tensione

Iniezione

Sigillatura
testate

Casseforme e centine

Esecuzione getto

Messa in
opera

Compattazione

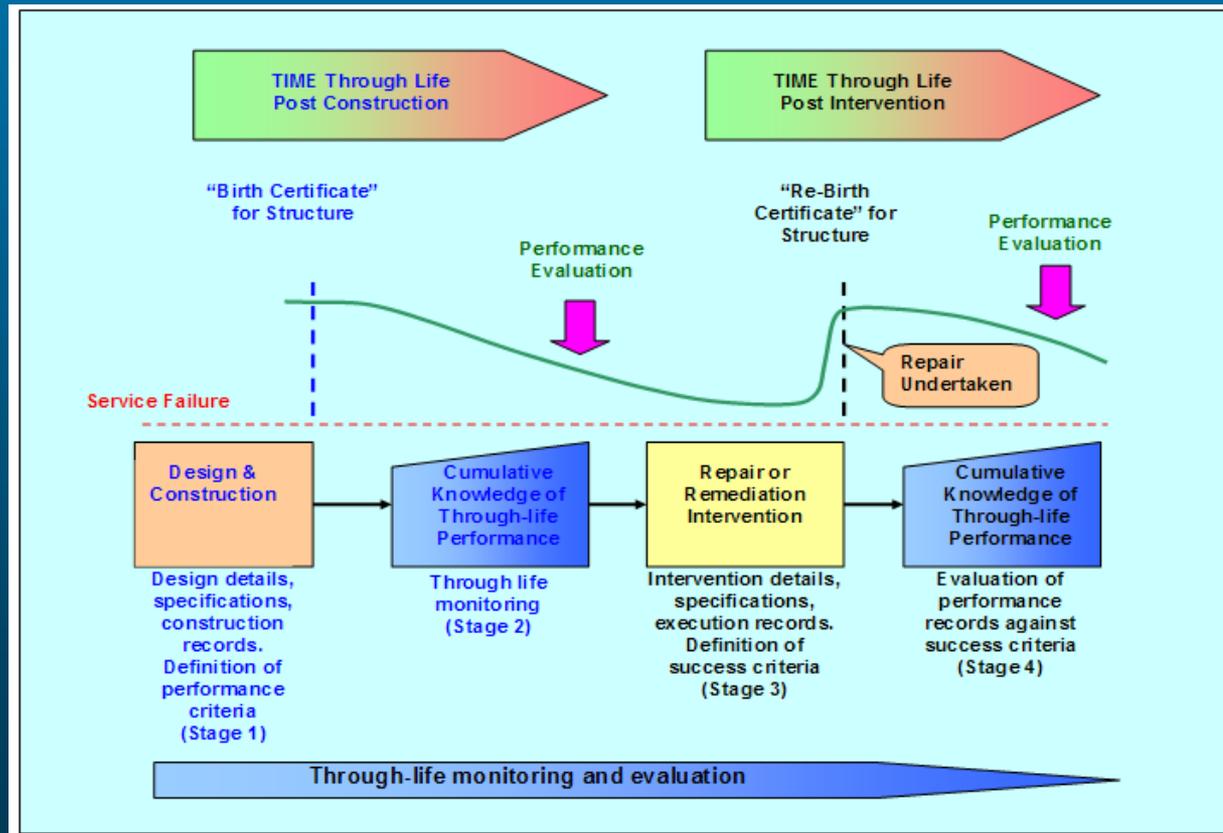
Curing

9. Conservazione

Strategie

Misure proattive

Misure reattive



10. Smontaggio / Riuso



Da prevedersi in
progetto/esecuzione

fib Model Code 2010



Il padre dei nuovi Eurocodici
(dopo il 2017)



Il codice del prossimo ventennio

Grazie per l'attenzione