



FEDERAZIONE ORDINI
INGEGNERI CALABRIA



Organizzato dall'Ordine degli Ingegneri di Catanzaro.
In collaborazione con gli Ordini degli Ingegneri di:
Cosenza – Crotone – Reggio Calabria – Vibo Valentia

Strutture in calcestruzzo armato: influenza del danno localizzato sulla vulnerabilità statica e sismica

CONVEGNO ON LINE - 22 Giugno, 2020 – ore 15:00

***Vulnerabilità delle strutture soggette
a danno localizzato.***

Parte terza

Francesco Oliveto – Parte terza

Strutturista, Geotecnico, Esperto in Modellazione ed Analisi Avanzate



FEDERAZIONE ORDINI
INGEGNERI CALABRIA

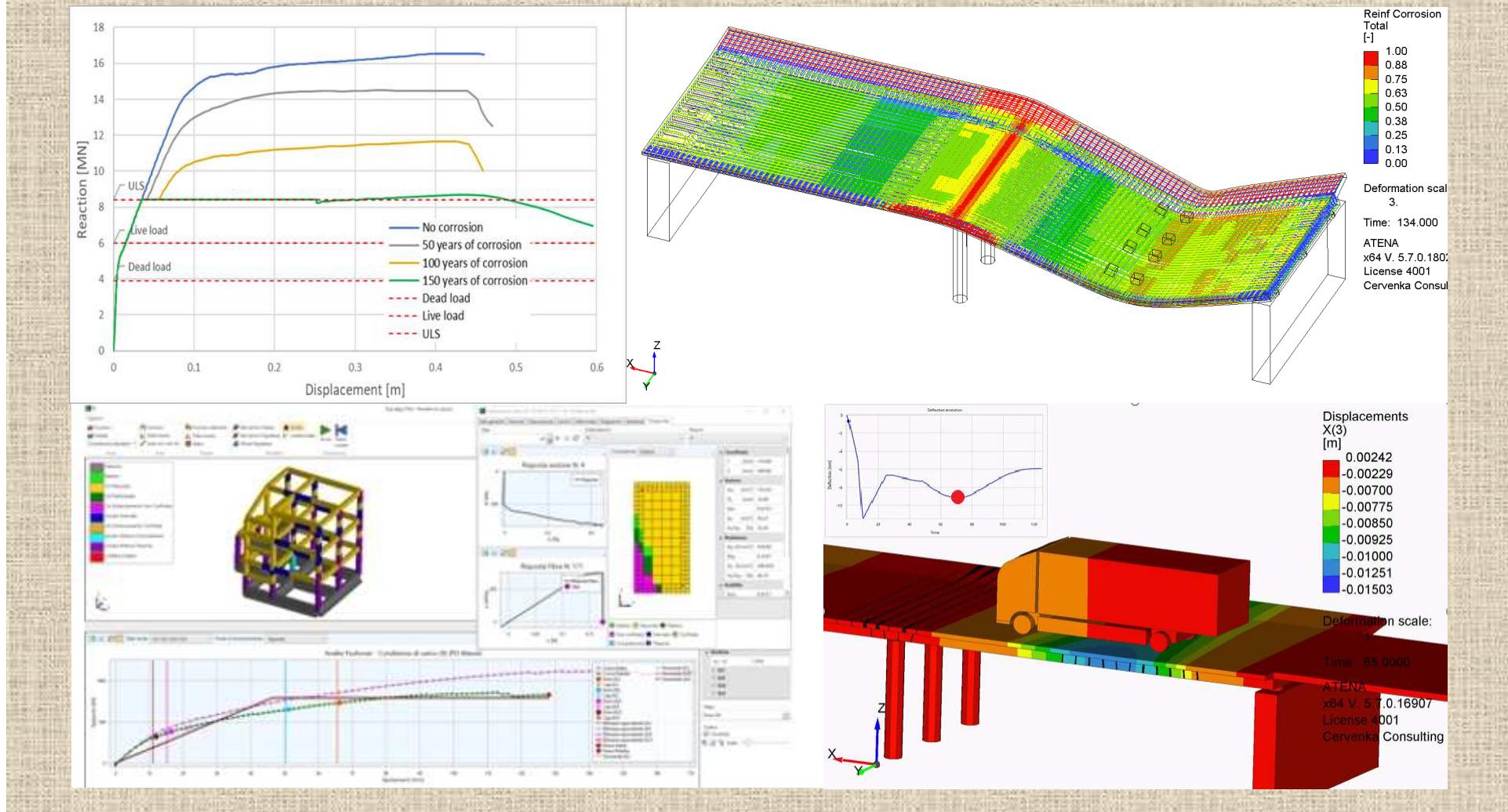


ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI
CATANZARO

Parte III

Vulnerabilità delle strutture soggette a danno localizzato.

22 Giugno ore 15:00 Relatore: Ing. Francesco OLIVETO



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

SOMMARIO

- INTRODUZIONE
- APPROCCIO AL PROBLEMA DELLA VALUTAZIONE DI STRUTTURE ESISTENTI SOGGETTE A DEGRADO PER CORROSIONE
- STRATEGIE DI MODELLAZIONE NON LINEARI IN PRESENZA DI DANNO
- CASI DI STUDIO

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

INTRODUZIONE

- Il problema della durabilità delle strutture in c.a. è quanto mai attuale e spesso correlato al *degrado da corrosione*. In genere, il fenomeno è *provocato da carbonatazione o attacco cloridrico*. Particolarmente significativo nel caso di *strutture ubicate vicino al mare*, è associato il fenomeno di *corrosione localizzata per pitting delle armature*. Per tale di corrosione, studi scientifici ci letteratura hanno definito *riduzioni di resistenza e duttilità sezonale fino al 25%* a fronte di *una esposizione di 70 anni*.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

INTRODUZIONE

- *L'effetto della corrosione può essere rilevante per la risposta sismica di un edificio in cemento armato esistente. Al fine valutare l'effetto della corrosione sulla risposta sismica globale, nel presente lavoro è stato studiato un edificio di una struttura in c.a. caratterizzato da un comportamento a telai piani, tipologicamente appartenente all'edilizia popolare pre-anni '70 e progettato per soli carichi gravitazionali. Al fine di considerare la disomogeneità del fenomeno all'interno della struttura sono considerati differenti scenari di degrado.*

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

INTRODUZIONE

- Il *calcestruzzo armato*, con il *trascorrere del tempo*, non è esente dalla perdita delle sue *proprietà protettive* e, conseguentemente, il *film* stesso di *passività* può essere danneggiato per i seguenti motivi:
 1. per **carbonatazione**, che consiste nella *neutralizzazione dell'alcalinità del calcestruzzo* da parte *dell'anidride carbonica* proveniente *dall'ambiente esterno*;
 2. per penetrazione di **cloruri**, quando sulla *superficie delle armature* viene raggiunto e superato *un determinato tenore critico*, tale da *distruggere il film protettivo*;

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

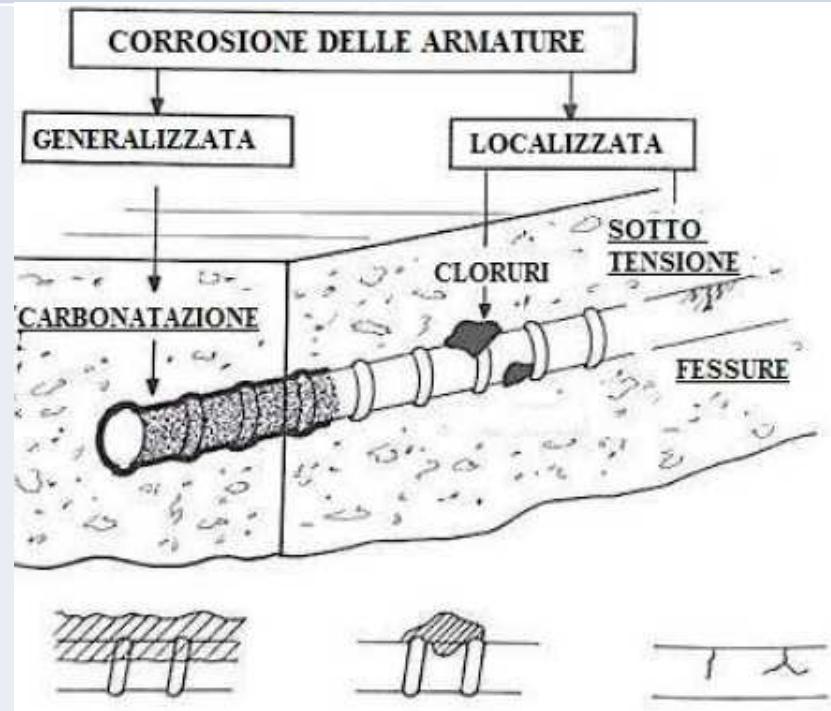
INTRODUZIONE

3. per **correnti disperse**, che interferiscono con *le armature passando in alcune parti dal calcestruzzo alle armature e in altre dalle armature al calcestruzzo*.
4. Al *venir meno delle condizioni di passività*, il *processo corrosivo delle armature* può aver luogo se nel *calcestruzzo a contatto con la loro superficie* sono presenti **ossigeno ed acqua**, questi due componenti *combinati con il ferro, danno origine ai prodotti di corrosione*.

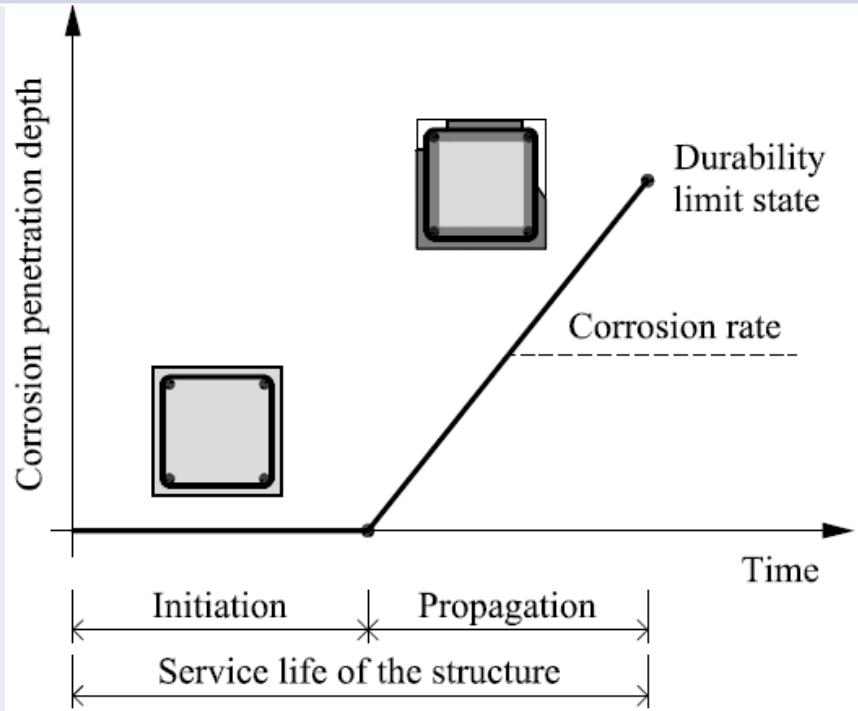
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

INTRODUZIONE

Tipi e morfologie di corrosione delle armature nel cemento armato



Rappresentazione della fase di innesco e di propagazione (Modello di Tuuti et.al)



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

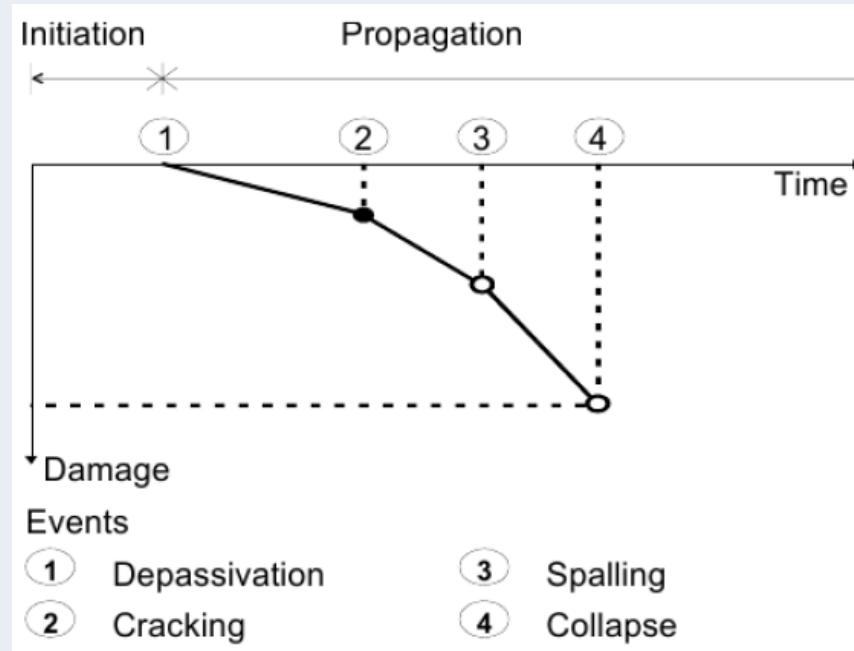
DEGRADO PER CORROSIONE – ANALISI EVOLUTIVA

Rappresentazione schematica dello sviluppo della corrosione in strutture in c.a.

1. $t=t_1$: fase iniziale senza corrosione.

Persiste fino a quando la concentrazione agenti aggressivi non supera il limite di verifica la depassivazione dell'acciaio di armatura.

2. Successivamente si ha la fase di propagazione a tratti: il primo fino a $t_2=t_{cr1}$, tempo in cui si verifica la prima fessura nella superficie del calcestruzzo per corrosione dell'armatura.

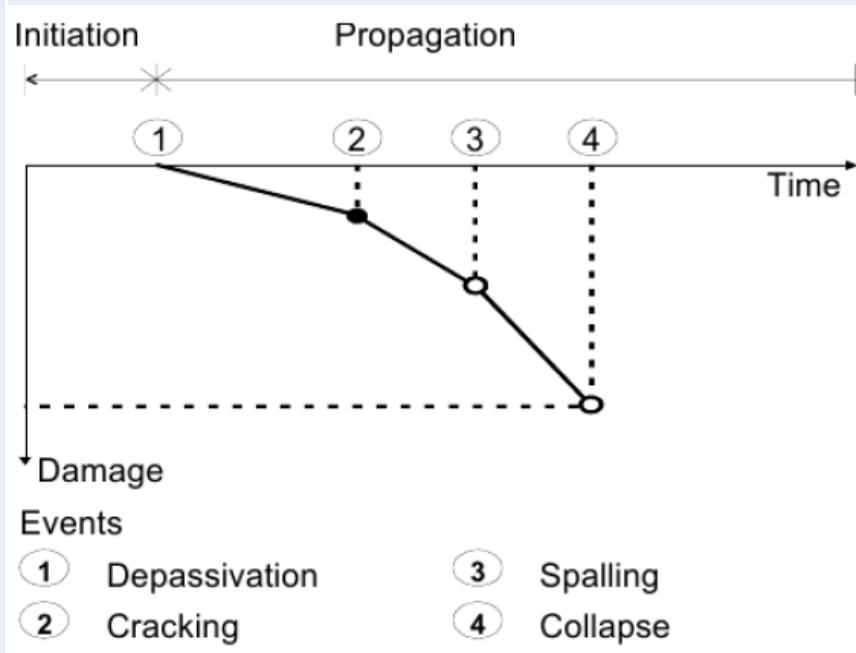


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

DEGRADO PER CORROSIONE – ANALISI EVOLUTIVA

Rappresentazione schematica dello sviluppo della corrosione in strutture in c.a.

3. Il secondo, con *velocità di propagazione maggiore* per *presenza di fessure*, si protrae fino a $t_3=t_{cr2}$, tempo in cui non è più soddisfatto lo *stato limite di esercizio* registrandosi lo *spalling del calcestruzzo*;
4. Infine, il tempo per il quale la *riduzione della resistenza* è tale da non soddisfare più le richieste imposte dallo *stato limite ultimo* è denotato con $t_4=t_u$



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

La valutazione della capacità portante residua di strutture esistenti soggetti ad azioni di degrado per corrosione non può prescindere dai seguenti aspetti di modellazione, analisi e verifiche:

- *Scelta di elementi finiti non lineari in relazione alla tipologia strutturale, che incorporano nella formulazione meccanica modelli di degrado a corrosione;*
- *Individuazione di modelli di degrado per corrosione più appropriati per la struttura oggetto di valutazione, che tengono in conto in maniera semplificata o completa dei fenomeni fisico meccanici presenti in tali condizioni;*
- *Metodi di analisi di tipo statico o dinamico in presenza di non linearità meccaniche e geometriche ove necessario;*
- *Metodi di verifica per sezioni o elementi con degrado dell'acciaio e calcestruzzo.*

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

La valutazione delle sicurezza di una struttura soggetta a degrado per corrosione può essere effettuate con una procedura a due step:

1. Valutazione della capacità portante statica e sismica di strutture in c.a soggette ad un livello di degrado noto, rilevato tramite indagini.

I parametri del modello di devono poter definire gli indici di degrado relativi:

- **Alla riduzione delle sezioni, resistenza e duttilità delle barre in acciaio;**
- **Alla riduzione della resistenza del calcestruzzo a compressione in condizioni di fessurazione;**
- **Alla riduzione dell'aderenza all'interfaccia acciaio-calcestruzzo.**

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

La conoscenza della struttura tramite tecniche di rilievo speditivo e avanzato, indagini in sito e di laboratorio, devono permettere di valutare:

- *Gli elementi soggetti a degrado per corrosione e le relative condizioni al contorno sui lati esposti;*
- *La tipologia di azione corrosiva tra uniforme (carbonatazione) o localizzata (Pitting da cloruri);*
- *La valutazione delle area delle barre esistenti o perdita di massa corrosa, la resistenza e duttilità dell'acciaio e calcestruzzo in condizioni di degrado;*

Le analisi saranno effettuate per scenari di degrado, ci permetteranno di valutare lo stato di sicurezza della struttura nell'intorno dell'istante temporale.

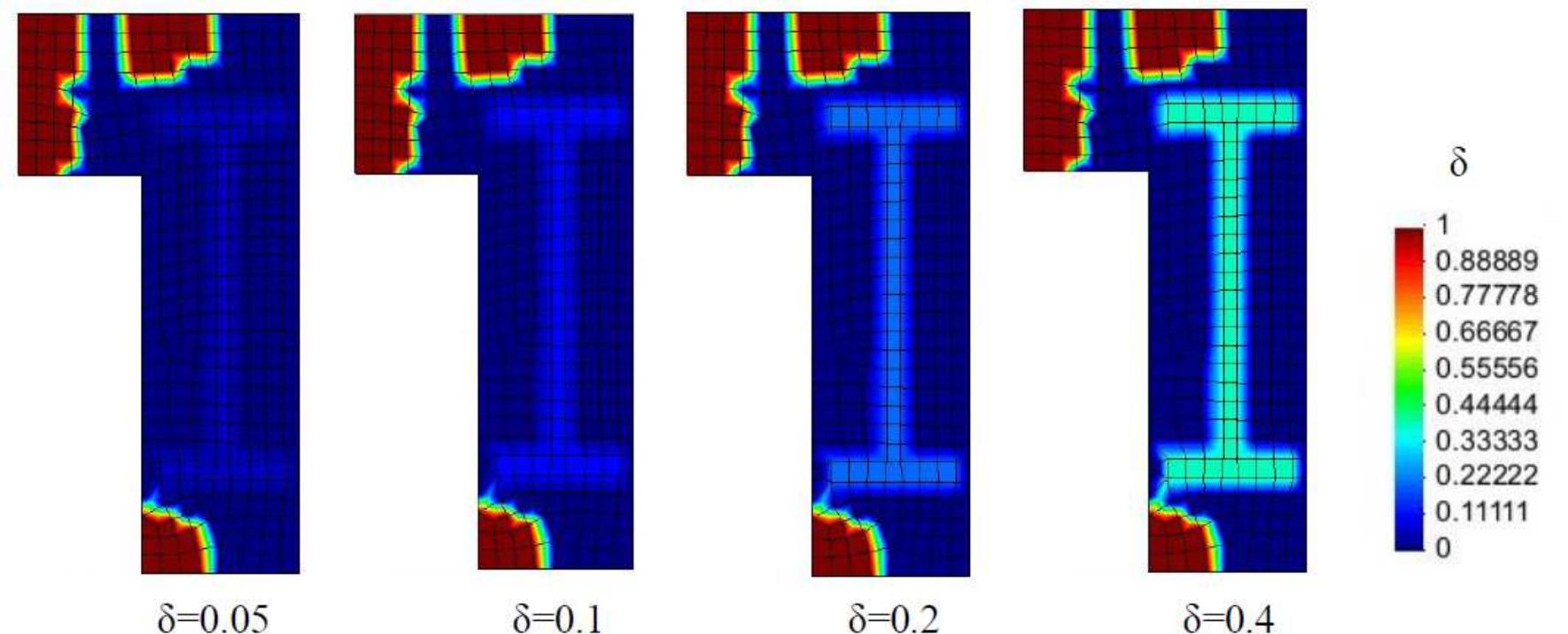
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

2. Valutazione tramite **analisi dinamiche lente** sul modello di cui al punto 1, tenendo in conto della **variabilità temporale dei parametri che regolano la diffusione** degli agenti aggressivi sull'elemento strutturale. Risultato dell'analisi è la stima della **capacità portante della struttura ad ogni istante di tempo**. La curva di **capacità resistente-tempo** sarà un utile strumento per la scelta delle tempistiche con cui programmare eventuali **interventi di manutenzione**.
- Tale modello ci permetterà inoltre di valutare **gli indici di robustezza strutturale**, i possibili **meccanismi resistenti** che possano attivarsi in condizioni di **azioni estreme** quale il **degrado** al fini di scongiurare il **collasso strutturale**.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO



EVOLUZIONE DEL DEGRADO NEL TEMPO PER UNA TRAVE MISTA CLS-ACCIAIO

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

La tipologia di elementi finiti da utilizzare per la modellazione e l'analisi non lineare di strutture soggette a degrado è funzione della tipologia strutturale, dalla scala del problema (locale o globale) e dall'accuratezza della soluzione. In ogni caso le strategie di modellazione F.E.M ormai consolidate appartengono alle seguenti categorie:

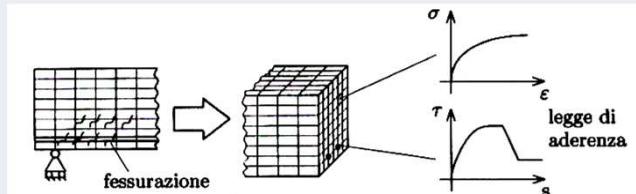
- *Elementi beam non lineari a plasticità diffusa o concentrata senza non linearità geometrica, con effetti del secondo ordine o di grandi spostamenti/rotazioni;*
- *Elementi shell non lineari multistrato o a layer nel piano e fuori piano in presenza o meno di non linearità geometriche;*
- *Elementi brick non lineari con o senza non linearità geometrica o di contatto.*

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

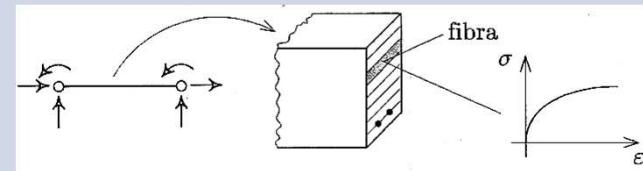
STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

NON LINEAR FINITE ELEMENT

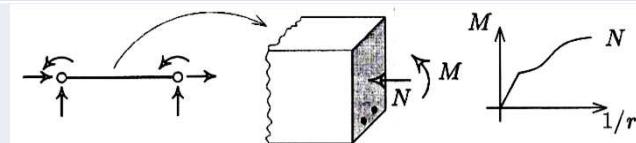
3D elements
(Abaqus, Atena, Adina, Ansys, Diana, Lusas, Midas FEA, etc.)



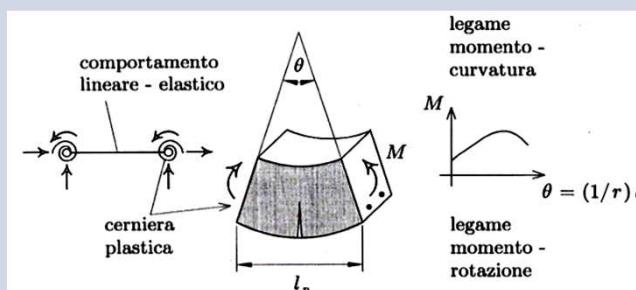
Fiber Models
(OpenSees, Seismostruct, Midas Gen, FataNext NL, etc.)



Sectional Models
(IDARC, Strand-Strauss V7)



Lumped-plasticity
(SAP 2000, Midas Gen, Drain 2D/3DX, etc.)

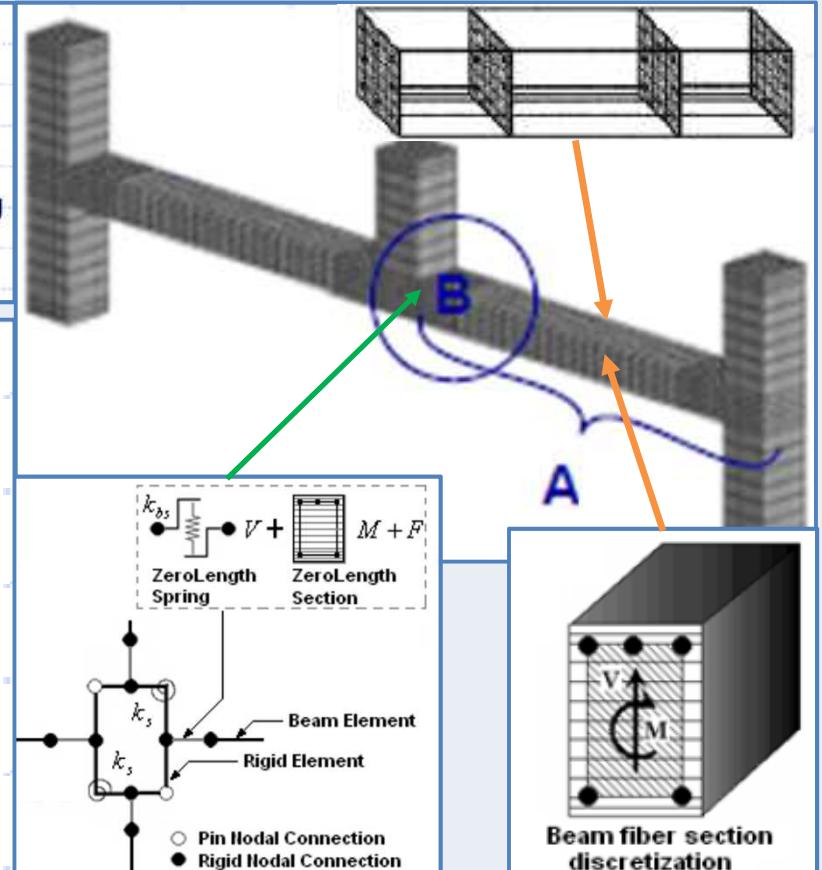
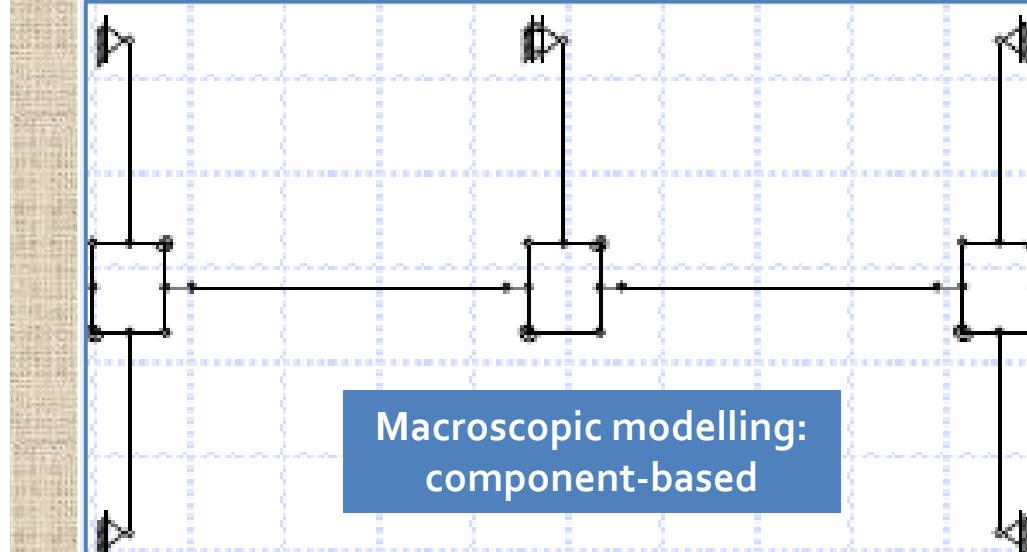


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Modeling Approaches (K.Kunnath)

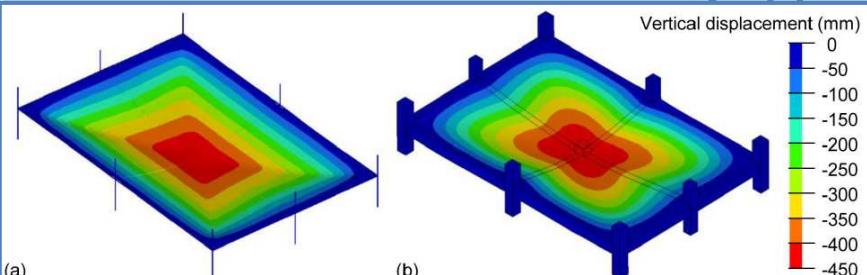
- ▶ Microscopic modeling: continuum-based, detailed model
 - Good for analyzing local behavior
 - Intensive computational effort
- ▶ Macroscopic modeling: component-based, simplified model
 - Not suitable for analyzing detailed effects but ideal for analyzing complete structural system
 - Computational efficiency



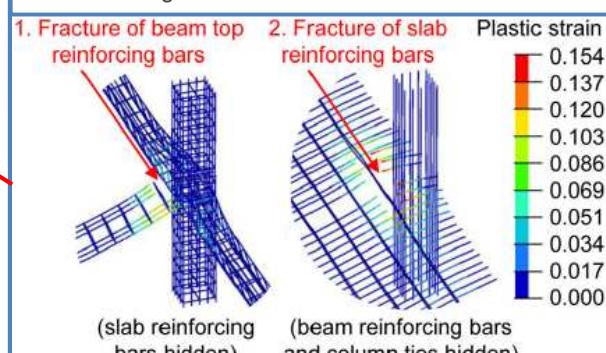
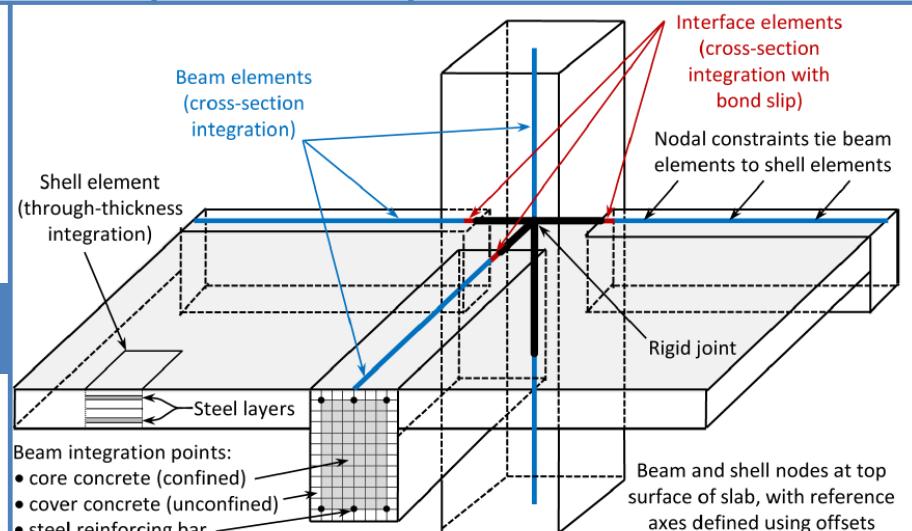
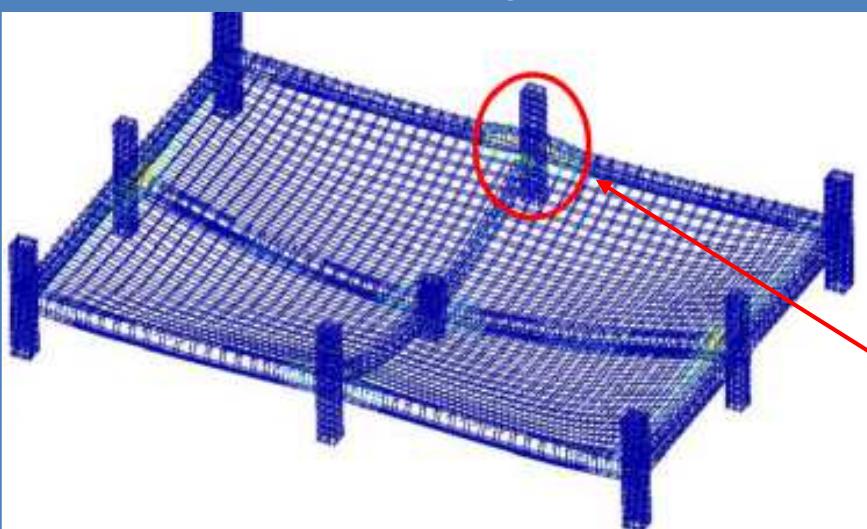
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Modeling Approaches (K.Kunnath)



Contours of vertical displacement at peak load intensity: (a) reduced-order model; (b) high-fidelity model



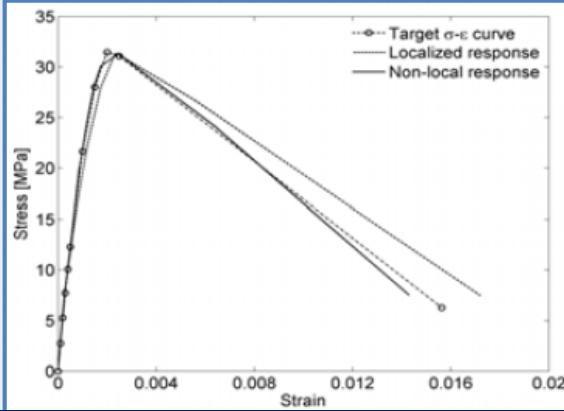
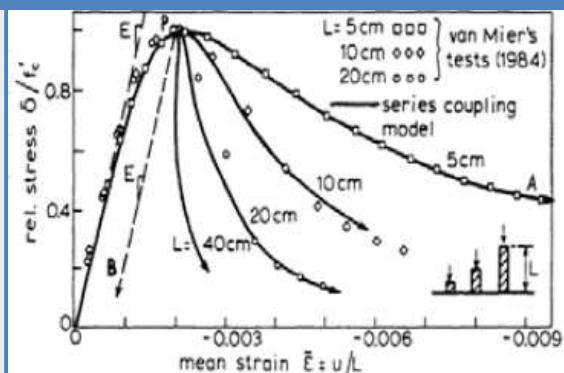
- Failure modes observed in high-fidelity model**
1. Slab reinforcing bars hidden
 2. Beam reinforcing bars and column ties hidden

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

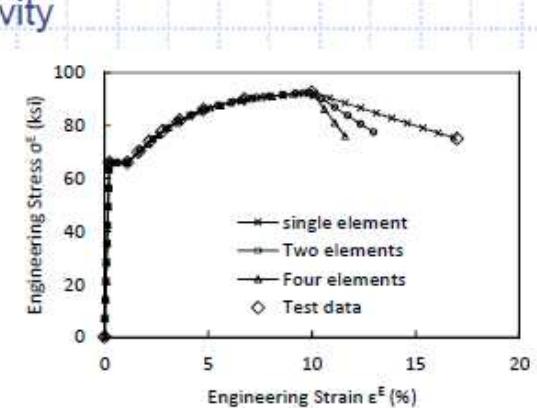
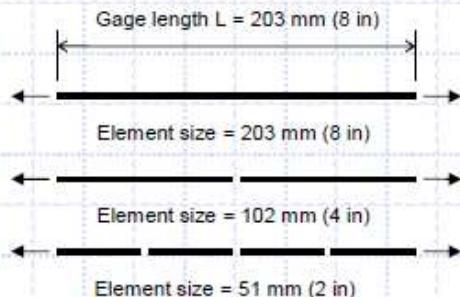
STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Material Modelling (K.Kunnath et.al)

Post-peak behavior of concrete in compression Avoiding localization



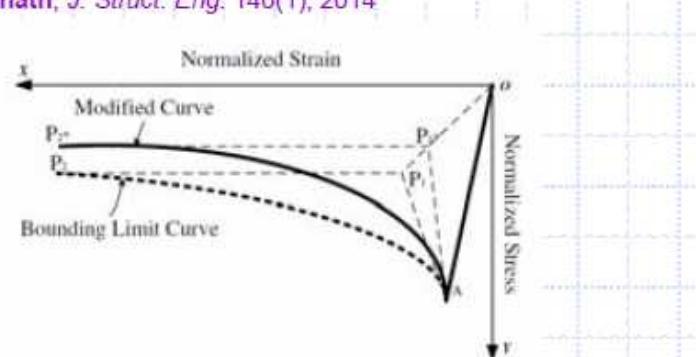
Softening behavior and mesh sensitivity



Bao, Lew, Kunnath, *J. Struct. Eng.* 140(1), 2014

Reinforcing steel

✓ Buckling effects



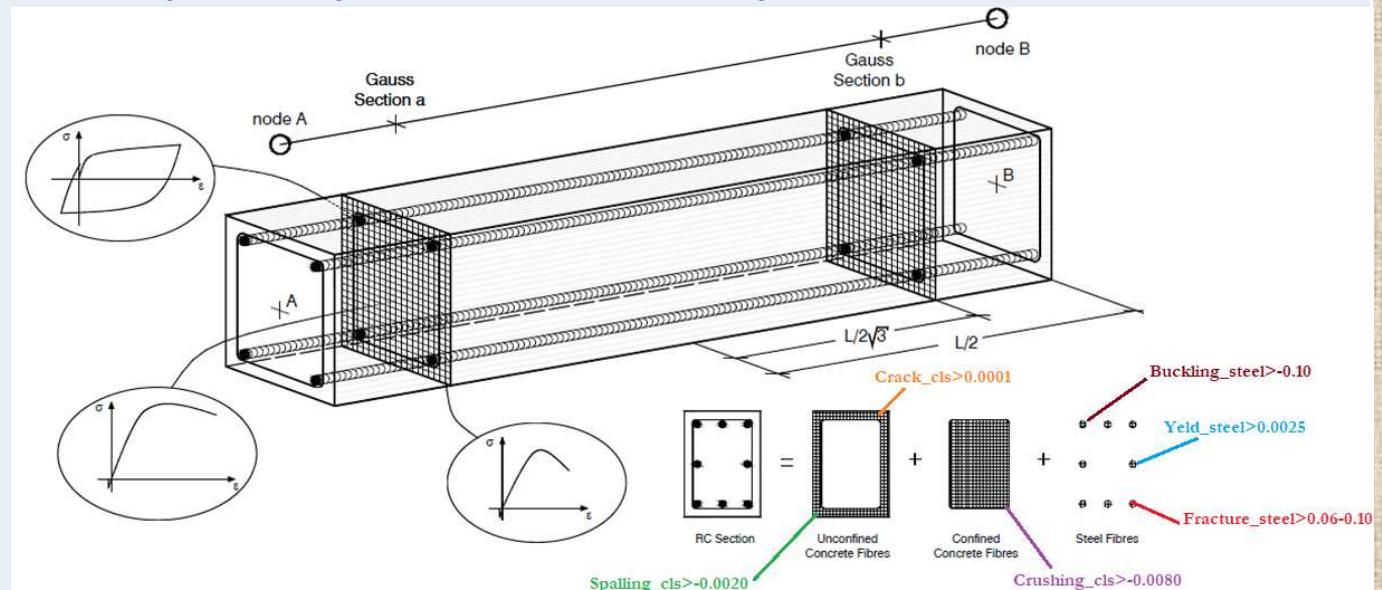
Zong, Kunnath, Monti, *J. Struct. Eng.* 140(1), 2014

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Modellazione

Le analisi statiche non lineari sono state condotte tramite modellazioni con elementi beam a plasticità diffusa di tipo force based in grandi spostamenti e rotazioni monitorando durante la storia di carico il raggiungimento dei criteri di performance o stati limite raggiunti a livello di materiale, sezione, elemento e struttura, dalle condizione di esercizio a quelli di collasso.



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Modellazione

CRITERI PRESTAZIONALI

SLE		SLU/SLC		SLC	
Crack_Concrete	$\epsilon_{ctd} = 0.0001$	Crush_Concrete	$\epsilon_{cu-core} = -0.006$	Chord_Rotation	$\theta_u \geq \vartheta_d$
Spalling_Concrete	$\epsilon_{cu-cover} = -0.0035$	Fracture_Steel	$\epsilon_{su-t} = 0.051 - 0.265$	Shear_Failure	$V_R \geq V_d$
Yeld_Steel	$\epsilon_{sy} = 0.0025$	Buckling_Steel	$\epsilon_{su-c} = 0.051 - 0.265$		

NOMENCLATURA

- Crack_Concrete (inizio fessurazione cls): il raggiungimento di una deformazione a trazione limite nel cls;
- Yeld_Steel (snervarmeno armature): il raggiungimento della deformazione di snervamento nell'acciaio;
- Spalling_Concrete (rottura del copriferro di cls): il raggiungimento di una deformazione limite del cover di cls;
- Crushing_Concrete (schiacciamento del cls confinato): il raggiungimento di una deformazione ultima del nucleo di cls;
- Fracture_Steel (rottura a trazione armature): il raggiungimento della deformazione di rottura a trazione nell'acciaio;
- Buckling_Steel (Instabilità barre di armatura): il raggiungimento della deformazione di instabilità barre armature;
- Chord_rotation (rotazione ultima sezione): il raggiungimento della rotazione limite alla corda in condizioni di collasso;
- Shear_Failure (rottura a taglio elemento): il raggiungimento della rottura a taglio di un elemento primario

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

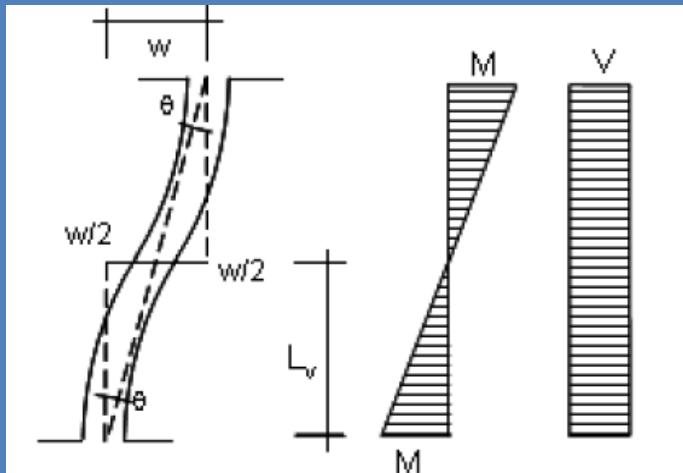
STRATEGIE DI MODELLAZIONE IN PRESENZA DI DEGRADO

Modellazione

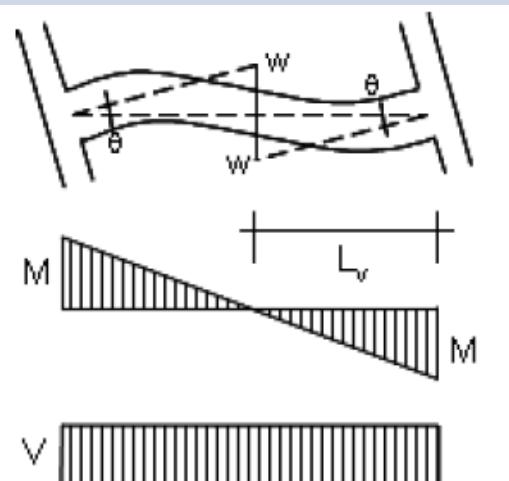
DEFINIZIONE ROTAZIONE ULTIMA

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \cdot \left[\frac{\max(0.01; \omega') \cdot f_c}{\max(0.01; \omega)} \right]^{0.225} \cdot \left(\min\left(9, \frac{L_v}{h}\right) \right)^{0.35} \cdot 25 \left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) \cdot (1.25^{100} \rho_d)$$

COLONNE



TRAVI



DEFINIZIONE RESISTENZA A TAGLIO CICLICA

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot \left[\frac{h-x}{2L_v} \cdot \min(N; 0.55A_c \cdot f_c) + \left(1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl}) \right) \cdot \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \cdot \left(1 - 0.16 \min(5; \frac{L_v}{h}) \right) \sqrt{f_c A_c} + V_w \right] \right]$$

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Il fenomeno della corrosione ha notevole *influenza sul comportamento meccanico di elementi strutturali in cemento armato*, in relazione a:

- ***Riduzione della sezione trasversale delle barre di armatura;***
- ***Riduzione delle proprietà meccaniche dell'acciaio (resistenza e duttilità);***
- ***Fessurazione del calcestruzzo con riduzione resistenza a compressione;***
- ***Deterioramento del meccanismo di aderenza.***

La corrosione comporta *una riduzione della sezione della barra e della capacità di allungamento sotto carico della parte di armatura che rimane integra* , con tutte le conseguenze sulla *duttilità strutturale*.

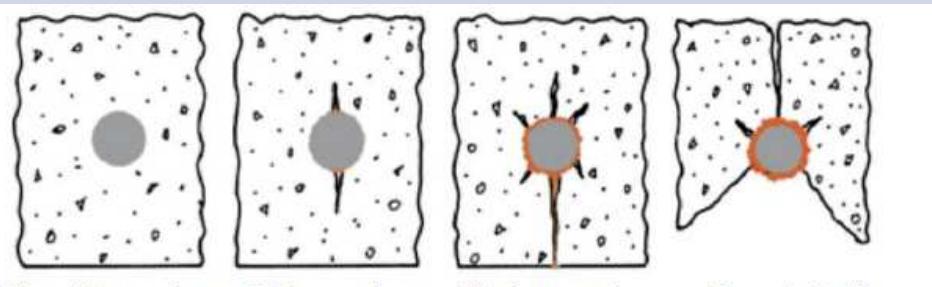
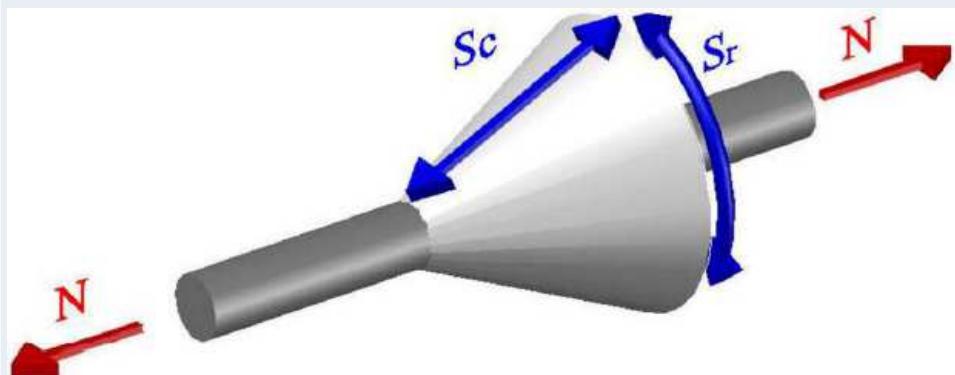
L'ossido di ferro (ruggine), che è il prodotto *del processo di corrosione*, ha un *volume maggiore del metallo* e tende a *distaccarsene con aumento di volume della barra di armatura iniziale*.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Ciò genera *tensioni radiali di compressione (Sc)* nel calcestruzzo che circonda la barra, che comportano la nascita di *trazioni circonferenziali (Sr)*, per l'equilibrio. Quando raggiungono la resistenza a trazione del conglomerato, si verifica la *formazione di fessure, ortogonali alle isostatiche di trazione, ovvero radiali*, che possono portare alla *completa disgregazione e all'espulsione del copriferro* se la barra è sufficientemente prossima al bordo (**Spalling Failure**).

Espulsione del copriferro a causa dell'espansione dei prodotti della corrosione, Spalling Failure



Prima della corrosione

Inizio corrosione

Ulteriore corrosione,
Superficie di rottura,
Formazione macchie

Eventuale Spalling:
Esposizione alla corrosione
della barra

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Il legame di aderenza, è una delle proprietà fondamentali sulla quali si basa il funzionamento del cemento armato, è anch'esso influenzato dalla corrosione, attraverso i seguenti meccanismi:

- *la fessurazione del calcestruzzo;*
- *cambiamento delle proprietà all'interfaccia acciaio/calcestruzzo;*
- *minor confinamento del calcestruzzo a causa della corrosione delle staffe;*
- *instabilità delle armature longitudinali dovuto allo spalling cls;*
- *Riduzione della risposta ciclica sotto azioni orizzontali con diminuzione dell'energia dissipata, riduzione della capacità rotazionale dell'elemento e conseguente aumento della domanda di rotazione conseguente agli scorrimenti relativi d'interfaccia;*

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Riduzione della sezione trasversale delle barre di armatura

Le modalità con cui la corrosione può avvenire sono sostanzialmente diverse in presenza di **carbonatazione** o di **attacco dai cloruri**:

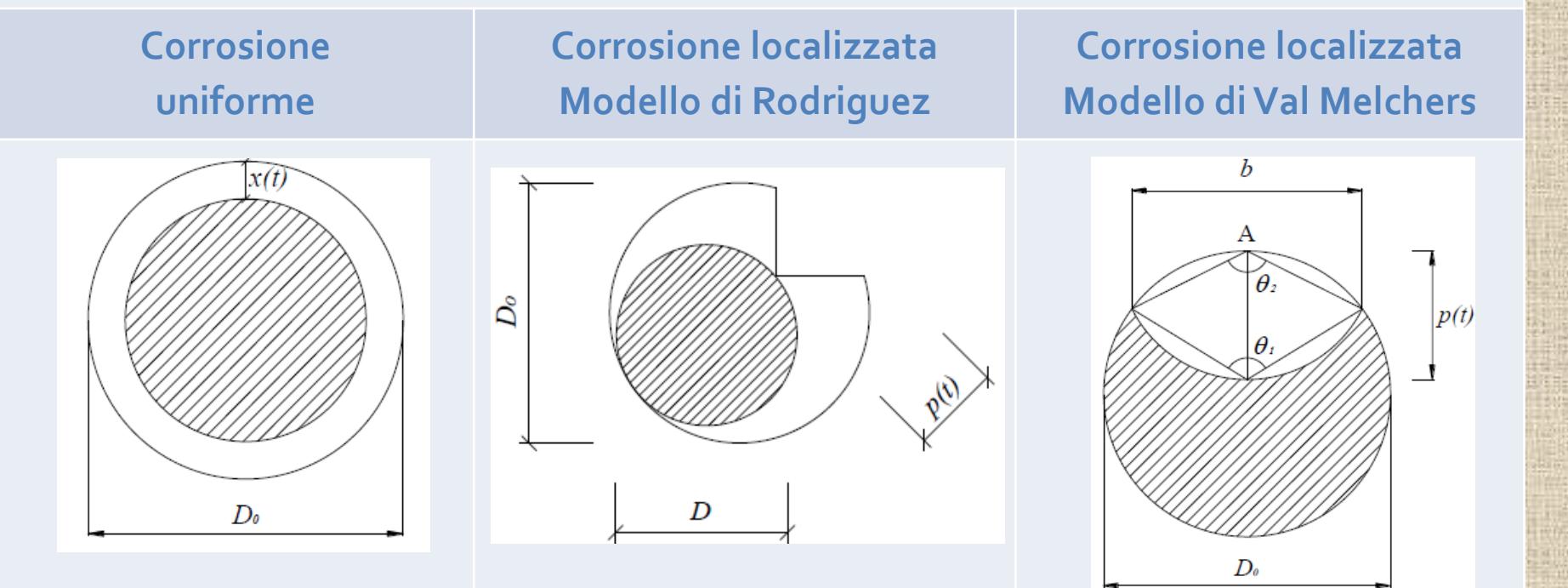
- **Carbonatazione** → **Corrosione diffusa**, quando essa *interessa tutta la superficie o ampia parte di essa*. Si parla di **corrosione uniforme** quando la penetrazione e la medesima *in tutto lo sviluppo dell'elemento*, mentre di corrosione non uniforme *quando non segue un profilo regolare*;
- **Attacco da cloruri** → **Corrosione per pitting**, quando si presenta come *attacchi estremamente localizzati*, detti **Pit** o vaiolature, *che dalla superficie penetrano nello spessore del metallo a velocità spesso molto elevata*. La vaiolature si innescano e si propagano *in punti singolari*, mentre il resto della *superficie metallica esposta all'ambiente rimane inalterata*.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Riduzione della sezione trasversale delle barre di armatura

I modelli di degrado per la riduzione della sezione trasversale delle barre di armatura sono diversificati nel caso di corrosione uniforme o localizzata.



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Corrosione uniforme – Riduzione sezione trasversale

Si utilizza come parametro di danneggiamento globale, dal quale far dipendere gli altri indici di danno, il rapporto tra la penetrazione raggiunta dalla corrosione $x(t)$ ed il diametro iniziale delle barre D_0 :

$$\delta = \frac{x}{D_0}$$

La riduzione della sezione resistente delle barre di armatura è definita attraverso la relazione:

$$A_s(\delta) = A_{s0} \cdot [1 - \delta_{As,u}(\delta)]$$

Per la corrosione uniforme, ipotizzando che si verifichi da entrambi i lati della barra, si può definire l'indice $\delta_{As,u}$ a partire dalla seguente equazione:

$$\delta_{As,u}(\delta) = 4 \cdot \delta \cdot (1 - \delta) \text{ se } 0 \leq \delta \leq 0.5 \quad \delta_{As,u}(\delta) = 1 \text{ se } \delta > 0.5$$

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PERCORROSIONE

Corrosione localizzata – Riduzione sezione trasversale (Modello di Rodriguez)

Secondo il modello di Rodriguez per il pitting, si utilizza l'equazione della corrosione uniforme considerando non il δ globale, ma quello moltiplicato per il fattore di pitting R , ossia $\delta \cdot R$. Analogamente a quanto fatto per la corrosione uniforme, si può porre:

$$\delta_{As,pR}(\delta R) = \begin{cases} 2\delta R - (\delta R)^2 & se \quad 0 \leq \delta R \leq 1 \\ 1 & se \quad \delta R \leq 1 \end{cases}$$

In cui

$$\delta = \frac{x}{D_0}$$

La riduzione della sezione resistente delle barre di armatura è definita attraverso la relazione:

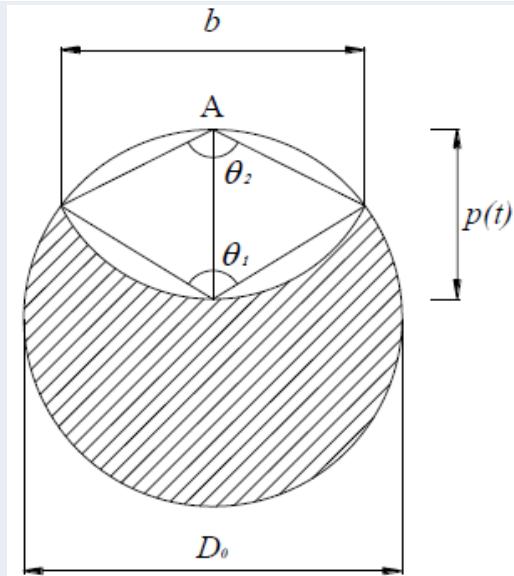
$$A_s(\delta R) = A_{s0} \cdot [1 - \delta_{As,pR}(\delta R)]$$

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Corrosione localizzata – Riduzione sezione trasversale (Modello Val Melchers)

Quando la corrosione è localizzata, la perdita di area non è uniforme, ma è concentrata in corrispondenza del Pit. La riduzione di sezione può essere stimata come in (Stewart, 2008), con riferimento alla figura a lato, in cui si ipotizza che il Pit abbia inizio dal punto *A* e cresca nel tempo seguendo un cerchio di raggio $p(t)$. Nelle formule seguenti si indica con $p(t)$ la profondità raggiunta dall'attacco considerando il fattore di pitting \mathbf{R} in cui: $\mathbf{p}(t) = \mathbf{x}(t)_{medio} \cdot \mathbf{R}$



Le altre equazioni che definiscono il modello sono :

$$b = 2 \cdot p(t) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_0}\right)^2} \quad \theta_1 = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b}{D_0}\right) \quad \theta_2 = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b}{2 \cdot p(t)}\right)$$

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

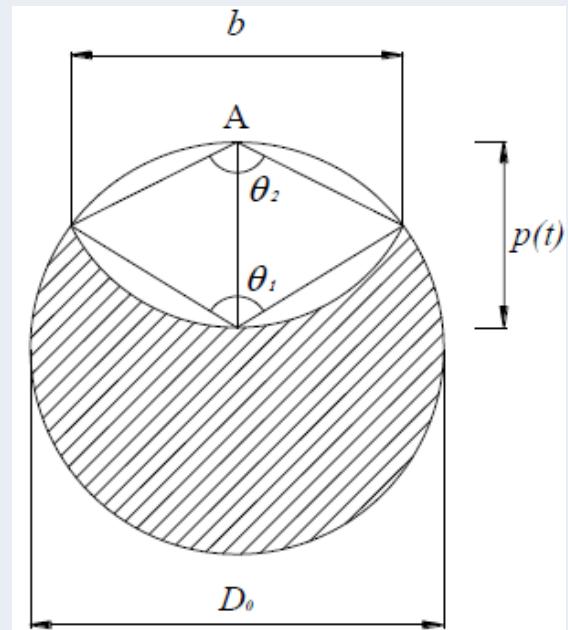
MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Corrosione localizzata – Riduzione sezione trasversale (Modello Val Melchers)

$$\begin{cases} A_{pit}(t) = A_1 + A_2 & \text{se } p(t) \leq \frac{D_0}{\sqrt{2}} \\ A_{pit}(t) = A_0 - A_1 + A_2 & \text{se } \frac{D_0}{\sqrt{2}} \leq p(t) \leq D_0 \\ A_{pit}(t) = A_0 & \text{se } p(t) \geq D_0 \end{cases}$$

In cui:

- $A_1 = 0.5 \cdot \left[\theta_1 \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - b \left| \frac{D_0}{2} - \frac{p(t)^2}{D_0} \right| \right]$
- $A_2 = 0.5 \cdot \left[\theta_2 \cdot p(t)^2 - b \cdot \frac{p(t)^2}{D_0} \right]; \quad A_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$



Si può quindi valutare la riduzione percentuale di area in seguito al pitting come:

$$\alpha_{pit} = A_{pit}(t)/A_0$$

α_{pit} è analogo al $\delta_{As,u}$ e $\delta_{As,pR}$ della corrosione uniforme e quella localizzata di Rodriguez

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Variazione delle proprietà meccaniche delle armature

Resistenza dell'acciaio – corrosione uniforme

Dai risultati delle prove sperimentali eseguite sulle barre di armatura, si è dimostrato che la corrosione uniforme abbia influenza trascurabile sulle proprietà meccaniche delle barre. La diminuzione della resistenza è legata quindi solamente alla diminuzione della sezione resistente. Si definiscono quindi due parametri di danno per le proprietà dell'acciaio (δ_{fsy} e δ_{fsu}) tali che:

$$f_{sy} = f_{sy0} \cdot (1 - \delta_{fsy}) \quad f_{su} = f_{su0} \cdot (1 - \delta_{fsu}) \quad \delta_{fsy} = \delta_{fsu} = \beta(0.5) \cdot \delta_{As,u}(\delta)$$

Resistenza dell'acciaio – corrosione localizzata

Nel caso della corrosione localizzata con l'approccio di Rodriguez possono essere utilizzate le formule sopra riportate ma tenendo conto del fattore di pitting R . Per il modello di Pit alla Val – Melchers la riduzione della resistenza dell'acciaio può essere determinata tramite la relazione lineare proposta, valida sia per f_u che per f_y ottenuta dall'interpretazione dei dati sperimentali di figura.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Variazione delle proprietà meccaniche delle armature

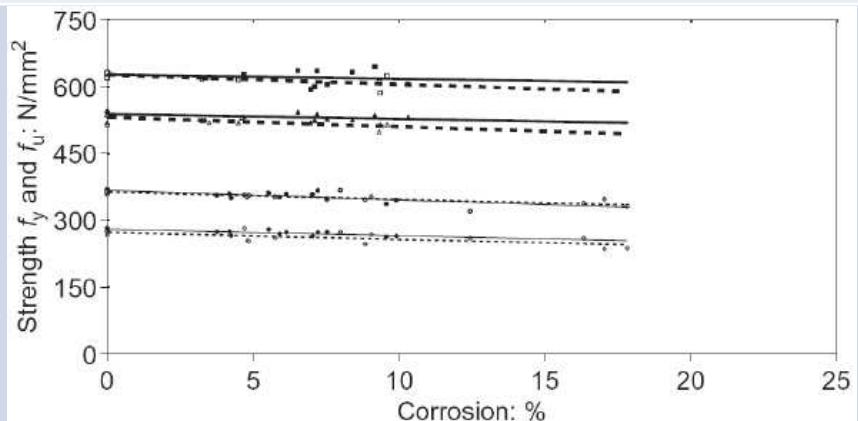
Resistenza dell'acciaio – corrosione localizzata

Per il modello di Pit alla Val – Melchers la riduzione della resistenza dell'acciaio può essere determinata tramite la relazione lineare proposta, di figura.

$$f = (1 - \beta \cdot Q_{corr}) \cdot f_0$$

in cui f_0 è la resistenza della barra non corrosa allo snervamento o ultima, Q_{corr} è il livello di corrosione [%]. Q_{corr} viene determinato con la nota formula di Stewart(2009) già definita in precedenza: $Q_{corr} = \alpha_{pit} = A_{pit}(t)/A_0$

**Resistenza residua di barre
di armatura corrosa**
(da Du et al., 2005, Vergani et.al 2010)



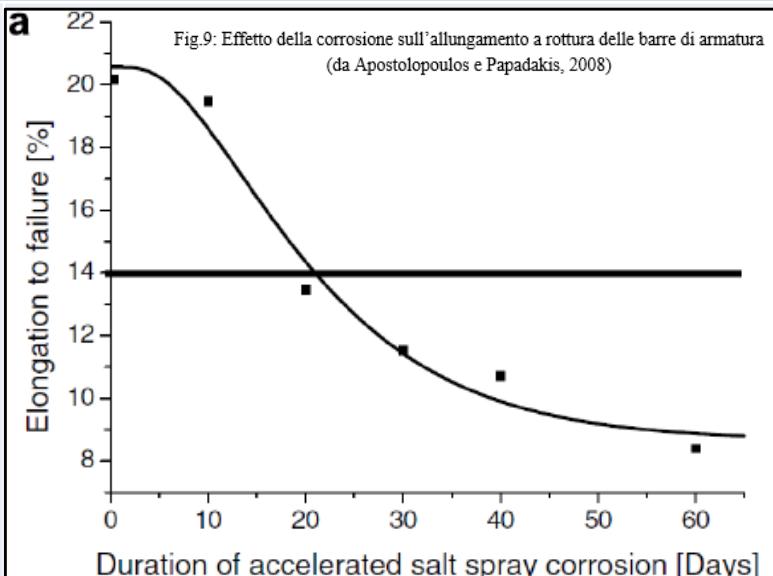
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Variazione delle proprietà meccaniche delle armature

Duttilità dell'acciaio – corrosione uniforme

Più interessante è l'aspetto che riguarda la duttilità delle barre di armatura, viste le diverse evidenze sperimentali che confermano una marcata riduzione della deformazione ultima delle barre soggette a corrosione, si è dedotta una legge di tipo esponenziale. Si definisce l'indice di danno della deformazione ultima $\delta_{\varepsilon,su}$ tale che: $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{su0} \cdot (1 - \delta_{\varepsilon,su})$



La legge di danneggiamento, dedotta dalle prove sperimentali, è la seguente:

$$\delta_{\varepsilon,su} = 0 \text{ se } \delta_{As,u} \leq 0.016 \quad \delta_{\varepsilon,su} = 1 - 0.1521 \cdot \delta_{As,u}^{(-0.4583)} \text{ se } \delta_{As,u} > 0.016$$

In cui δ_{As} viene considerato relativo alla perdita uniforme di sezione, poiché nelle prove sperimentali non si è misurata la penetrazione dell'attacco, bensì la perdita di massa.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Variazione delle proprietà meccaniche delle armature

Duttilità dell'acciaio – corrosione localizzata

Nel caso della corrosione localizzata con l'approccio di Rodriguez possono essere utilizzate le formule per la corrosione uniforme ma tenendo conto del fattore di pitting R . Per il modello di Pit alla Val – Melchers, in Coronelli et al., 2004 è proposta la seguente relazione per valutare la perdita di duttilità, quindi la riduzione nella deformazione ultima dell'acciaio dal valore $\epsilon'_{su} = \epsilon_{su}$ per il materiale vergine fino a $\epsilon'_{su} = \epsilon_{sy}$ per la completa perdita di duttilità:

$$\epsilon'_{su} = \epsilon_{sy} + (\epsilon_{su} - \epsilon_{sy}) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{pit}}{\alpha_{pit,max}}\right) \text{ se } \alpha_{pit} \leq \alpha_{pit,max}$$

L'andamento è lineare ed è proporzionale alla riduzione di area causata dal pitting, così come definita nella relazione:

$$\alpha_{pit} = A_{pit}(t)/A_0$$

Sono stati condotti diversi studi sperimentali per valutare il parametro $\alpha_{pit,max}$ ed i valori oscillano tra **0.5-0.1**.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo

- Anche se il danno diretto derivante dalla perdita di sezione di armatura è il più rilevante, soprattutto se le barre sono soggette a livelli di tensione elevati, nel caso di corrosione uniforme, con bassa velocità di penetrazione, può diventare rilevante il degrado indiretto subito dal calcestruzzo.
- Esistono situazioni molto particolari, in cui i prodotti di corrosione riescono a diffondere nei pori, senza dar luogo al distacco del copriferro, mentre comunque la corrosione continua ad avanzare.
- E' interessante fare una considerazione sul fatto che la fessurazione longitudinale ed il distacco del copriferro costituiscono sì un grave pericolo per la sicurezza degli utenti, ma sono anche il segno inequivocabile del processo corrosivo in atto.
- Una volta che le fessure longitudinali si sono formate, chiaramente costituiscono una via di accesso facilitata per gli agenti esterni (cloruri, ossigeno, acqua) favorendo lo sviluppo della corrosione della barra.

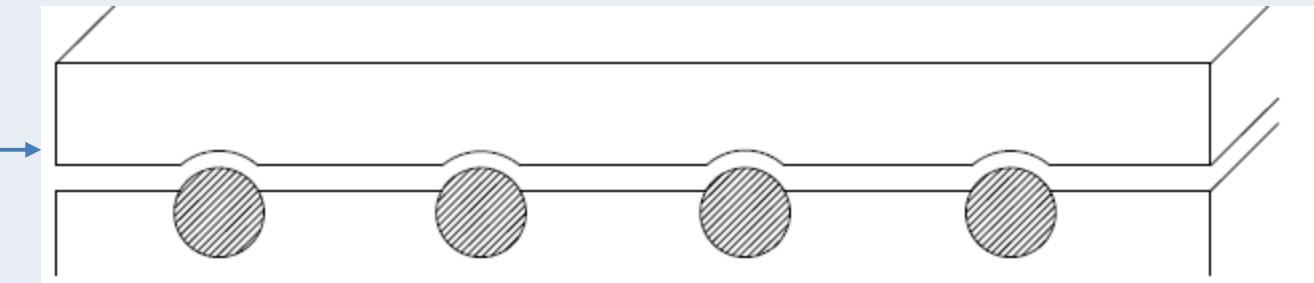
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo

- La delaminazione si avrà invece quando:

$$C > \frac{S - D}{2}$$



in cui S è l'interasse tra le barre di armatura mentre D è il diametro, C lo spessore di copriferro.

- Vi saranno poi effetti d'angolo per le barre di estremità:

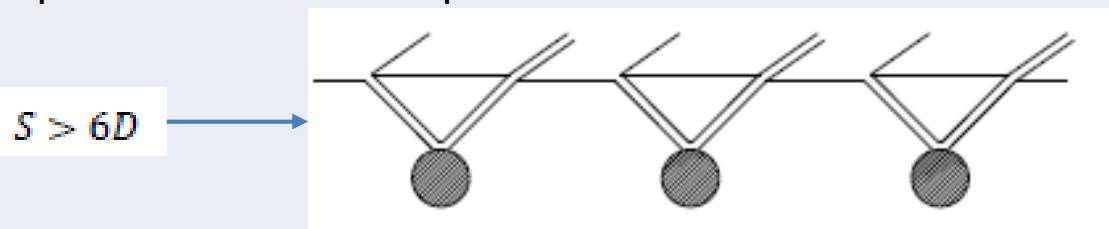


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo

- La conseguenza della fessurazione del copriferro è anche una riduzione della resistenza a compressione del calcestruzzo oltre che dell'aderenza tra acciaio e calcestruzzo. La disposizione delle barre longitudinali determina le modalità con cui le fessure si sviluppano fino a raggiungere aperture tali da consentire il distacco della parte di calcestruzzo delimitata dalle fessure stesse.
- Secondo Bazant (1979) si possono prevedere due diverse modalità di rottura, la prima con piani di frattura inclinati di 45° , la seconda con un piano di frattura parallelo alla barra (delaminazione).
- Il primo tipo di rottura si avrà quando è verificata la condizione:



in cui S è l'interasse tra le barre di armatura mentre D è il diametro.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

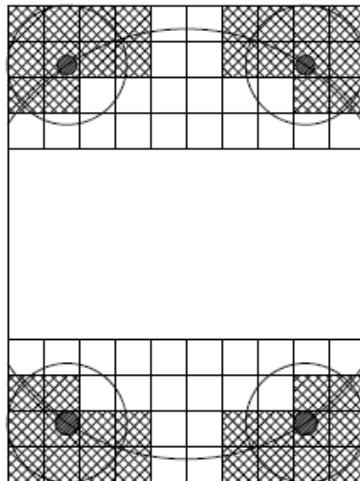
Degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo viene modellato in modo tale da riuscire a cogliere in maniera semplice le conseguenze principali sul comportamento globale della sezione. In particolare si considera il danneggiamento del materiale nella zona circostante le barre di armatura che si corrodono con una diminuzione della resistenza a compressione. Vanno dunque individuate gli elementi di calcestruzzo che si trovano in prossimità delle barre di armatura e che quindi possono subire il danneggiamento. A differenza di altri modelli semplificati (Coronelli et al., 2004), in cui si assegnano a priori a tutti gli elementi del copriferro della zona compressa le caratteristiche del materiale degradato, il modello proposto in Vergani et.al (2010) prevede che solo gli elementi compresi in un intorno della barra di raggio pari al copriferro siano soggetti al degrado, inoltre solo negli elementi che si trovano al di fuori del nucleo confinato viene attivato il degrado.

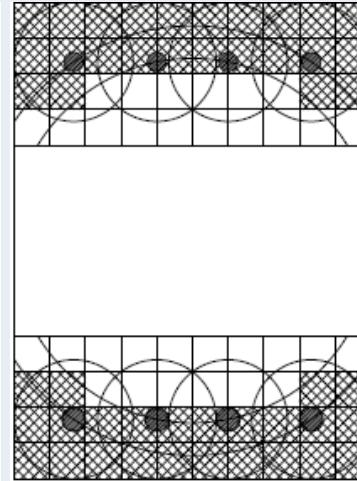
VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo → Elementi soggetti a degrado



■ Elemento soggetto a degrado



■ Elemento soggetto a degrado

Individuazione degli elementi di calcestruzzo che subiscono danneggiamento in seguito alla corrosione delle armature (Vergani et.al 2010)

Pur essendo un modello semplicistico, si riesce a cogliere il *diverso meccanismo di danneggiamento dipendente dalla disposizione delle barre*: se le barre sono molto vicine tra loro, *il copriferro tenderà a distaccarsi secondo un piano*, invece se le barre sono lontane oppure sono poste negli angoli, il danneggiamento sarà *limitato alla parte vicina alla barra, con piani di frattura inclinati*

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo → Elementi soggetti a degrado

Per tali elementi così individuati, viene definito un parametro di danneggiamento δ_{fc} da applicare alla resistenza a compressione del calcestruzzo, tale che:

$$f_c = f_{c0} \cdot (1 - \delta_{fc})$$

Il degrado della resistenza a compressione per gli elementi di calcestruzzo fessurato viene modellato con riferimento alla relazione riportata in (Coronelli et al., 2004):

$$f_{c,rid} = \frac{f_c}{1 + K \cdot \varepsilon_t / \varepsilon_{c0}}$$

dove:

- K è un coefficiente legato alla scabrezza e al diametro delle barre (si può assumere pari a 0,1 per barre nervate di medio diametro),
- f_c è il valore di picco della tensione di compressione, cui corrisponde la deformazione ε_{c0} . Esprimendo $f_{cm} = f_c + 8$ in MPa, la deformazione ε_{c0} si può calcolare come:

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo → Elementi soggetti a degrado

$$\varepsilon_{c0} = 0.0017 + 0.0010 \cdot \left(f_{cm} / 70 \right)$$

- ε_t rappresenta la deformazione trasversale di rigonfiamento della sezione e si può calcolare come:

$$\varepsilon_t = \frac{n_{barre} \cdot w}{b_i}$$

in cui b_i è la larghezza della parte di sezione considerata e w l'apertura media di fessura per ogni barra ed n_{barre} il numero di barre presenti in b_i .

Calcolo di w-Modello di Duracrete

Sulla stima dell'ampiezza di fessurazione, che diventa quindi l'unica variabile che correla il *livello raggiunto dalla corrosione al livello di danneggiamento del calcestruzzo*, esistono in letteratura numerosi modelli basati su relazioni empiriche. Secondo l'approccio seguito in DuraCrete (1998) w può essere stimato, *ipotizzando una corrosione di tipo uniforme* della barra, come:

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo → Elementi soggetti a degrado

$$w(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq w_0 \\ w_0 + \beta \cdot (x - x_0) & \text{se } x > x_0 \end{cases}$$

in cui

- $w_0 = 0.05 \text{ mm}$ rappresenta *l'apertura di una fessurazione intrinseca da splitting iniziale*;
- β è un *parametro costante* assunto pari a $0,009 \text{ mm}/\mu\text{m}$;
- x è la profondità della corrosione; x_0 : rappresenta *la profondità di corrosione necessaria per produrre la prima fessura da splitting* ed è pari:

$$x_0 = a_1 + a_2 \cdot \frac{c}{D_0} + a_3 \cdot f_{c,sp}$$

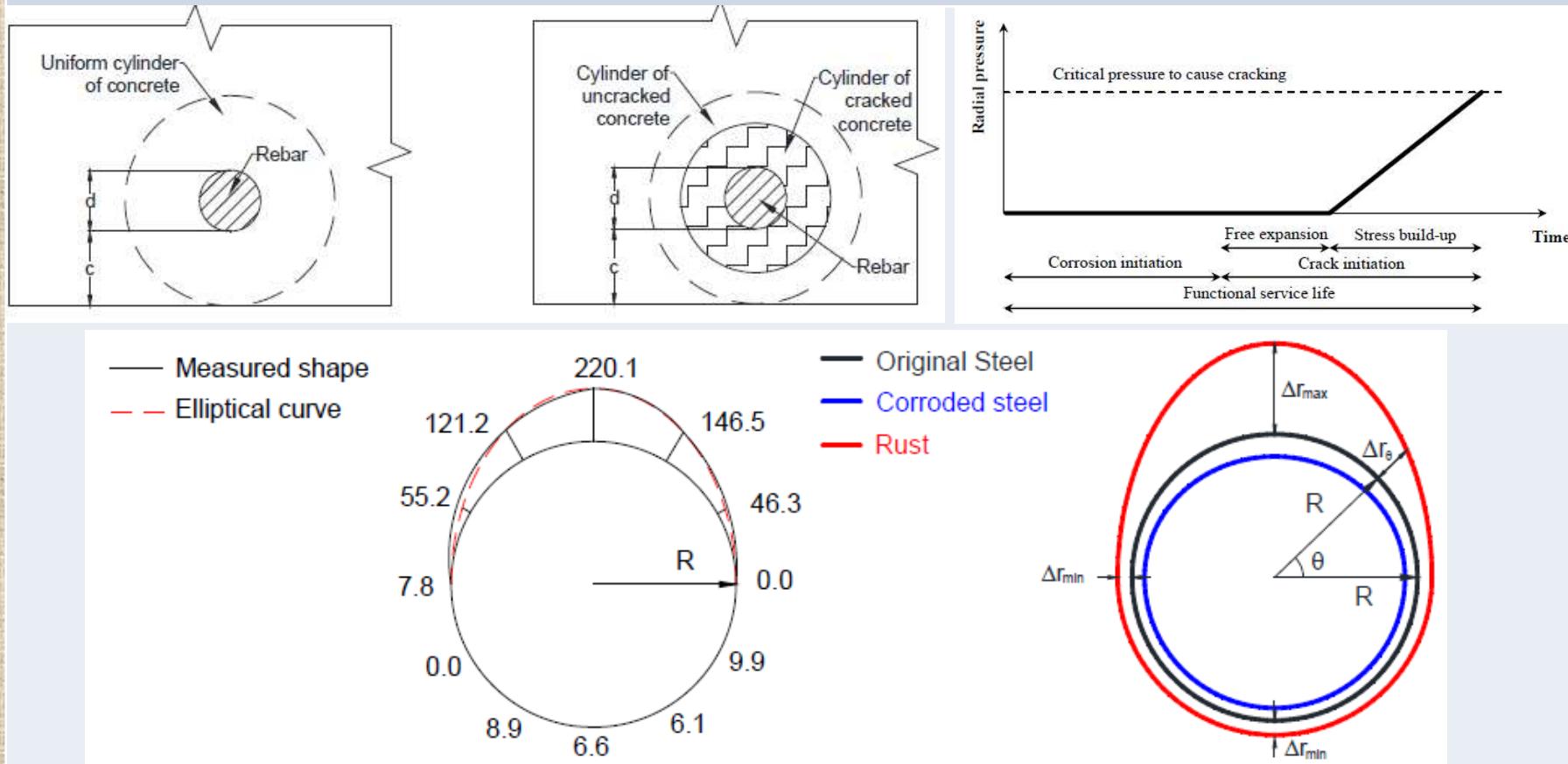
in cui c è lo spessore di copriferro, $D_0 = D_{max}$ è il diametro della barra più grande nel gruppo considerato, i parametri $a_1 = 74.4 \mu\text{m}$, $a_2 = 7.3 \mu\text{m}$, $a_3 = -17.4 \mu\text{m N}/\text{mm}^2$ sono ottenuti per via sperimentale, $f_{c,sp}$ è la resistenza caratteristica di trazione allo splitting, valutabile come: $f_{c,sp} = f_{ct,095}/0.90 \rightarrow f_{ct,095} = 1.3 \cdot 0.3 \cdot (f_c)^{2/3}$

in cui : $f_{ct,095}$ è la resistenza a trazione del calcestruzzo caratteristica al 95%.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

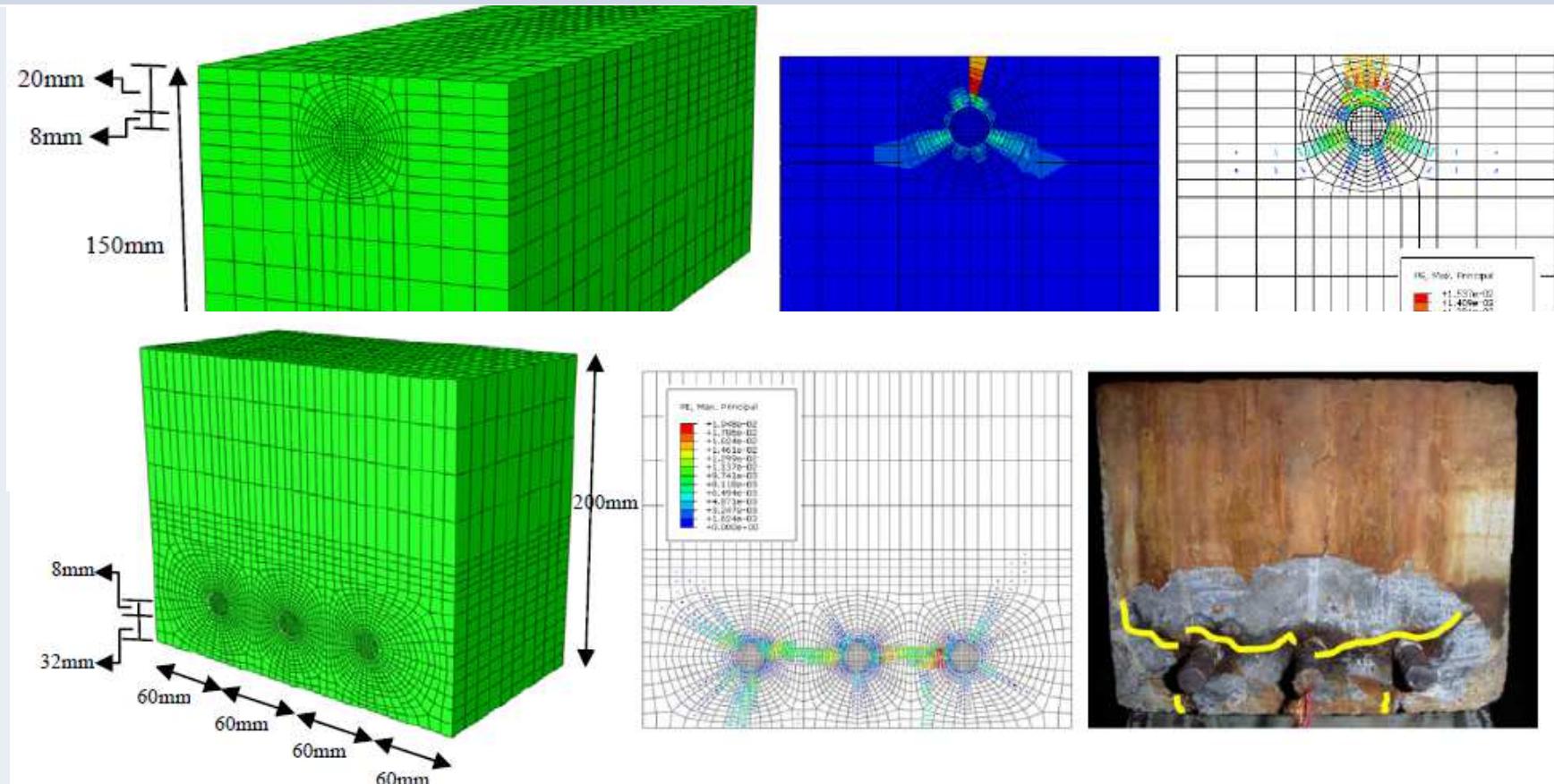
Degrado del calcestruzzo → Numerical Model



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Degrado del calcestruzzo → Numerical Model



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Aderenza acciaio/calcestruzzo → bond-slip

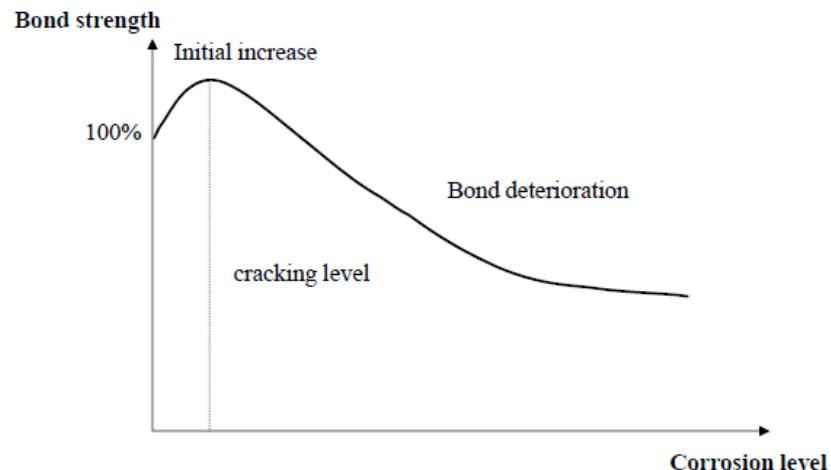
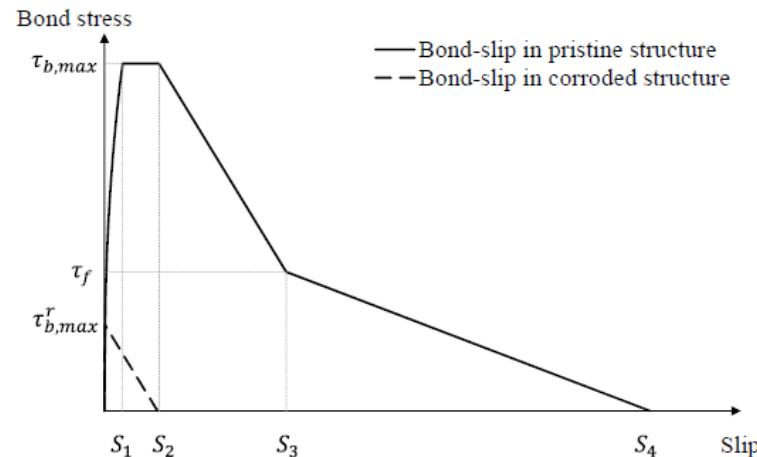
Legame model code Fib2010

$$\tau_b = \begin{cases} \tau_{b,max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha & 0 \leq S \leq S_1 \\ \tau_{b,max} & S_1 \leq S \leq S_2 \\ \tau_{b,max} - \frac{\tau_{b,max} - \tau_f}{S_2 - S_3} (S - S_3) & S_2 \leq S \leq S_3 \\ \tau_f & S_3 \leq S \leq S_4 \\ 0 & S \geq S_4 \end{cases}$$

Rodriguez et al. (1994)

$$\tau_{b,max}^r = K x_b^{-\Gamma}$$

where $\tau_{b,max}^r$ is the residual bond strength (MPa), x_b is corrosion attack penetration or bar radius reduction (μm) and K and Γ are constants to fit with test results.



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Aderenza acciaio/calcestruzzo → bond-slip

Coronelli and Gambarova (2004)

$$\tau_{b,max}^r = \tau_c + \tau_s = 0.6 \left(0.5 + \frac{c}{d} \right) f_t' (1 - \psi x^\mu) + \frac{\kappa A_{tr} f_y}{s_{tr} d}$$

modified the bond-slip relationship based on Rodriguez et al. (1994), assuming the corrosion is uniformly distributed thus the bond-slip relationship is the same for the entire reinforcement.

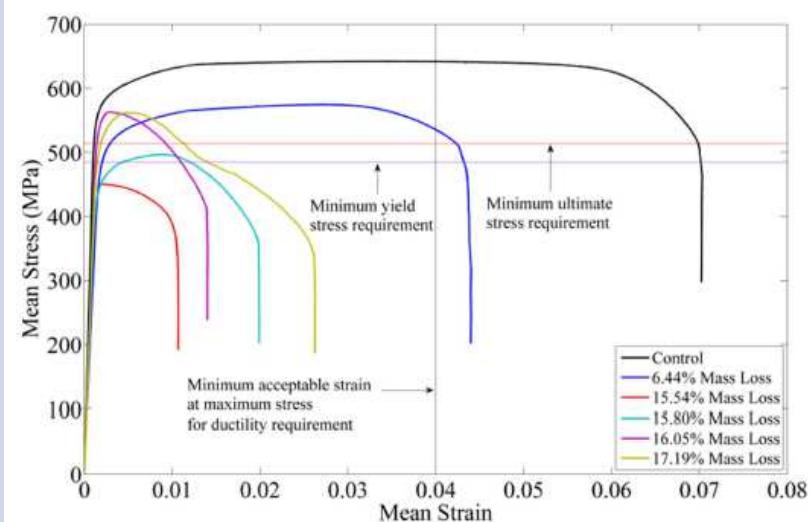
where τ_c is contribution of concrete to bond, τ_s is contribution of stirrups to bond, f_t' is the tensile strength of concrete, f_y is yield stress of the stirrups, c/d is concrete cover to bar diameter ratio, s_{tr} is spacing of stirrups, A_{tr} is cross sectional area of stirrups and ψ , μ , and κ are empirical constants (Berto et al. 2008).

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

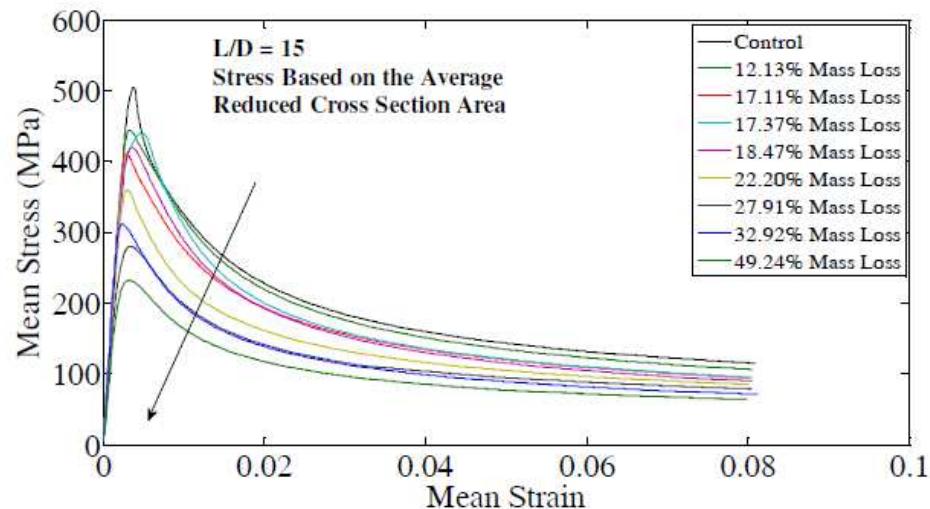
Aderenza acciaio/calcestruzzo → Buckling bar reinforcement

Effect of Corrosion of Tensile Properties of Corroded Bars



Mean stress-strain curves of tension tests for the 8mm diameter bars

Effect of Corrosion on Inelastic Buckling of Corroded Bars



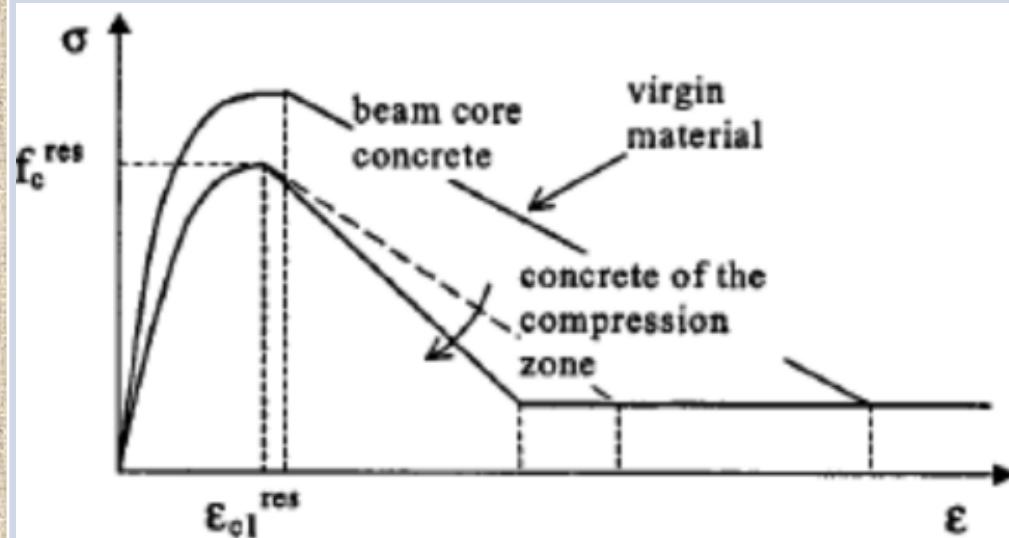
Mean stress-strain curves of corroded bars in compression

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Aderenza acciaio/calcestruzzo → Buckling bar reinforcement

Residual Capacity of Cracked Cover



Concrete Constitutive Model of Cracked Cover Concrete in Compression

$$f'_c = \frac{f_c}{1 + K \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{c0}}}$$

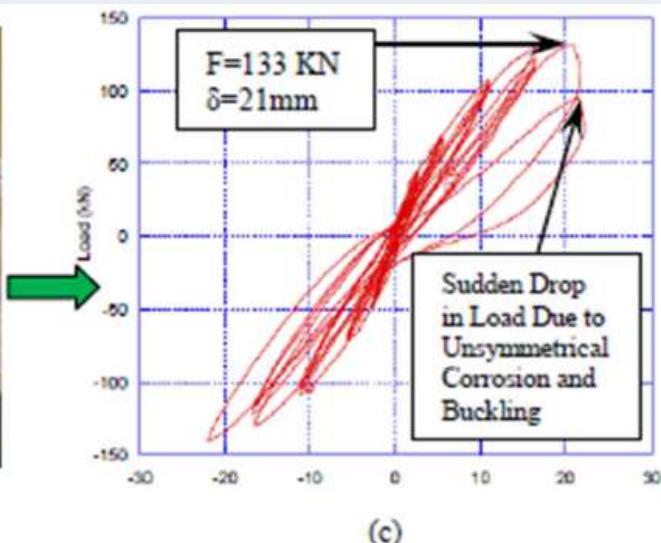
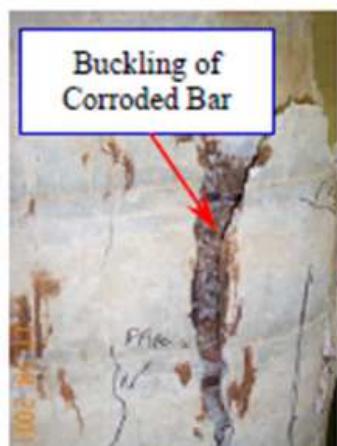
where, K is the coefficient related to bar roughness and diameter (for medium-diameter ribbed bars a value $K=0.1$); ε_{c0} = strain at the peak compressive stress f_c ; and ε_1 = average (smeared) tensile strain in the cracked concrete at right angles to the direction of the applied compression. Further detail is available in [4].

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Aderenza acciaio/calcestruzzo → Buckling bar reinforcement

Effect of Corrosion on Confined Concrete and Stability of Reinforcement



Experimental test on
corrosion damaged
bridge pier

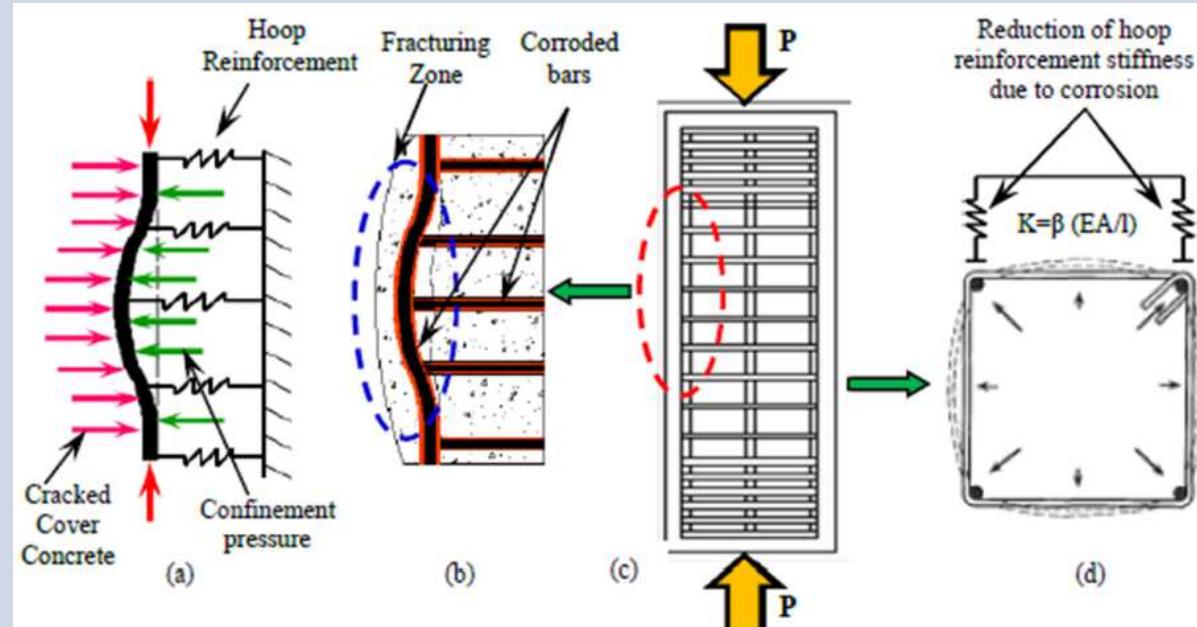
However the corrosion of vertical bars and hoop reinforcement can change the behaviour of confined concrete and result in instability in the vertical bars under high compression loads. Figure 4 shows buckling of vertical bars during an experiment on scaled bridge piers in the US [6].

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLO DI MECCANISMO DI DEGRADO PER CORROSIONE

Aderenza acciaio/calcestruzzo → Buckling bar reinforcement

Effect of Corrosion on Confined Concrete and Stability of Reinforcement



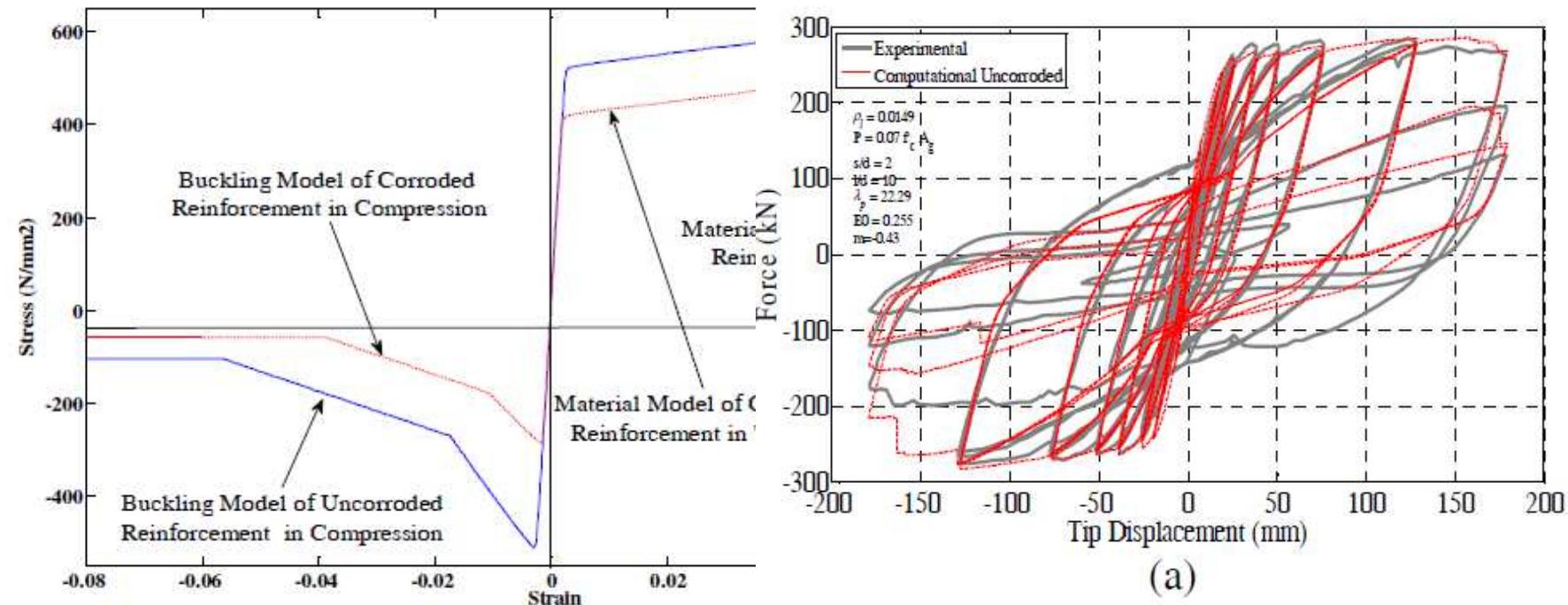
Predicted Behaviour of corrosion damaged well confined RC column:
a) Buckling Model b) Damage Model c) Test Specimen and d) Corrosion induced Volumetric Loss of Confining Steel

The interaction between core and cover concrete, vertical bars and hoop reinforcement is shown in the proposed model in Figure. The model presented in Figure 5 is used to calculate the buckling length and confinement parameters of corroded column.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Effect of Corrosion on Confined Concrete and Stability of Reinforcement

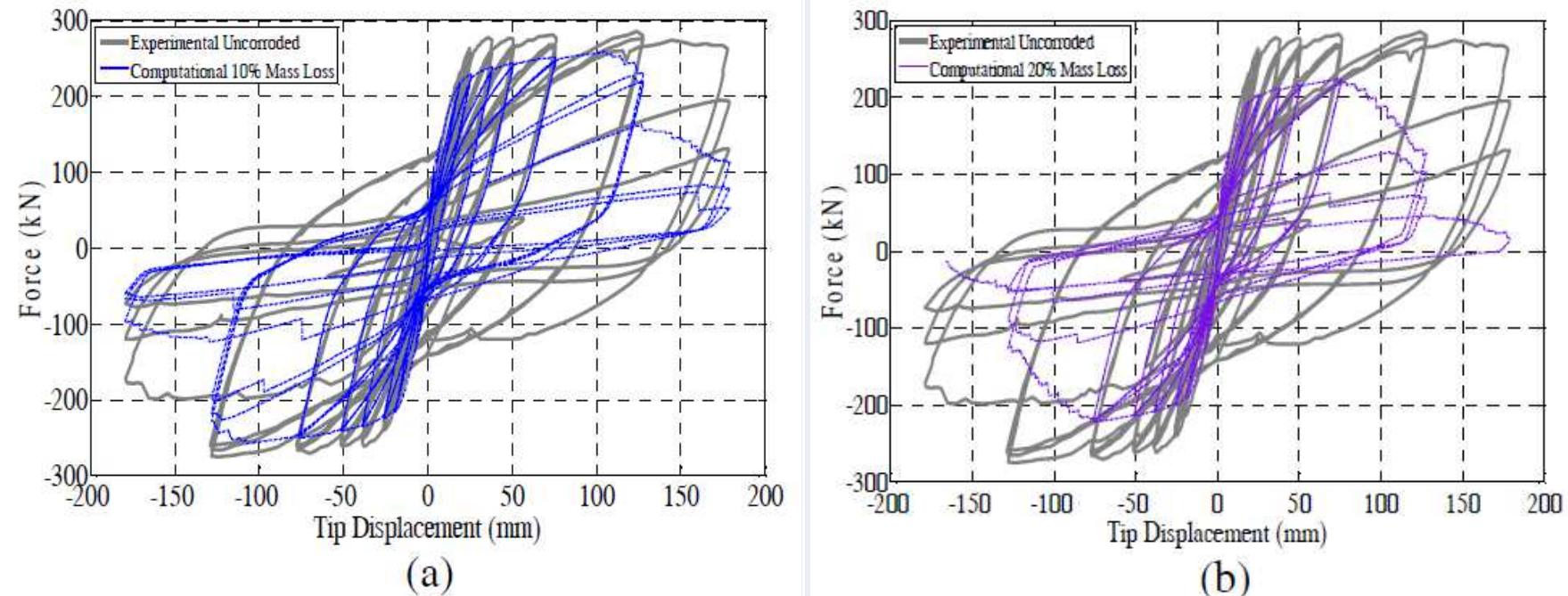


Non-linear uniaxial material model of reinforcing steel with L/D = 12: (a) Monotonic (b) cyclic

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

MODELLAZIONE MECCANISMI DI DEGRADO PER CORROSIONE

Effect of Corrosion on Confined Concrete and Stability of Reinforcement



Nonlinear cyclic response of Lehman column 415: (a) uncorroded
(b) 10% mass loss and (c) 20% mass loss

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

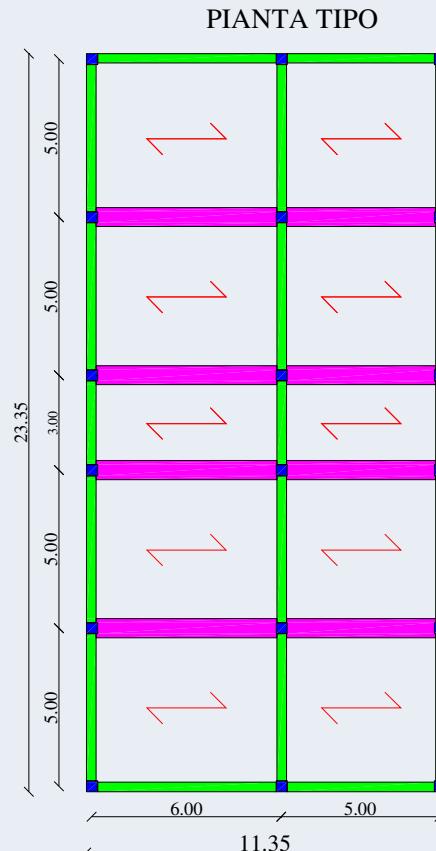
CASO DI STUDIO -GENERALITÀ

Per valutare l'effetto della corrosione sulla risposta sismica globale di una struttura in c.a., nell'esempio presente è stato modellato ed analizzato un edificio tipico caratterizzato da un comportamento a telai piani, tipologicamente appartenente all'edilizia popolare e progettato secondo criteri pre-anni '70. Per tale esempio sono stati considerati differenti scenari di degrado, al fine di simulare la disomogeneità del fenomeno all'interno di una struttura. A ciascun scenario si sono associati vari livelli di corrosione, espressi in termini di riduzione percentuale di massa. La riduzione dei livelli di performance, in termini di resistenza e duttilità strutturale, correlata all'età dell'edificio permette di definire l'effetto sulla vulnerabilità sismica dell'opera in funzione del livello di aggressività ambientale a cui può essere sottoposta.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

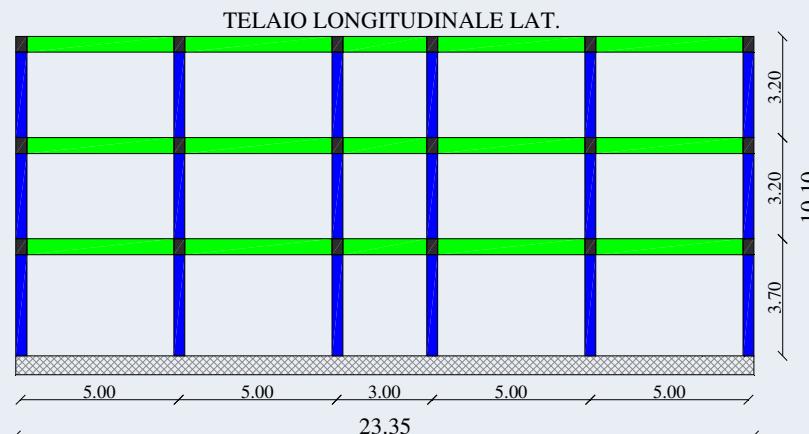
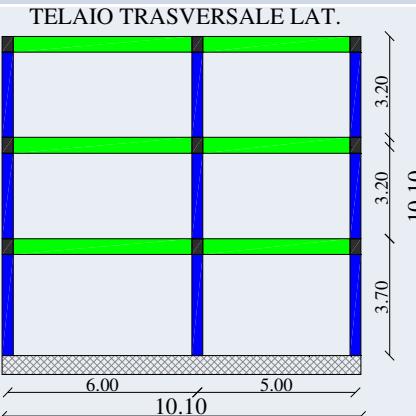
CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Geometria struttura



LEGENDA ELEMENTI STRUTTURALI

- PILASTRI 35x35
- TRAVI PRINCIPALI 30x50
- TRAVI SECONDARIE 60x20
- SOLAI LATEROCEMENTO H=20 cm
- NODI TRAVE PILASTRO
- FONDAZIONE



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

CARICHI

G_{K1} [kN/m ²]	3.00	G_{K2} [kN/m ²]	2.00	Q_{K1} [kN/m ²]	2.00	Q_{K-NEVE} [kN/m ²]	1.20
-------------------------------	------	-------------------------------	------	-------------------------------	------	-----------------------------------	------

MATERIALI INTEGRATI

CALCESTRUZZO

ACCIAIO

f_c [Mpa]	25.00	f_{sy} [Mpa]	380.00	f_{su} [Mpa]	538.00	ϵ_{su} [%]	26.5
-------------	-------	----------------	--------	----------------	--------	---------------------	------

DISTRIBUZIONE ARMATURE ELEMENTI

PILASTRI 30x30	ARMATURE					
	FERRI LONGITUDINALI			STAFFE TRASVERSALI		
	S-spigolo	B-lato	H-lato	Estremo-s	Campata-c	Estremo-d
	4Φ14	1Φ14	1Φ14	Φ8/18	Φ8/30	Φ8/18
TRAVI 30X50	FERRI LONGITUDINALI			STAFFE TRASVERSALI		
	Appoggio-s	Campata-c	Appoggio-d	Estremo-s	Campata-c	Estremo-d
	sup	5Φ14	sup	3Φ14	sup	5Φ14
	inf	3Φ14	inf	5Φ14	inf	3Φ14

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Azione da Degrado – Corrosione per azione da cloruri (Pitting)

Legge di Fick (modificata)	Tempo d'innesto della corrosione	Profondità di corrosione, intensità di corrente e resistività del copriferro (Val Melchers e Liu-Weyers)																																																																																																												
$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_{ref} \cdot \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial t^2}$	$T_i = \left\{ \frac{x^2}{4 \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2} \cdot \frac{1-m}{K_o} \right\}^{\frac{1}{1-m}}$	$p(t) = 0.0116 \cdot i_{corr}(T_i) \cdot R_p \cdot (t - T_i)$ $i_{corr}(t) = 0.926 e^{[7.98 + 0.7771 \ln(42.25 C_{cr}) - 10.22 - 0.000116 R_v(t) + 2.24 t^{0.215}]} \cdot$ $R_v(t) = e^{[8.03 - 0.549 \ln(1 + 42.25 C_{cr})]}$																																																																																																												
Legge di degrado (Imperatore et, al)																																																																																																														
$\frac{\sigma_{y,corr}}{\sigma_{y,uncorr}} = 1 - 0.019961 \cdot M_{corr} [\%]$ $\frac{\sigma_{u,corr}}{\sigma_{u,uncorr}} = 1 - 0.018642 \cdot M_{corr} [\%]$ $\frac{\varepsilon_{u,corr}}{\varepsilon_{u,uncorr}} = e^{-0.0546993 M_{corr} [\%]}$	massa persa al variare del periodo di esposizione e per diversi concentrazione superficiale dei cloruri.	<table border="1"> <caption>Data points estimated from the graph</caption> <thead> <tr> <th>Periodo di Esposizione [anni]</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.10%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.20%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.30%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.40%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.50%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.60%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.70%)</th> <th>Massa Persa [%] (Cs=0.80%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>~1</td> <td>~2</td> <td>~3</td> <td>~4</td> <td>~5</td> <td>~6</td> <td>~7</td> <td>~8</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>~2</td> <td>~4</td> <td>~6</td> <td>~8</td> <td>~10</td> <td>~12</td> <td>~14</td> <td>~16</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>~3</td> <td>~6</td> <td>~9</td> <td>~12</td> <td>~15</td> <td>~18</td> <td>~21</td> <td>~24</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>~4</td> <td>~8</td> <td>~12</td> <td>~16</td> <td>~20</td> <td>~24</td> <td>~28</td> <td>~32</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>~5</td> <td>~10</td> <td>~15</td> <td>~20</td> <td>~25</td> <td>~30</td> <td>~35</td> <td>~40</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>~6</td> <td>~12</td> <td>~18</td> <td>~24</td> <td>~30</td> <td>~36</td> <td>~42</td> <td>~48</td> </tr> <tr> <td>70</td> <td>~7</td> <td>~14</td> <td>~21</td> <td>~28</td> <td>~35</td> <td>~42</td> <td>~49</td> <td>~56</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>~8</td> <td>~16</td> <td>~24</td> <td>~32</td> <td>~40</td> <td>~48</td> <td>~56</td> <td>~64</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>~9</td> <td>~18</td> <td>~27</td> <td>~36</td> <td>~45</td> <td>~54</td> <td>~63</td> <td>~72</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>~10</td> <td>~20</td> <td>~30</td> <td>~40</td> <td>~50</td> <td>~60</td> <td>~69</td> <td>~78</td> </tr> </tbody> </table>	Periodo di Esposizione [anni]	Massa Persa [%] (Cs=0.10%)	Massa Persa [%] (Cs=0.20%)	Massa Persa [%] (Cs=0.30%)	Massa Persa [%] (Cs=0.40%)	Massa Persa [%] (Cs=0.50%)	Massa Persa [%] (Cs=0.60%)	Massa Persa [%] (Cs=0.70%)	Massa Persa [%] (Cs=0.80%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	~1	~2	~3	~4	~5	~6	~7	~8	20	~2	~4	~6	~8	~10	~12	~14	~16	30	~3	~6	~9	~12	~15	~18	~21	~24	40	~4	~8	~12	~16	~20	~24	~28	~32	50	~5	~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40	60	~6	~12	~18	~24	~30	~36	~42	~48	70	~7	~14	~21	~28	~35	~42	~49	~56	80	~8	~16	~24	~32	~40	~48	~56	~64	90	~9	~18	~27	~36	~45	~54	~63	~72	100	~10	~20	~30	~40	~50	~60	~69	~78
Periodo di Esposizione [anni]	Massa Persa [%] (Cs=0.10%)	Massa Persa [%] (Cs=0.20%)	Massa Persa [%] (Cs=0.30%)	Massa Persa [%] (Cs=0.40%)	Massa Persa [%] (Cs=0.50%)	Massa Persa [%] (Cs=0.60%)	Massa Persa [%] (Cs=0.70%)	Massa Persa [%] (Cs=0.80%)																																																																																																						
0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																						
10	~1	~2	~3	~4	~5	~6	~7	~8																																																																																																						
20	~2	~4	~6	~8	~10	~12	~14	~16																																																																																																						
30	~3	~6	~9	~12	~15	~18	~21	~24																																																																																																						
40	~4	~8	~12	~16	~20	~24	~28	~32																																																																																																						
50	~5	~10	~15	~20	~25	~30	~35	~40																																																																																																						
60	~6	~12	~18	~24	~30	~36	~42	~48																																																																																																						
70	~7	~14	~21	~28	~35	~42	~49	~56																																																																																																						
80	~8	~16	~24	~32	~40	~48	~56	~64																																																																																																						
90	~9	~18	~27	~36	~45	~54	~63	~72																																																																																																						
100	~10	~20	~30	~40	~50	~60	~69	~78																																																																																																						

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Azione Sismica – Parametri pericolosità (Località: Potenza[PZ])



Latitudine: 40.6372° - Longitudine: 15.8022°

Sito: Corso Umberto I 46, 85100 Potenza Potenza - **Coordinate sito (Datum ED50):** Longitudine = 15.8031°; Latitudine = 40.6382°; Altitudine = 803.00 metri s.l.m.

Punti della maglia: 33890, 34113, 34112, 33891;

Valori dei parametri ag. Fo, Tc* per i periodi di ritorno TR associati a ciascun Stato Limite:

Stato Limite	TR [anni]	ag [g]	Fo	Tc* [s]
SLO	30	0.055	2.333	0.285
SLD	50	0.072	2.335	0.313
SLV	475	0.203	2.448	0.363
SLC	975	0.263	2.448	0.401

Vita di riferimento Vr per l'azione sismica = 50

Sito	
Modalità ricerca	Per coordinate
Descrizione sito	Corso Umberto I 46, 851...
Longitudine (WGS84) [°]	15.8022
Latitudine (WGS84) [°]	40.6372
Longitudine (ED50) [°]	15.8031
Latitudine (ED50) [°]	40.6382
Altitudine s.l.m. [m]	803.00
Distanza dalla costa [m]	80.00
Dati generali dell'opera	
Classe d'uso	II
Tipo costruzione	Opere ordinarie
Vita nominale [anni]	50

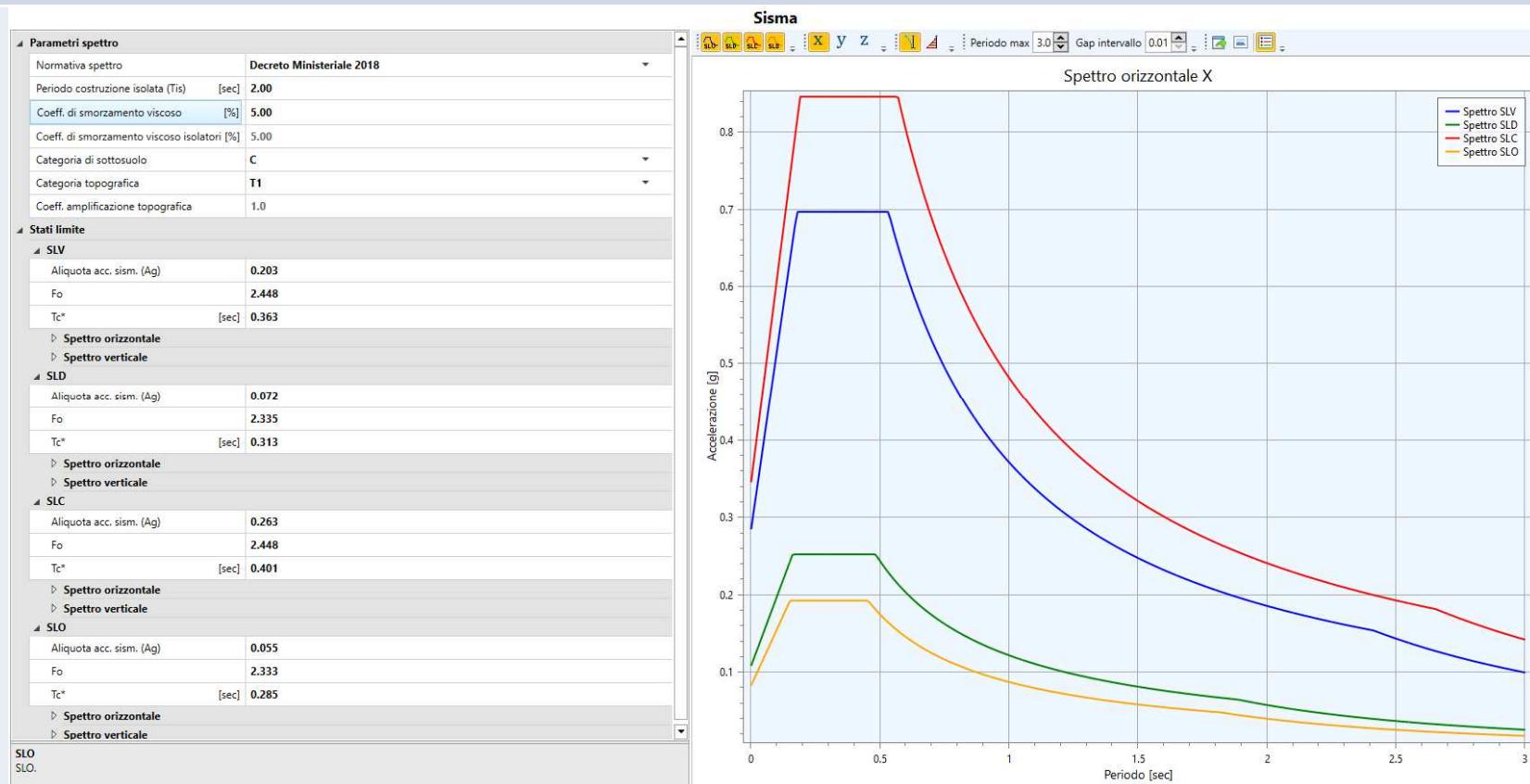
Annula

OK

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Azione Sismica – Spettri Elastici

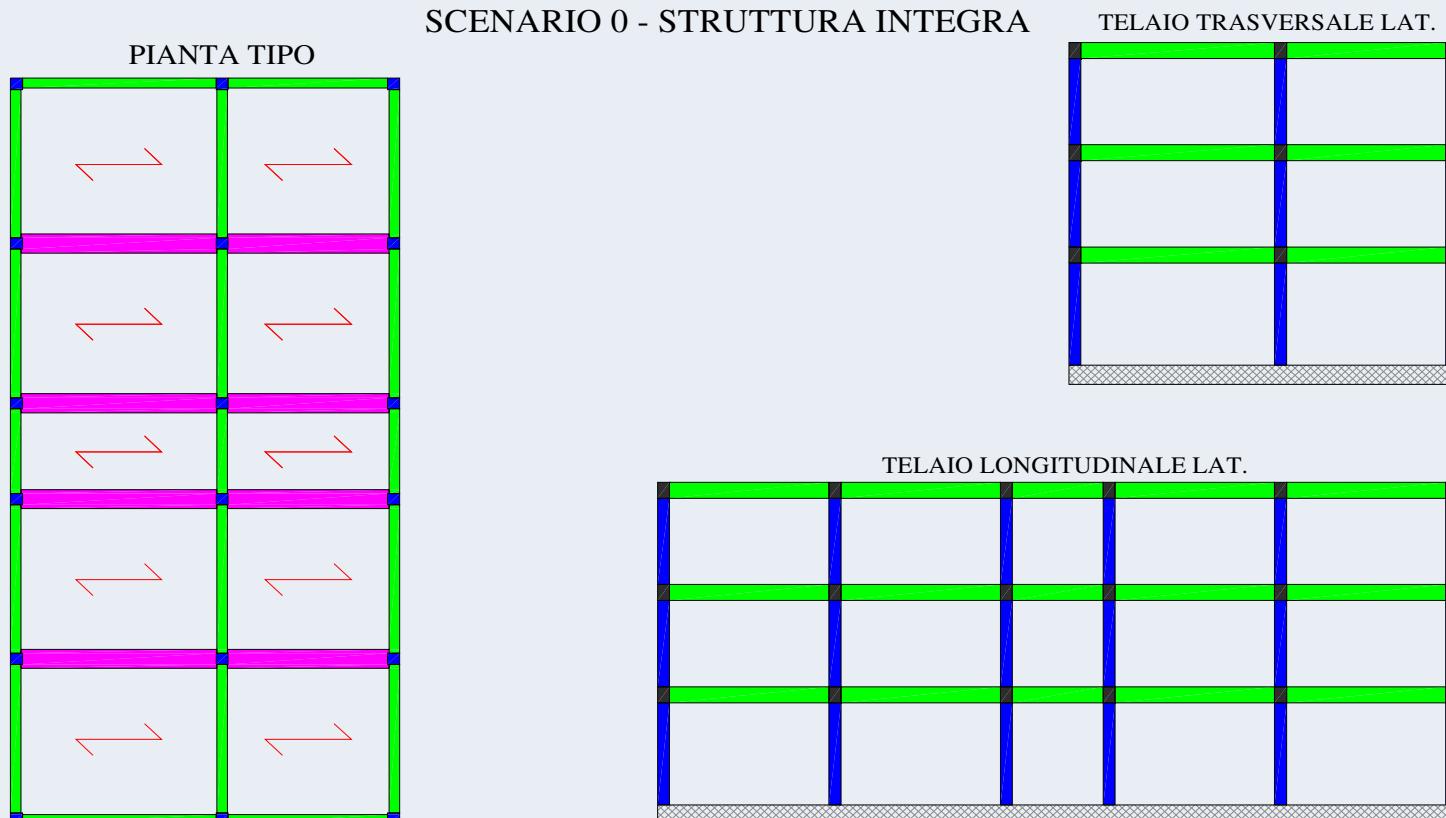


Ing. OLIVETO Francesco

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

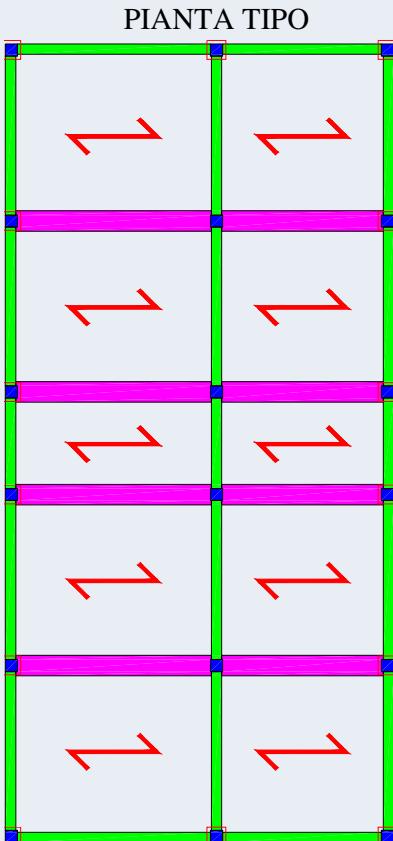
Caso di studio – Scenari di corrosione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

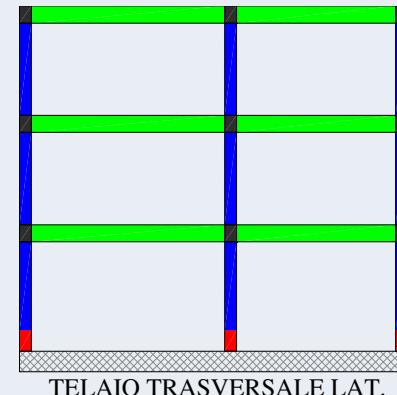
CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Caso di studio – Scenari di corrosione



SCENARIO 1 - CORROSIONE AL PIEDE DEI
PILASTRI AL PIANO TERRA PERIMETRALI

 PILASTRI PIANO TERRA SOGGETTI
A CORROSIONE PER PITTING



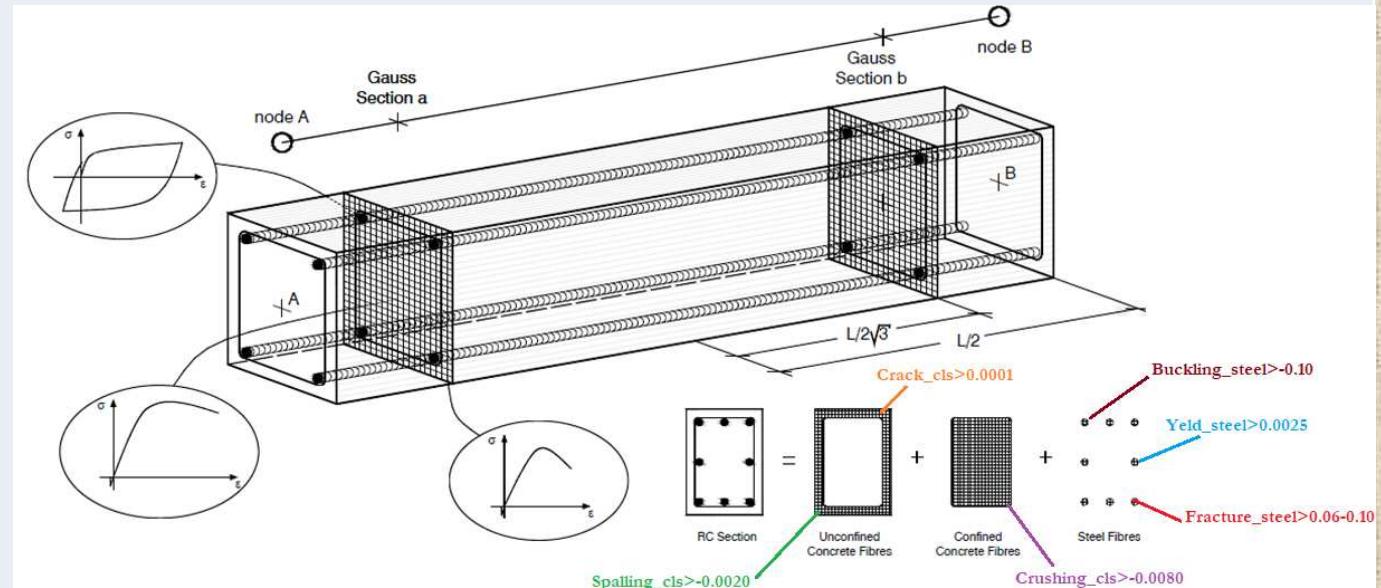
TELAIO LONGITUDINALE LAT.

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Modellazione

Le analisi statiche non lineari sono state condotte tramite modellazioni con elementi beam a plasticità diffusa di tipo force based in grandi spostamenti e rotazioni monitorando durante la storia di carico il raggiungimento dei criteri di performance o stati limite raggiunti a livello di materiale, sezione, elemento e struttura, dalle condizione di esercizio a quelli di collasso.



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Modellazione

CRITERI PRESTAZIONALI

SLE		SLU/SLC		SLC	
Crack_Concrete	$\epsilon_{ctd} = 0.0001$	Crush_Concrete	$\epsilon_{cu-core} = -0.006$	Chord_Rotation	$\theta_u \geq \vartheta_d$
Spalling_Concrete	$\epsilon_{cu-cover} = -0.0035$	Fracture_Steel	$\epsilon_{su-t} = 0.051 - 0.265$		
Yeld_Steel	$\epsilon_{sy} = 0.0025$	Buckling_Steel	$\epsilon_{su-c} = 0.051 - 0.265$	Shear_Failure	$V_R \geq V_d$

NOMENCLATURA

- Crack_Concrete (inizio fessurazione cls): il raggiungimento di una deformazione a trazione limite nel cls;
- Yeld_Steel (snervarmeno armature): il raggiungimento della deformazione di snervamento nell'acciaio;
- Spalling_Concrete (rottura del copriferro di cls): il raggiungimento di una deformazione limite del cover di cls;
- Crushing_Concrete (schiacciamento del cls confinato): il raggiungimento di una deformazione ultima del nucleo di cls;
- Fracture_Steel (rottura a trazione armature): il raggiungimento della deformazione di rottura a trazione nell'acciaio;
- Buckling_Steel (Instabilità barre di armatura): il raggiungimento della deformazione di instabilità barre armature;
- Chord_rotation (rotazione ultima sezione): il raggiungimento della rotazione limite alla corda in condizioni di collasso;
- Shear_Failure (rottura a taglio elemento): il raggiungimento della rottura a taglio di un elemento primario

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

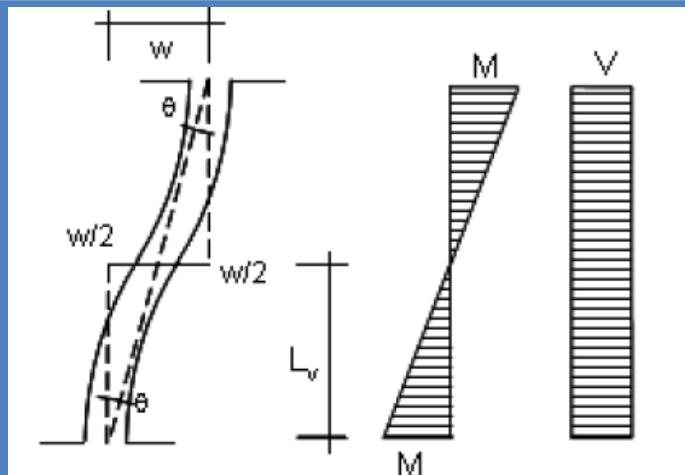
CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Modellazione

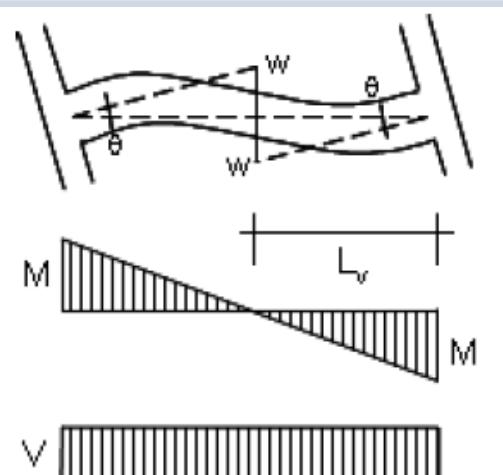
DEFINIZIONE ROTAZIONE ULTIMA

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \cdot \left[\frac{\max(0.01; \omega') \cdot f_c}{\max(0.01; \omega)} \right]^{0.225} \cdot \left(\min\left(9, \frac{L_v}{h}\right) \right)^{0.35} \cdot 25 \left(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) \cdot (1.25^{100} \rho_a)$$

COLONNE



TRAVI



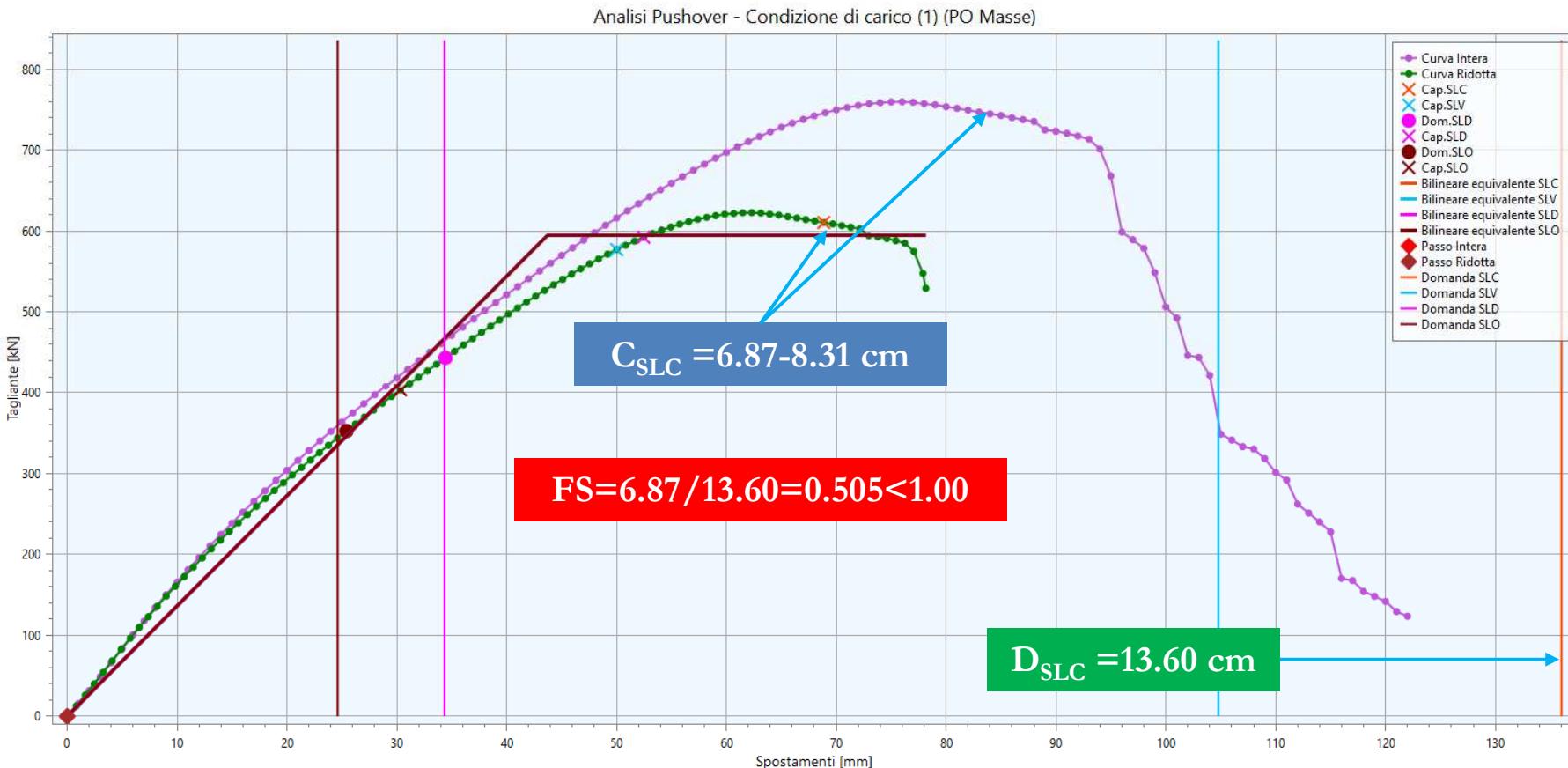
DEFINIZIONE RESISTENZA A TAGLIO CICLICA

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot \left[\frac{h-x}{2L_v} \cdot \min(N; 0.55A_c \cdot f_c) + \left(1 - 0.05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl}) \right) \cdot \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \cdot \left(1 - 0.16 \min(5; \frac{L_v}{h}) \right) \sqrt{f_c A_c} + V_w \right] \right]$$

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

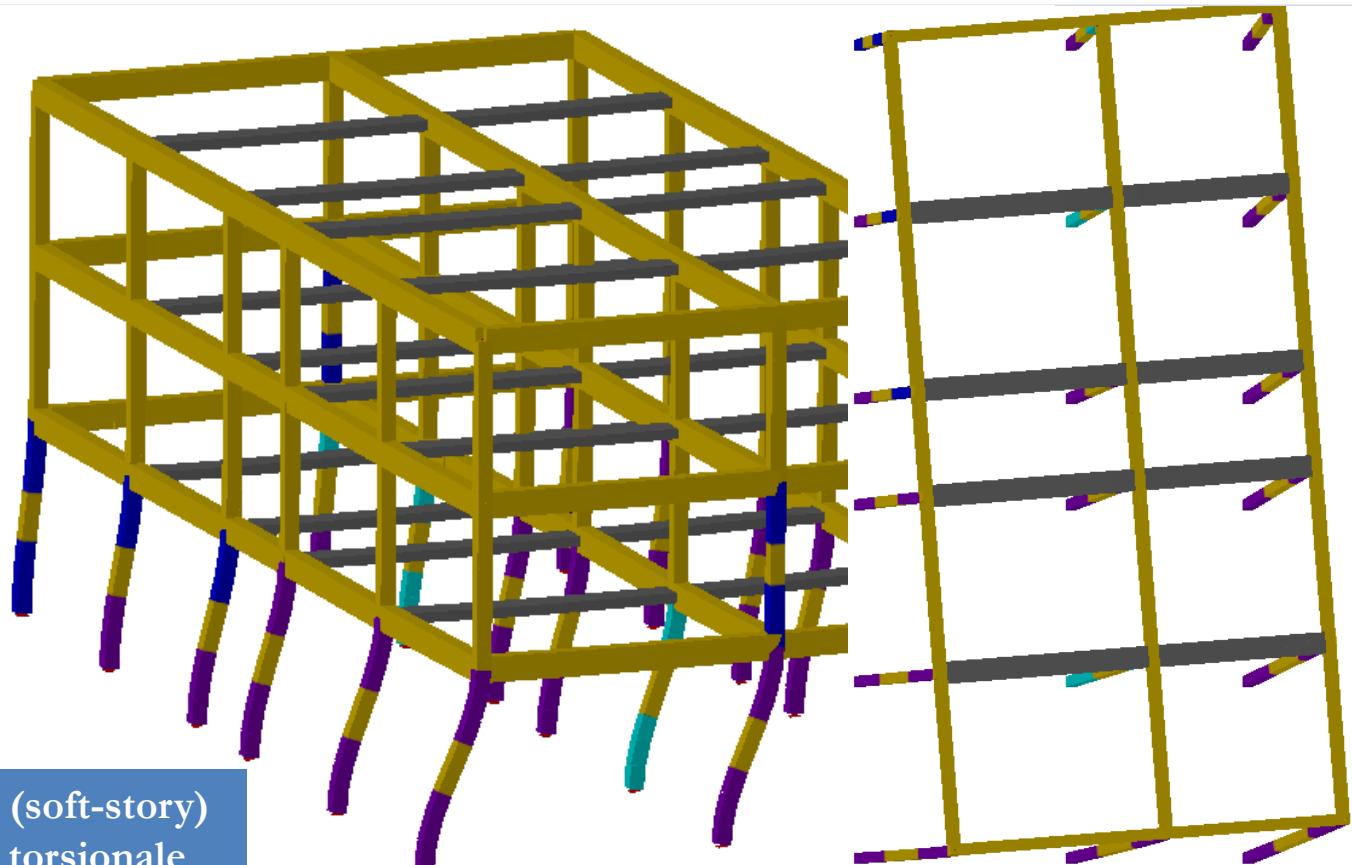
CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura integra → $T_{MAX} = 759.60 \text{ kN}$ (dir.X)



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

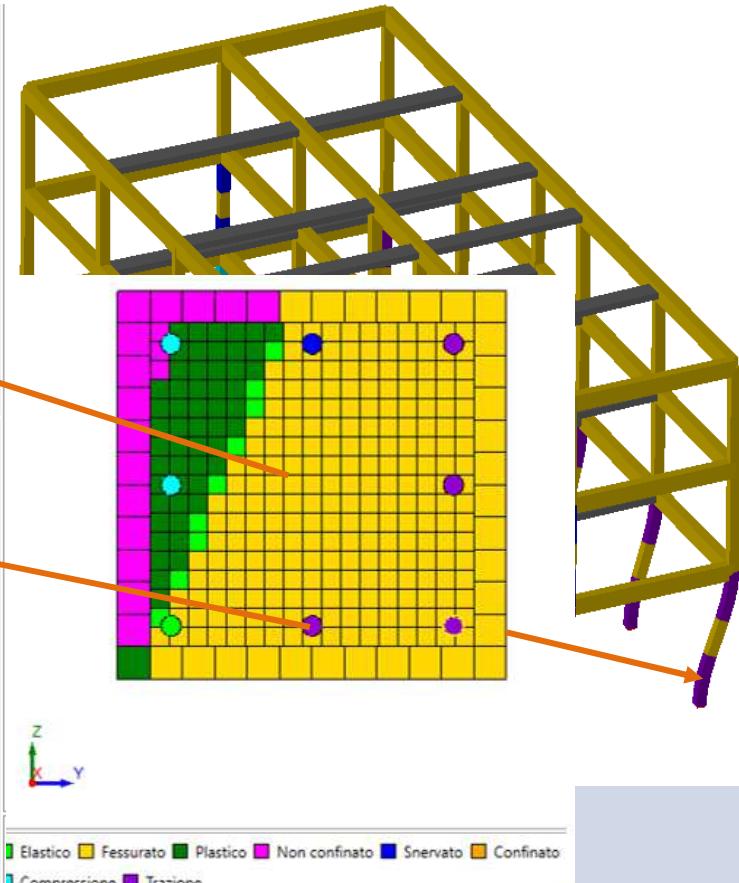
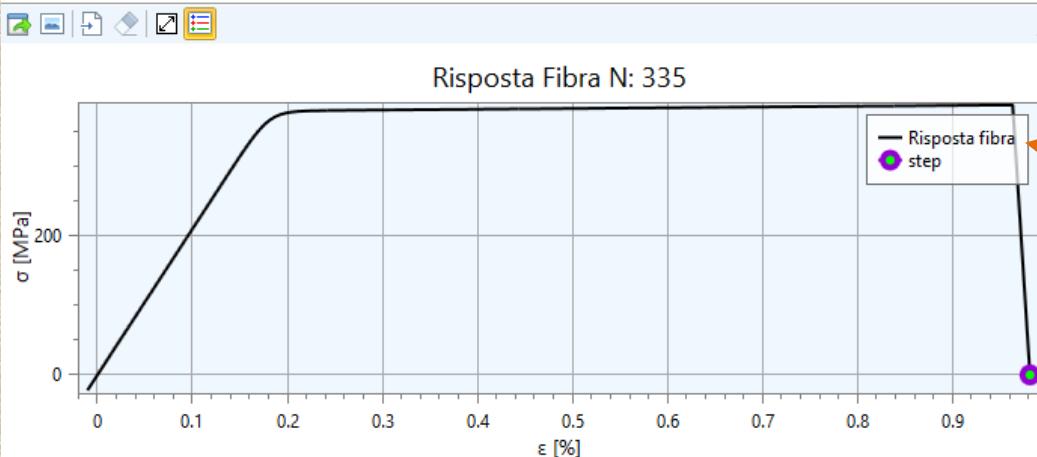
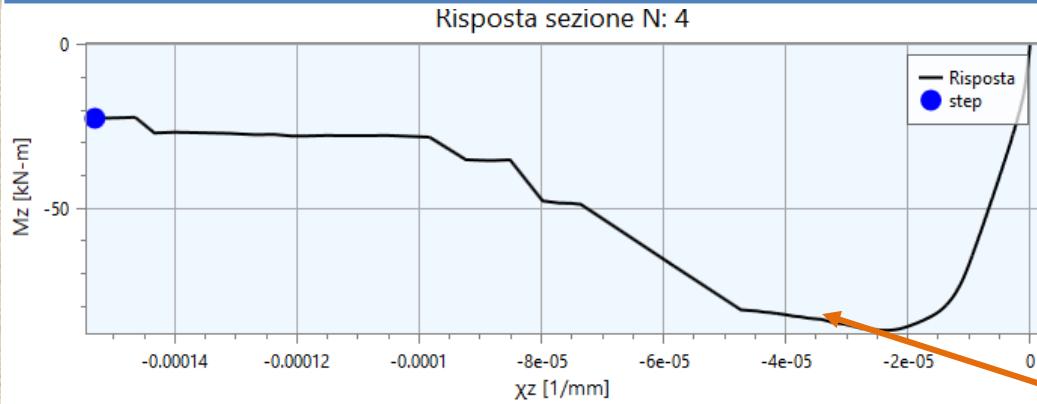
Struttura integra $\rightarrow T_{MAX} = 759.60 \text{ kN}$ (dir.X)



Meccanismo di piano (soft-story)
con comportamento torsionale

VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

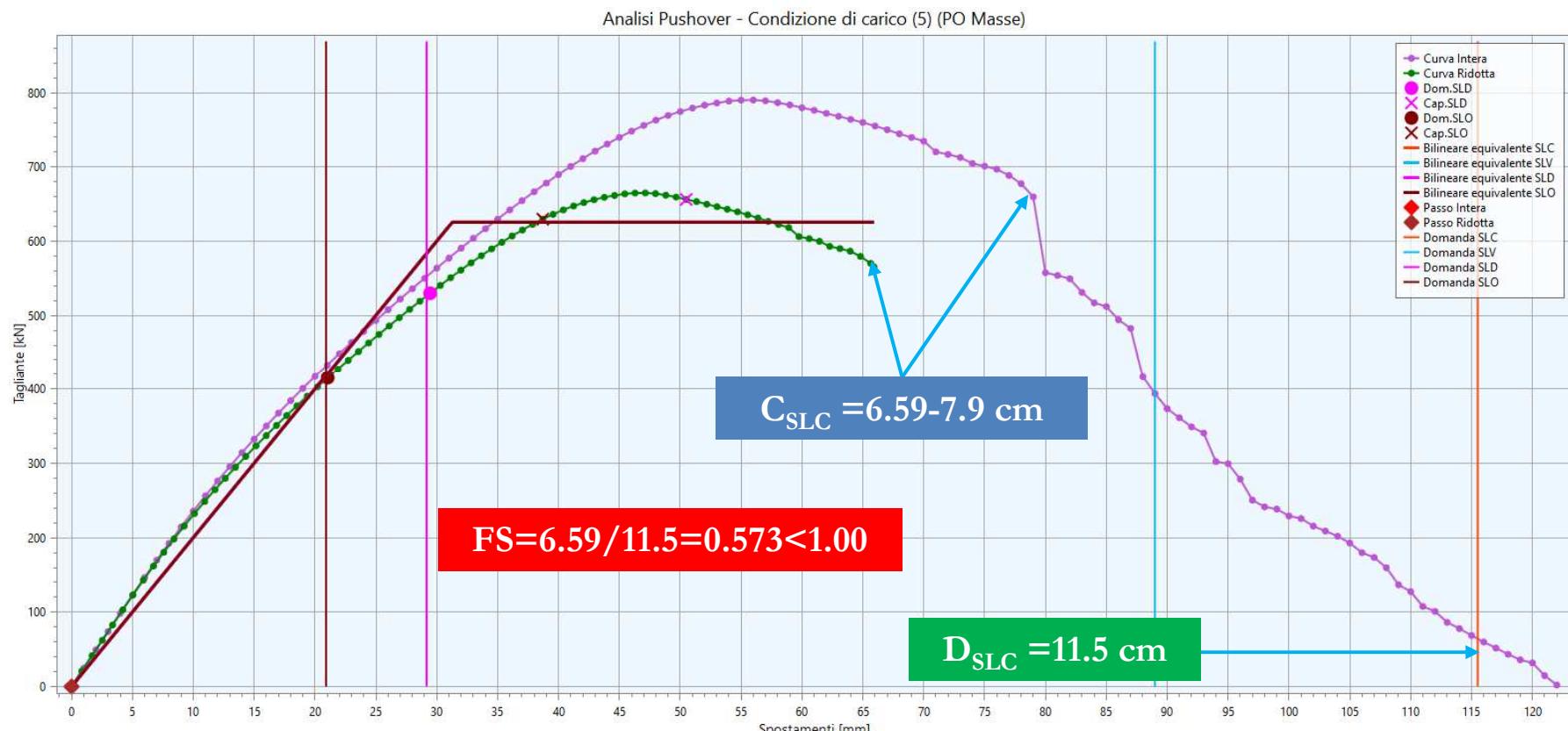
Struttura integra → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura integra → $T_{MAX} = 790.21$ kN (dir. Y)

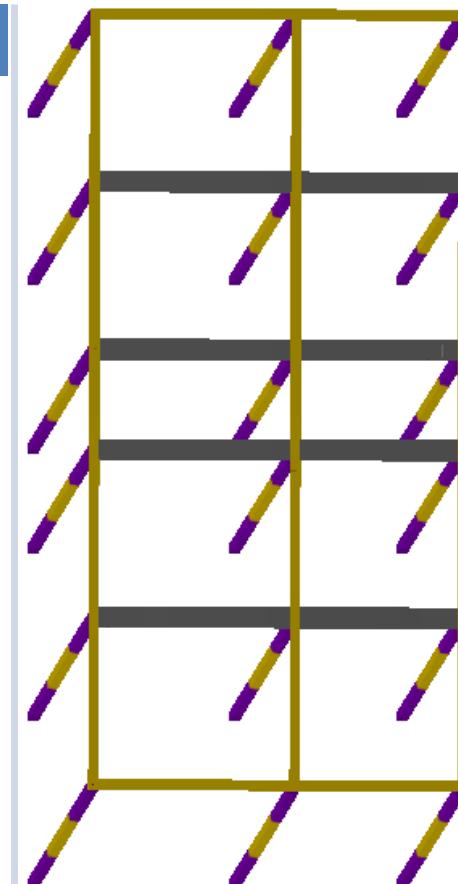
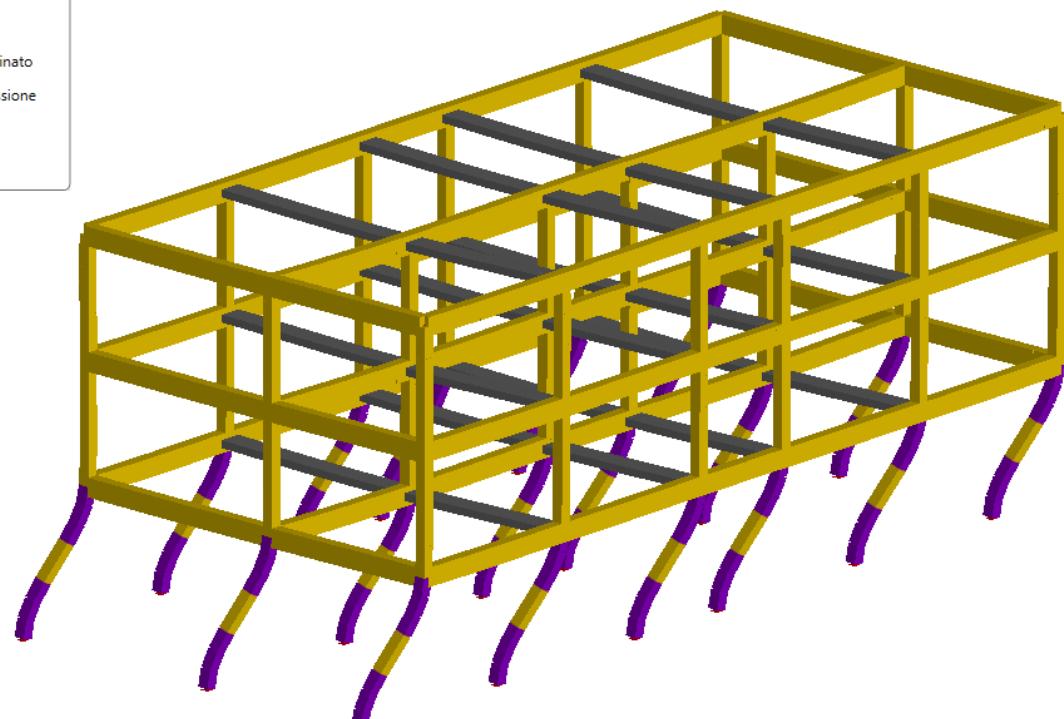


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura integra $\rightarrow T_{MAX} = 790.21 \text{ kN}$ (dir.Y)

	Nessuno
	Elastico
	Clz Fessurato
	Clz Plasticizzato
	Clz Schiacciamento Non Confinato
	Acciaio Snervato
	Clz Schiacciamento Confinato
	Acciaio Rottura Compressione
	Acciaio Rottura Trazione
	Collasso a taglio

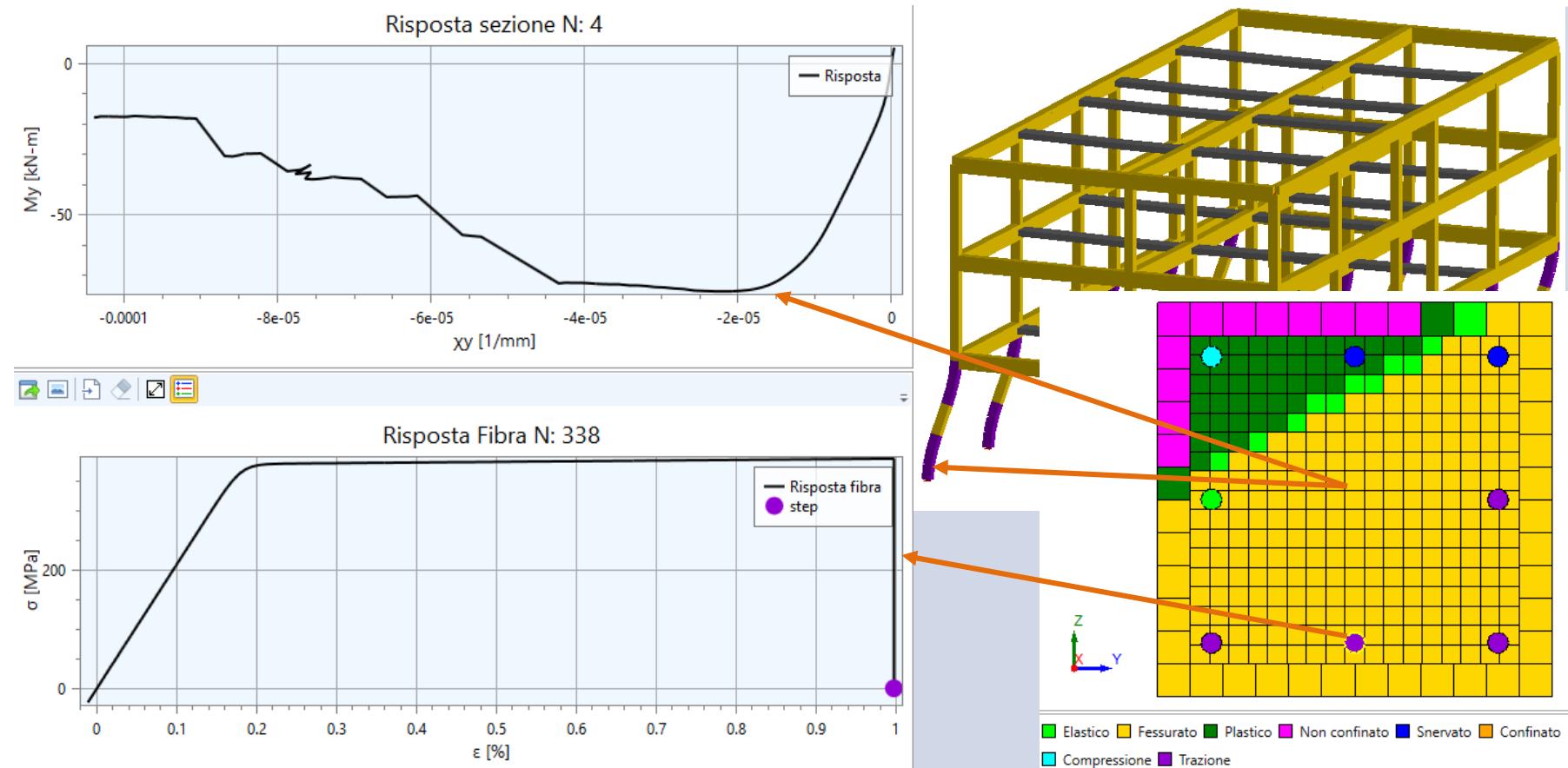
Meccanismo di piano (soft-story)



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

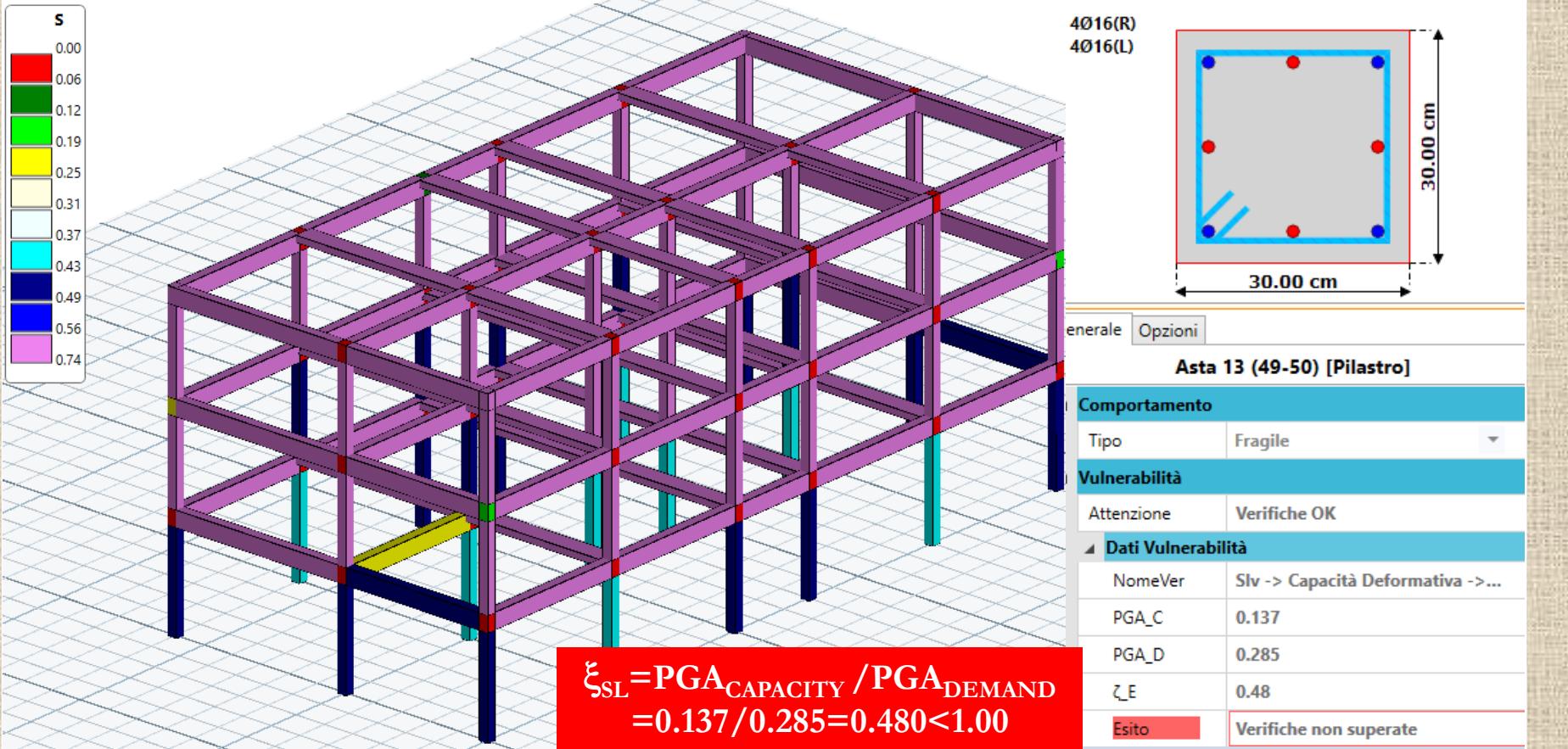
Struttura integra → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

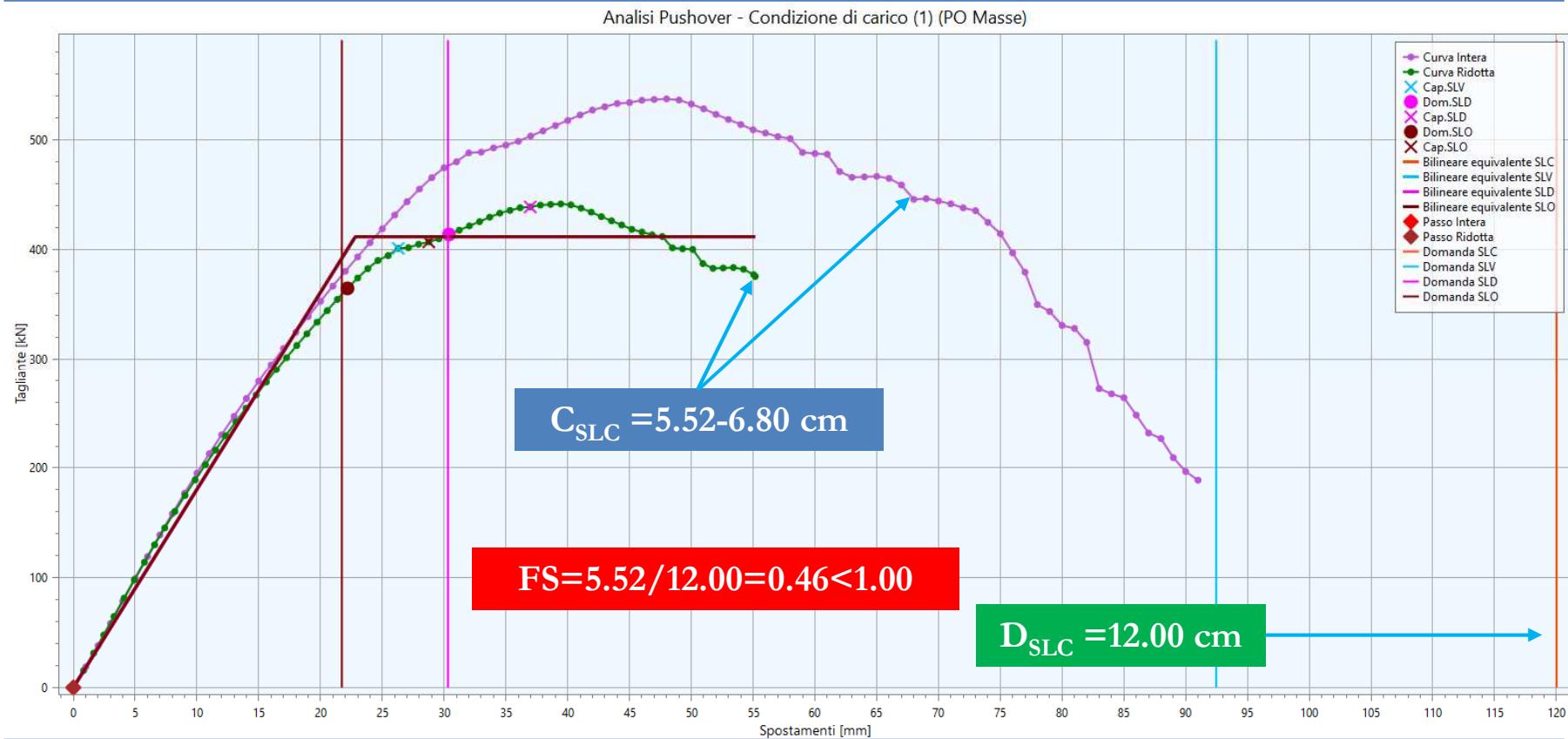
CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

Struttura integra → Verifiche ed indice di sicurezza $\xi_{SL} = 0.480$



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado per corrosione $\rightarrow T_{MAX} = 538.00 \text{ kN}$ (dir.X)

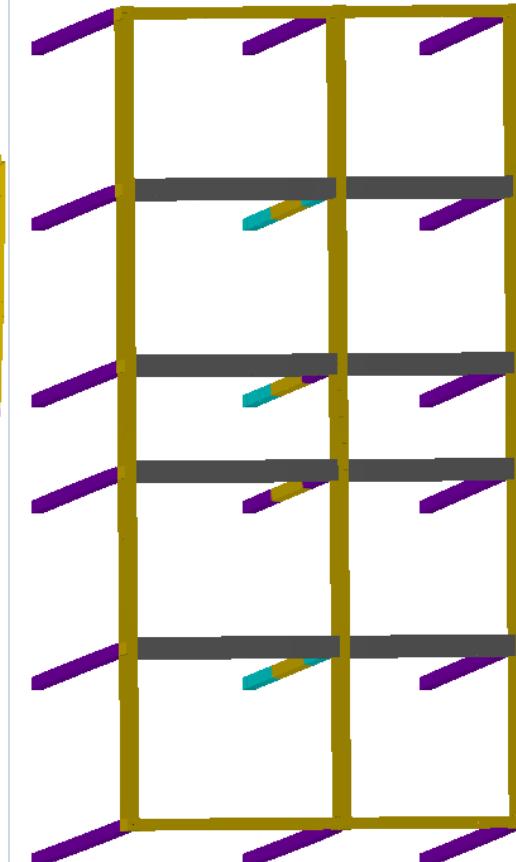
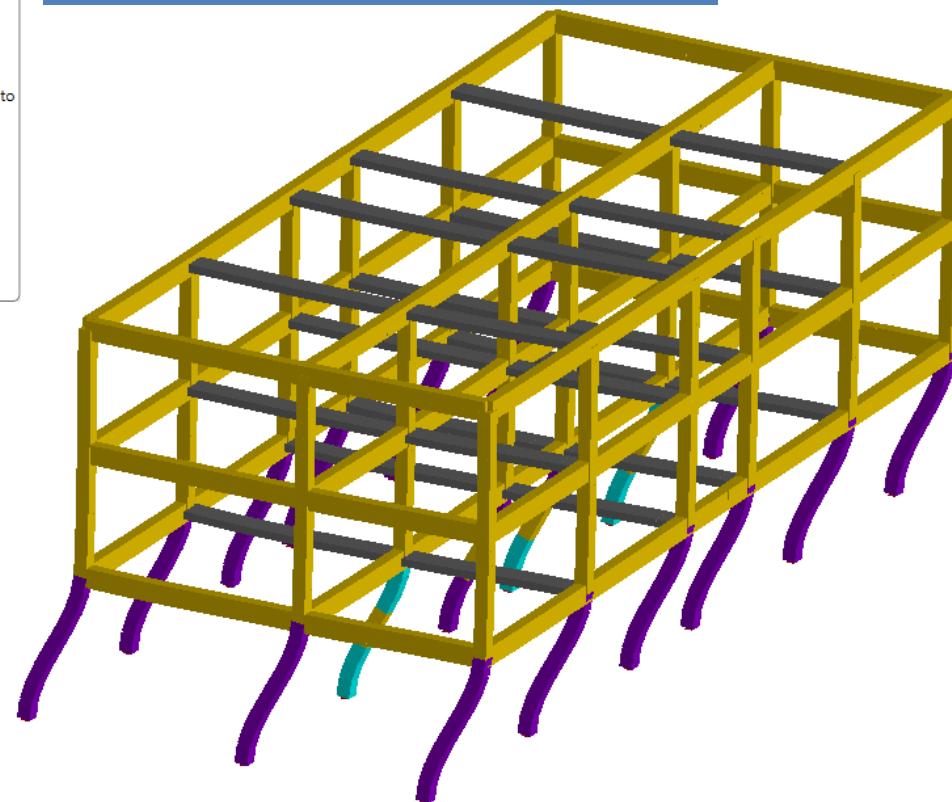


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado per corrosione $\rightarrow T_{MAX} = 538.00 \text{ kN}$ (dir.X)

Nessuno
Elastico
cls Fessurato
cls Plasticizzato
cls Schiacciamento Non Confinato
Acciaio Snervato
cls Schiacciamento Confinato
Acciaio Rottura Compressione
Acciaio Rottura Trazione
Collasso a taglio

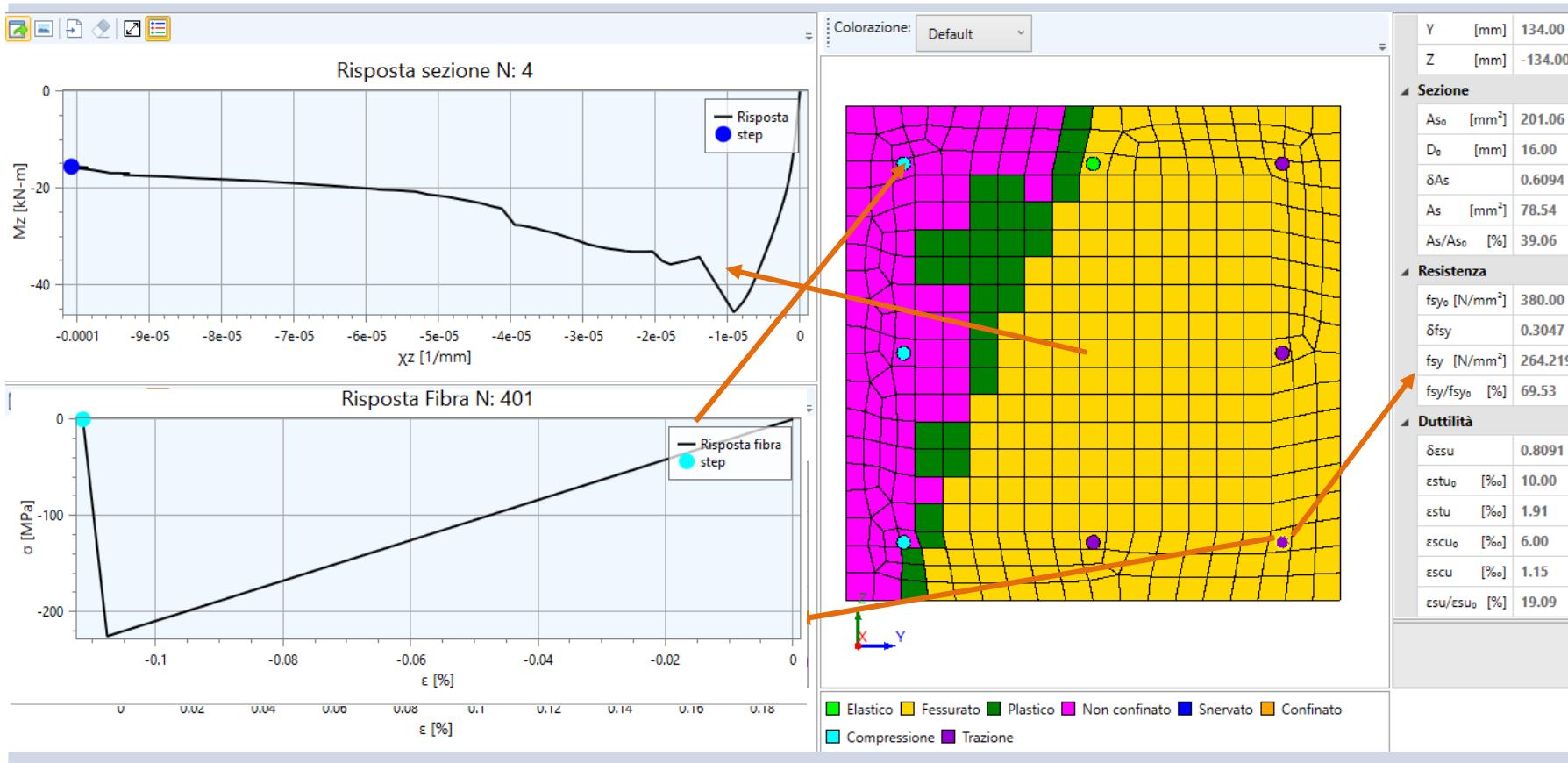
Meccanismo di piano (soft-story)



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

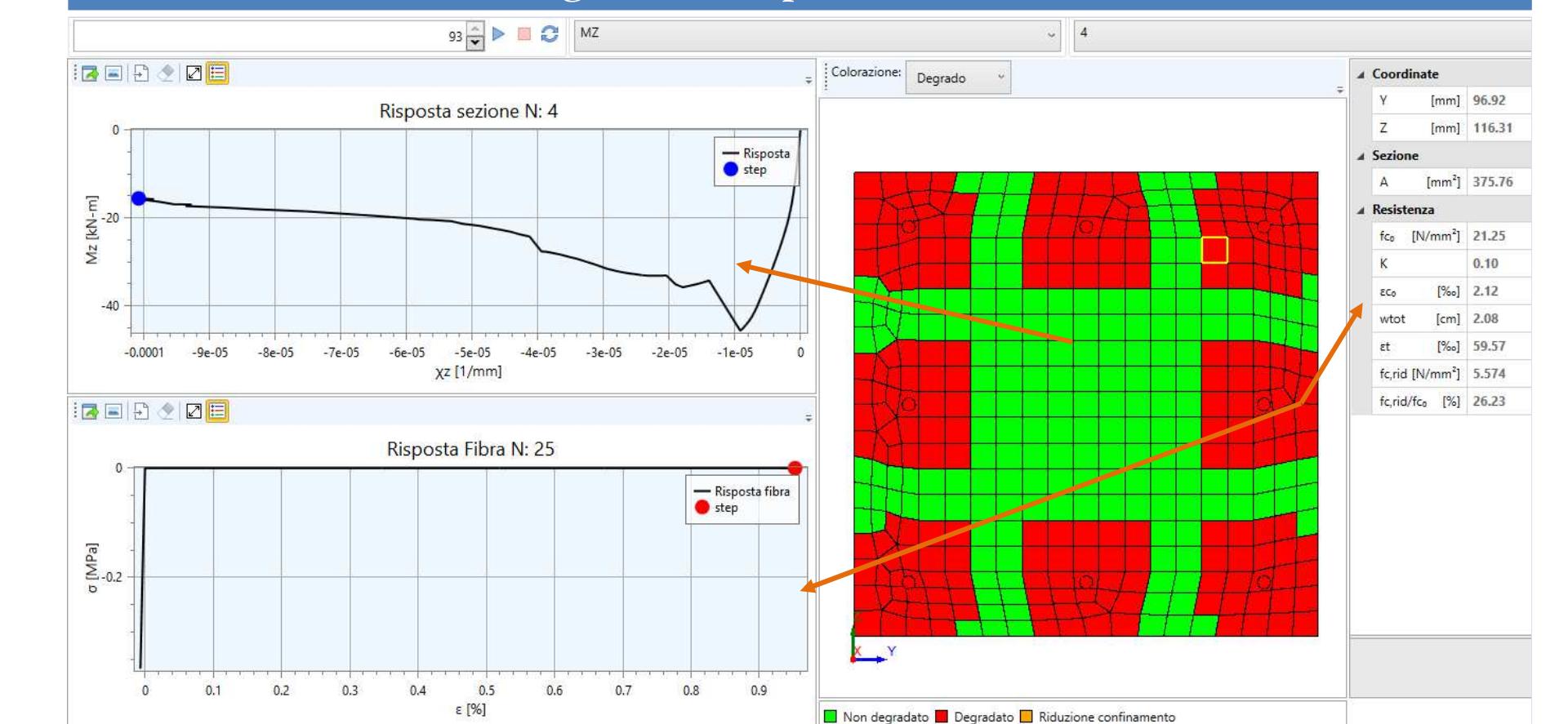
Struttura con degrado → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

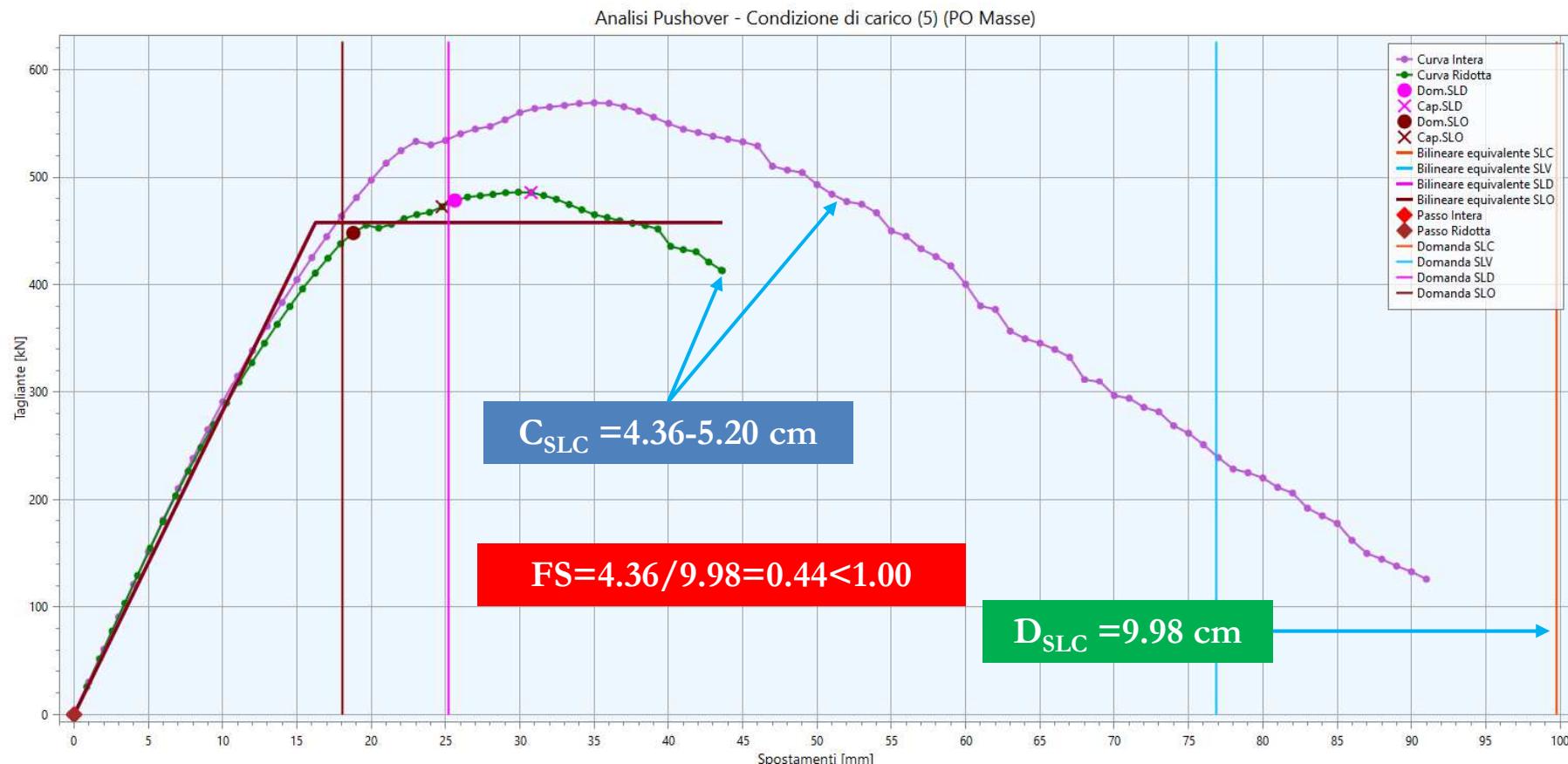
Struttura con degrado → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado per corrosione → $T_{MAX} = 569.00 \text{ kN}$ (dir.Y)

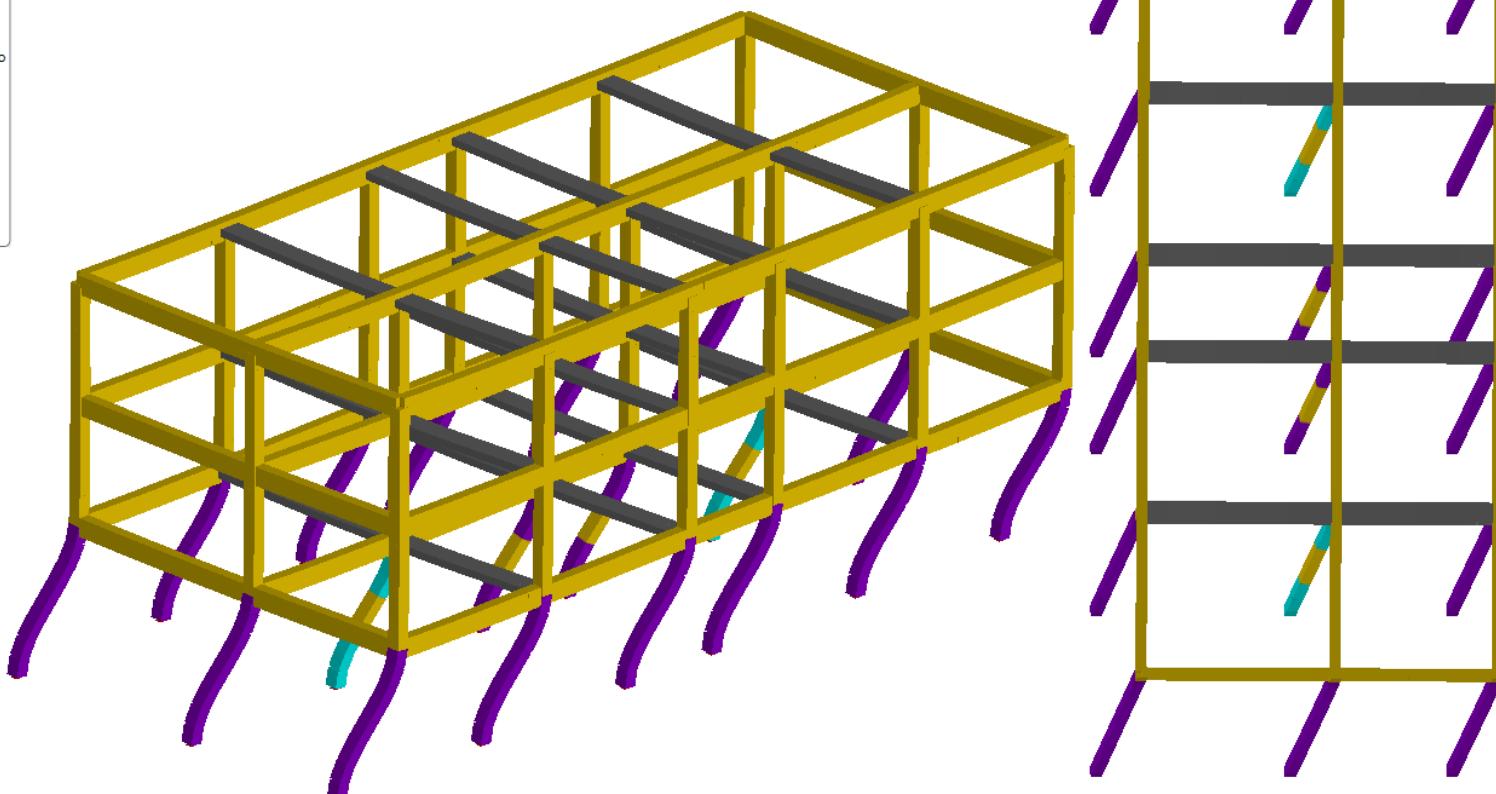


VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado per corrosione $\rightarrow T_{MAX} = 569.00 \text{ kN}$ (dir.Y)

Nessuno
Elastico
Clz Fessurato
Clz Plasticizzato
Clz Schiacciamento Non Confinato
Acciaio Snervato
Clz Schiacciamento Confinato
Acciaio Rottura Compressione
Acciaio Rottura Trazione
Collasso a taglio

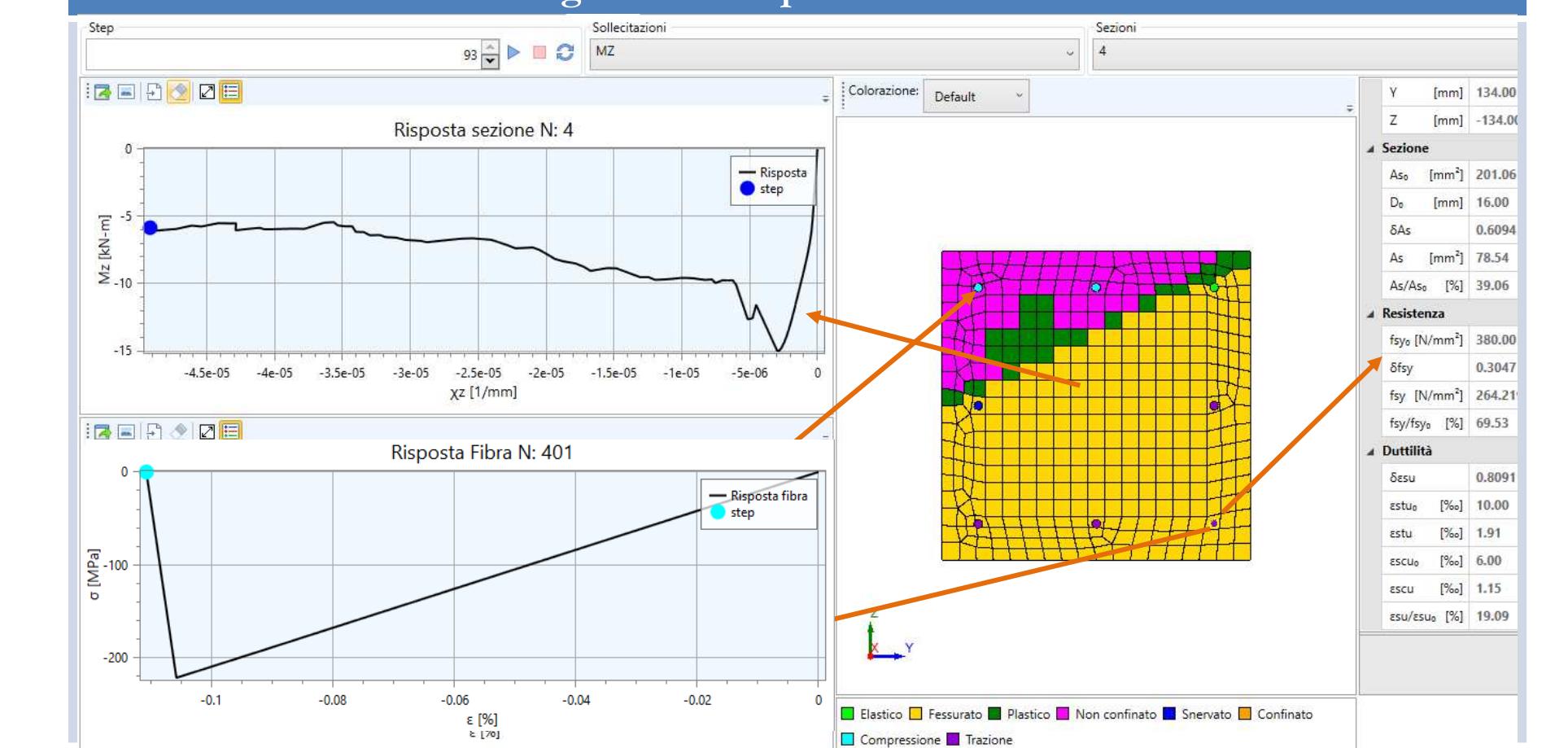
Meccanismo di piano (soft-story)



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICIO IN C.A.

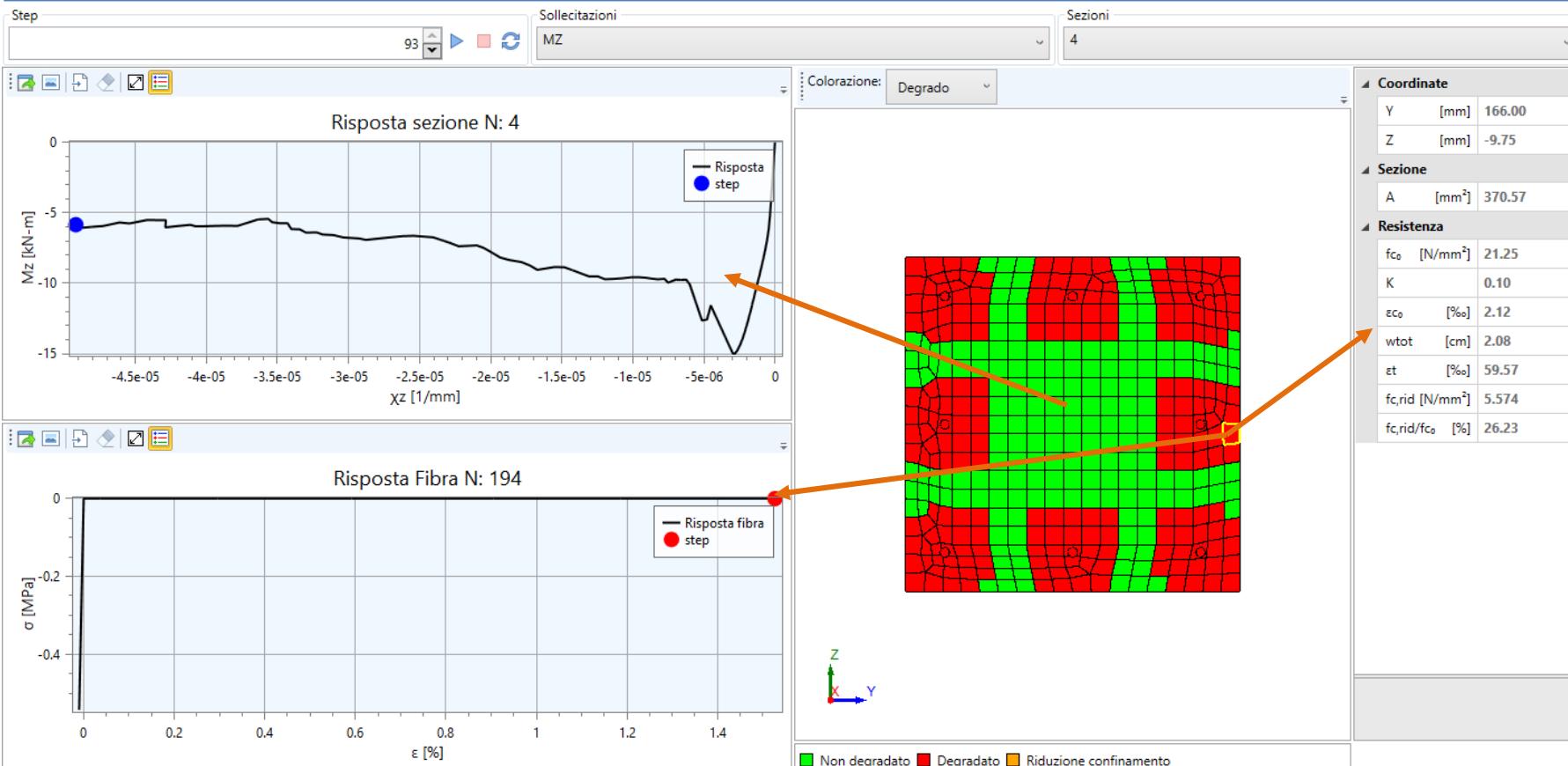
Struttura con degrado → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

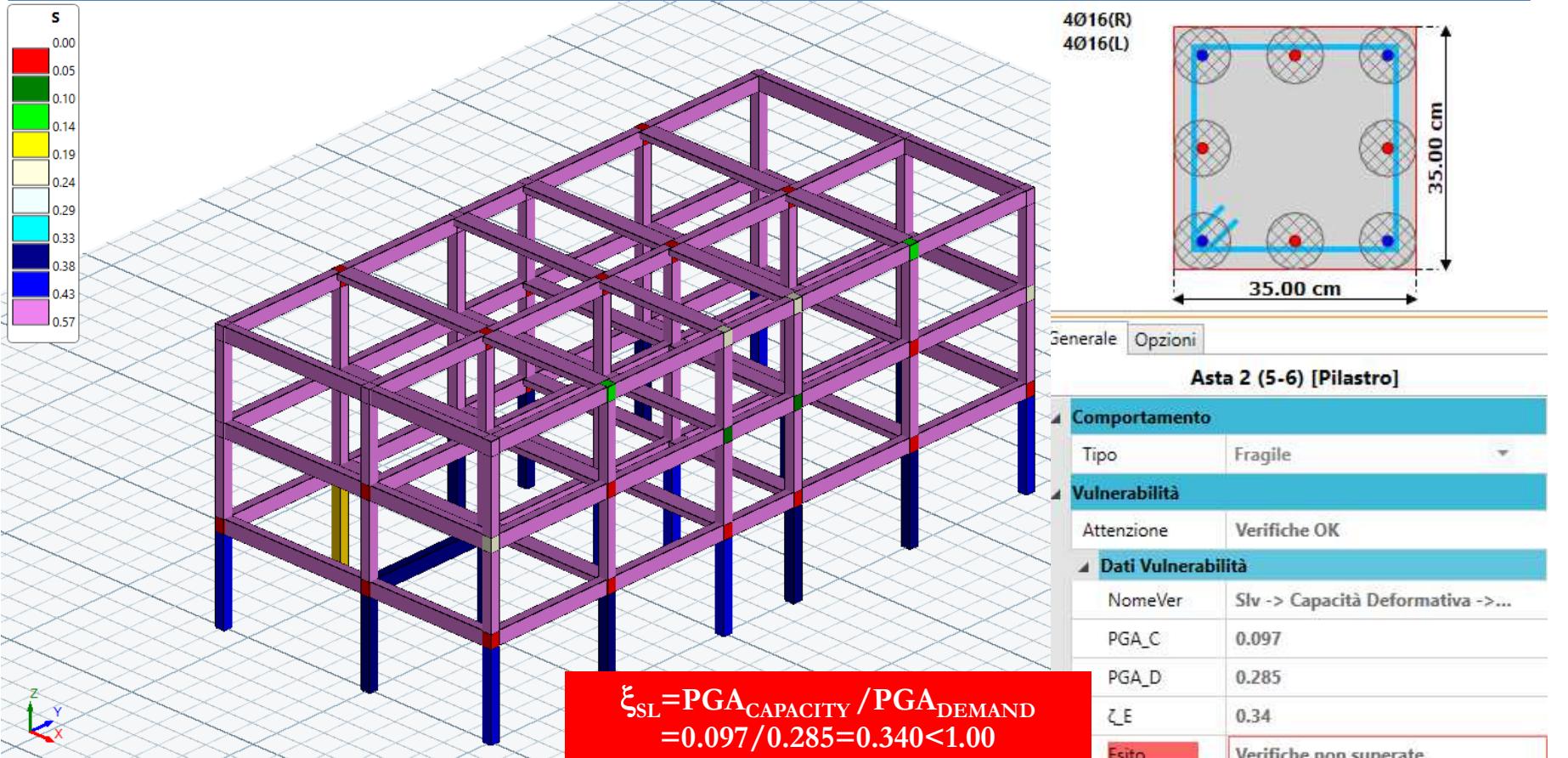
Struttura con degrado → Risposta non lineare della sezione



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

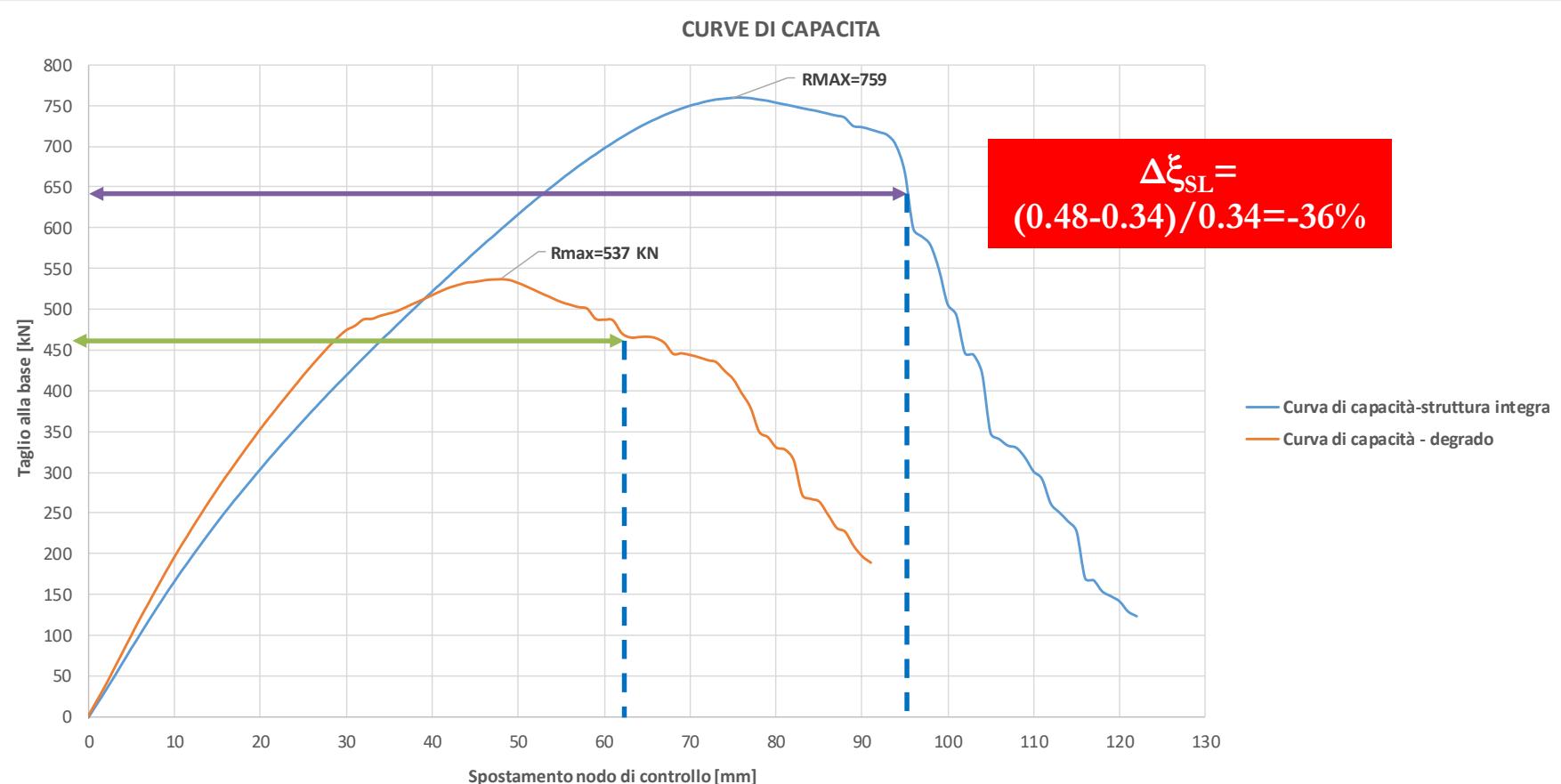
Struttura con degrado → Verifiche ed indice di sicurezza $\xi_{SL} = 0.340$



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado → Confronti direzione X



VULNERABILITA' DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO IN CONDIZIONI DI DEGRADO

CASO DI STUDIO – EDIFICO IN C.A.

Struttura con degrado → Confronti direzione Y

