

# DEGRADO NEXT

Software per la verifica di sezioni in c.a.  
in presenza di degrado da corrosione

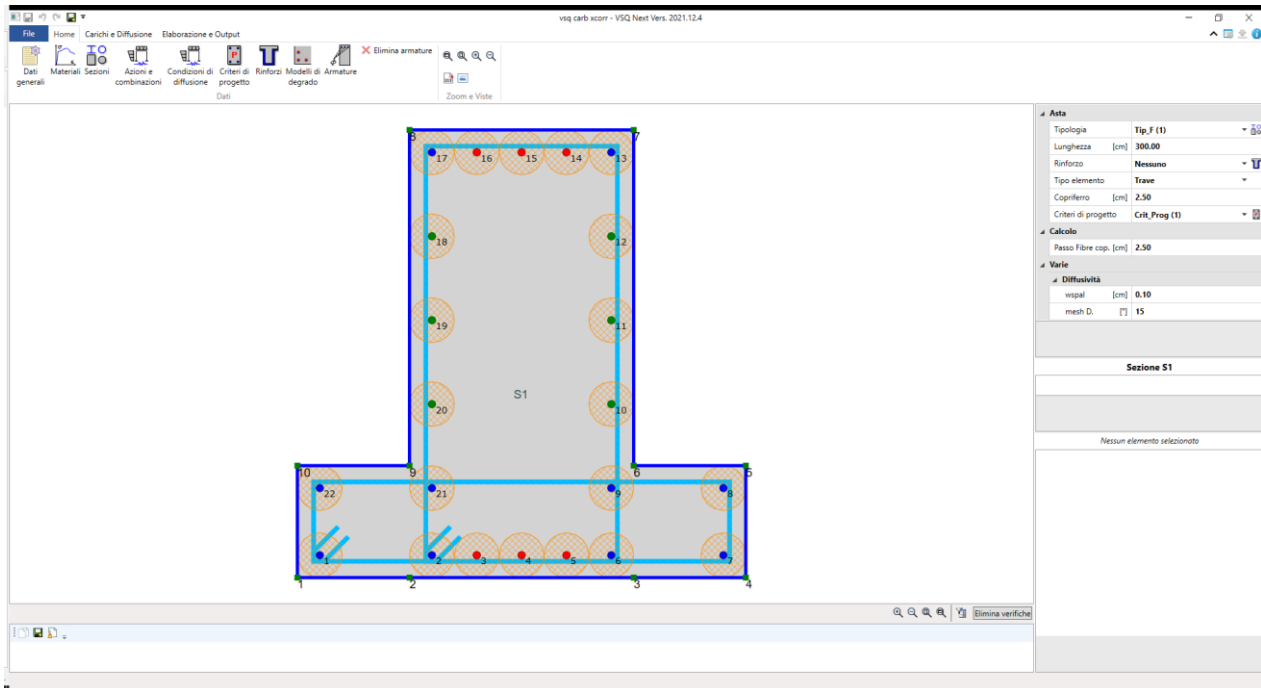




## Sommario

---

# 1 Introduzione



**Degrado Next** è il software dedicato alla verifica di sezioni in c.a. di **forma qualsiasi** in presenza di degrado. Consente di analizzare i seguenti tipi di degrado:

- Corrosione uniforme;
- Corrosione localizzata (pitting)
- Corrosione da cloruri;
- Corrosione da carbonatazione

Tutti i tipi di degrado consentono l'analisi della riduzione di sezione, resistenza e duttilità delle barre e la riduzione delle caratteristiche del calcestruzzo in prossimità delle barre. Lo studio dell'attacco da cloruri, così come la carbonatazione, viene effettuato in proiezione su un determinato intervallo temporale ed è possibile personalizzare il passo di analisi e gli anni, in modo da progettare la durabilità degli elementi in c.a. E' possibile inoltre considerare la presenza di rinforzi strutturali mediante camicie in c.a.

## Analisi

Il software elabora due diverse tipologie di analisi: diffusiva e meccanica. La prima serve a stabilire il grado di diffusione degli agenti degradanti all'interno della sezione (cloruri o CO<sub>2</sub>), la seconda consente di effettuare le verifiche considerando il degrado presente. Per l'analisi meccanica sarà possibile elaborare varie condizioni di carico, effettuando le verifiche strutturali richieste dalla norma.

## Output

I risultati delle varie elaborazioni possono essere sia visualizzati nell'ambiente grafico, sia lette in forma di relazione di calcolo. I risultati delle verifiche strutturali (ad es. coefficienti di sicurezza e sollecitazioni di

calcolo) sono rappresentati mediante colormap, scegliendo tra numerose opzioni utili ad approfondire il comportamento delle varie parti strutturali. La relazione di calcolo (esportabile nel nuovo formato docx) può essere personalizzata componendo i documenti secondo le più diverse esigenze, comprendendo anche relazione geotecnica e sulle fondazioni.

## 2 Ambiente principale




Il software è diviso in zone, ognuna con una funzione specifica.

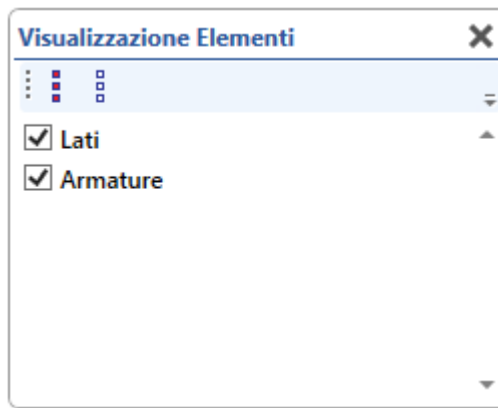


### Ambiente Principale

E' l'ambiente all'interno del quale è possibile selezionare ed editare le caratteristiche di diffusione sui singoli lati. Nella parte superiore dell'Ambiente principale vengono visualizzati i nomi dei progetti aperti e viene evidenziato il nome del progetto attuale.

Nella parte bassa dell' "Ambiente Principale" è presente una barra di comandi con le seguenti funzioni:

- **Strumento di misurazione** . Consente di misurare le distanze (assoluta e lungo i tre assi x, y e z) e gli angoli ( sui piani XY e XZ) fra due nodi selezionati;
- **Esporta la finestra corrente nel formato JPG** . Consente di esportare la finestra corrente nel formato JPG;
- **Impostazione di visualizzazione** . Consente di personalizzare le opzioni di visualizzazione. Cliccare sul corrispondente pulsante per visualizzare/nascondere la seguente finestra:



- **Esporta la finestra corrente nel formato DXF** . Consente di esportare la finestra corrente nel formato dxf.








## Barra Multifunzione

Nella parte superiore dell'Ambiente Principale è presente la "**Barra Multifunzione**" con i seguenti menù:

- **File.** Contiene le funzionalità per la gestione dei file (Nuovo, Apri, Salva, File recenti, Importazione da FataE);
- **Home.** Contiene l'accesso agli editor per la definizione in maniera centralizzata delle proprietà degli elementi dell'input (Dati generali, Materiali, Carichi predefiniti, ecc.);
- **Carichi e Diffusione.** Consente la definizione dei carichi e dei dati per la diffusione dei cloruri e carbonatazione;
- **Elaborazione e Output.** Consente l'esecuzione del calcolo e delle verifiche, la visualizzazione dei risultati di calcolo, l'elaborazione della relazione.

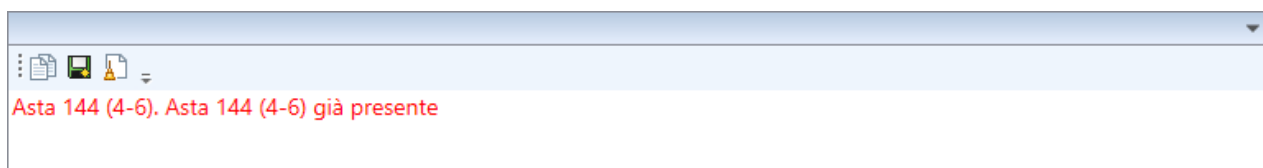
## Visualizzatore Proprietà

Sulla destra dell'Ambiente Principale è presente la "**Barra delle Proprietà**" attraverso cui è possibile inputare e/o modificare le proprietà degli oggetti selezionati:



<b>▲ Asta</b>	
Tipologia	Tip_F (1)  
Lunghezza [cm]	300.00
Rinforzo	Nessuno  
Tipo elemento	Trave 
Copriferro [cm]	2.50
Criteri di progetto	Crit_Prog (1)  
<b>▲ Calcolo</b>	
Passo Fibre cop. [cm]	2.50
<b>▲ Varie</b>	
<b>▲ Diffusività</b>	
wspal [cm]	0.10
mesh D. [°]	15
<b>Sezione S1</b>	
Nessun elemento selezionato	

## Area messaggi

Inferiormente all'Ambiente Principale è presente una zona destinata alla visualizzazione dei messaggi di errore forniti dal software:



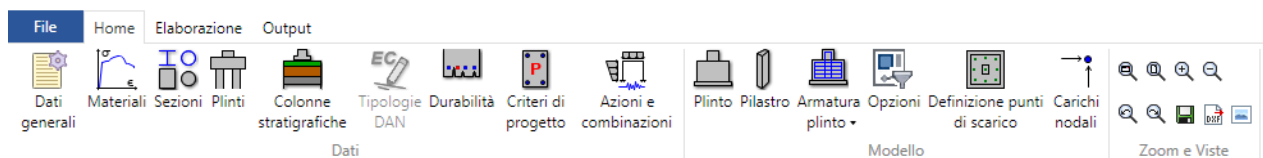
Nella parte superiore di essa è presente una barra dei comandi che consente di operare sui messaggi visualizzati.

- **Copia** . Copia i messaggi visualizzati.
- **Salva messaggi** . Salva i messaggi visualizzati.
- **Pulisci** . Cancella i messaggi visualizzati.

## 2.1 Barra multifunzione

Nella parte superiore dell'ambiente principale è presente la "**Barra Multifunzione**" contenente i seguenti menù di input:

- **File:** contiene le funzionalità per la gestione dei file **Degrado Next** (Nuovo, Apri, Salva, File recenti, Importazione da FataE);
- **Home:** contiene l'accesso agli editor di definizione delle varie proprietà degli elementi dell'input (Dati generali, Materiali, Carichi, ecc);
- **Elaborazione:** consente l'esecuzione del calcolo e delle verifiche;
- **Output:** contiene l'accesso alla visualizzazione dei risultati del calcolo, delle graficizzazioni, delle relazioni di calcolo, dei piani di manutenzione e dei computi dei materiali.



Nella parte superiore sinistra dell' Ambiente Principale è presente il menu di accesso rapido contenente le funzionalità per la gestione dei file e le operazioni di annullamento/ripristino delle operazioni eseguite:



- **Nuovo** . Crea un nuovo progetto;
- **Apri progetto** . Consente l'apertura di un progetto precedentemente creato;
- **Salva progetto** . Salva l'archivio aperto sovrascrivendo il file;
- **Salva progetto con nome** . Salva l'archivio in una posizione e con un nome diverso;
- **Chiudi progetto** . Chiude il progetto su cui si sta lavorando;
- **Annulla** . Annulla l'ultima operazione effettuata;
- **Ripeti** . Ripristina l'ultima operazione annullata.

Nella parte superiore destra dell'Ambiente Principale sono disponibili i pulsanti di accesso ad alcune funzionalità:



- **Riduci a icona barra multifunzione** . Riduce ad icona, nascondendola, la barra multifunzione.
- **Unità di misura applicazione** . Ambiente di gestione delle unità di misura delle varie grandezze.

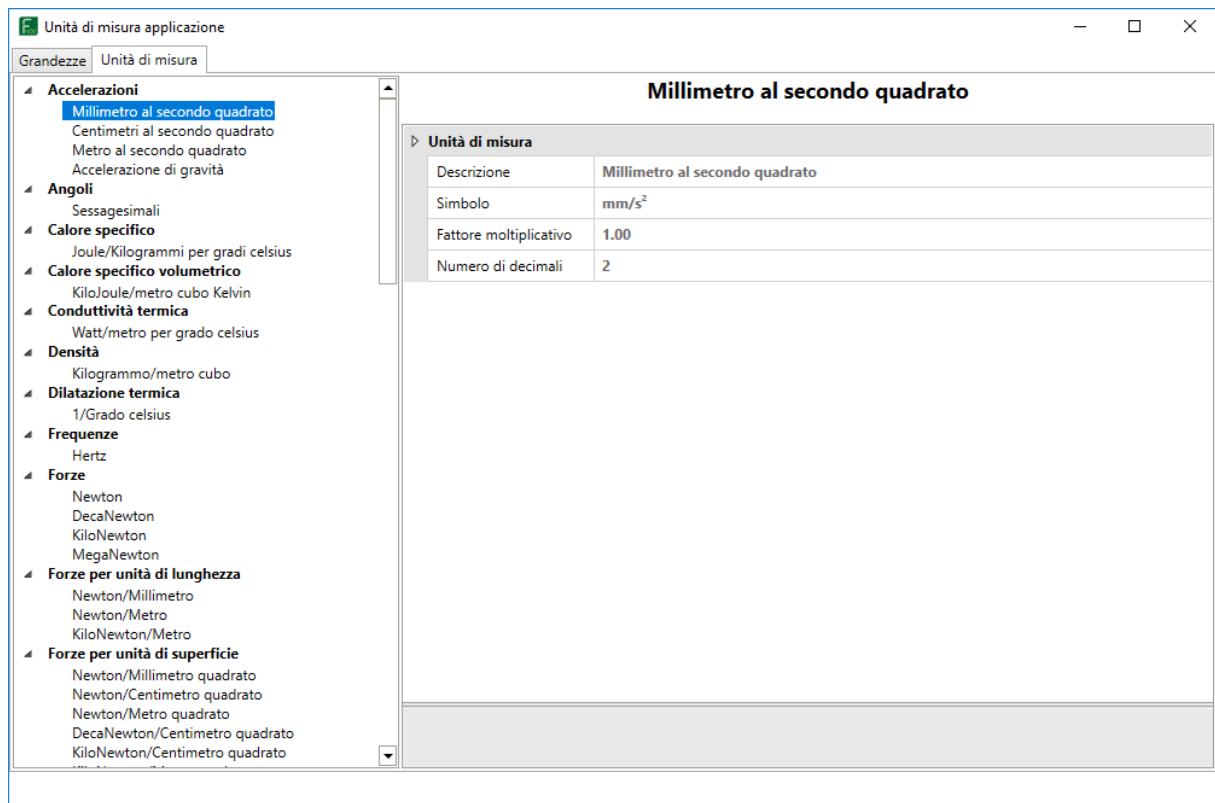



Unità di misura applicazione	
Grandezze   Unità di misura	
Grandezze	Unità di misura in uso
<b>Accelerazioni</b>	<b>Accelerazione di gravità (g)</b>
Angoli	Sessagesimali (°)
Calore specifico	Joule/Kilogrammi per gradi celsius (J/Kg°C)
Calore specifico volumetrico	Kilojoule/metro cubo Kelvin (kJ/m³K)
Conducibilità termica	Watt/metro per grado celsius (W/m°C)
Densità	Kilogrammo/metro cubo (Kg/m³)
Dilatazione termica	1/Grado celsius (1/°C)
Frequenze	Hertz (Hz)
Forze	KiloNewton (kN)
Forze per unità di lunghezza	KiloNewton/Metro (kN/m)
Forze per unità di superficie	KiloNewton/Metro quadrato (kN/m²)
Forze per unità di volume	KiloNewton/Metro cubo (kN/m³)
Inerzie	Millimetro alla quarta (mm⁴)
Inerzie massa	Kilogrammo per metro al quadrato (Kgm²)
Inverso velocità	Secondi al millimetro (sec/mm)
Lunghezze	Centimetro (cm)
Lunghezze Acciaio	Millimetro (mm)
Lunghezze per unità di lunghezza	Centimetro su metro (cm/m)
Masse	Kilogrammo (Kg)

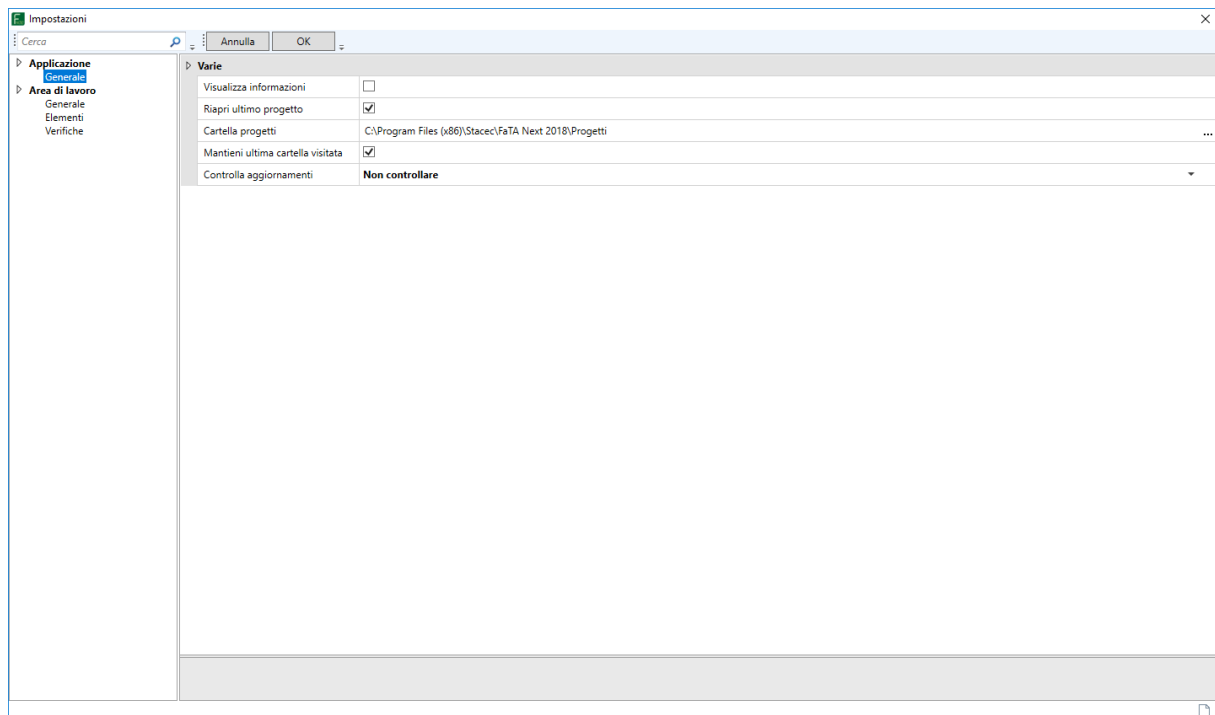
Nella finestra **"Grandezze"** si opera la scelta delle unità di misura per le varie grandezze. Per operare una scelta cliccare sulla riga della grandezza e poi sulla corrispondente unità di misura:

Unità di misura applicazione	
Grandezze   Unità di misura	
Grandezze	Unità di misura in uso
<b>Accelerazioni</b>	<b>Accelerazione di gravità (g)</b>
Angoli	Millimetro al secondo quadrato (mm/s²)
Calore specifico	Centimetri al secondo quadrato (cm/s²)
Calore specifico volumetrico	Metro al secondo quadrato (m/s²)
Conducibilità termica	Accelerazione di gravità (g)
Densità	Watt/metro per grado celsius (W/m°C)
Dilatazione termica	Kilogrammo/metro cubo (Kg/m³)
Frequenze	1/Grado celsius (1/°C)
Forze	Hertz (Hz)
Forze per unità di lunghezza	KiloNewton (kN)
Forze per unità di superficie	KiloNewton/Metro (kN/m)
Forze per unità di volume	KiloNewton/Metro quadrato (kN/m²)
Inerzie	KiloNewton/Metro cubo (kN/m³)
Inerzie massa	Millimetro alla quarta (mm⁴)
Inverso velocità	Kilogrammo per metro al quadrato (Kgm²)
Lunghezze	Secondi al millimetro (sec/mm)
Lunghezze Acciaio	Centimetro (cm)
Lunghezze per unità di lunghezza	Millimetro (mm)
Masse	Centimetro su metro (cm/m)
	Kilogrammo (Kg)

Nella interfaccia **"Unità di misura"** si hanno informazioni dettagliate sulle varie unità di misura.



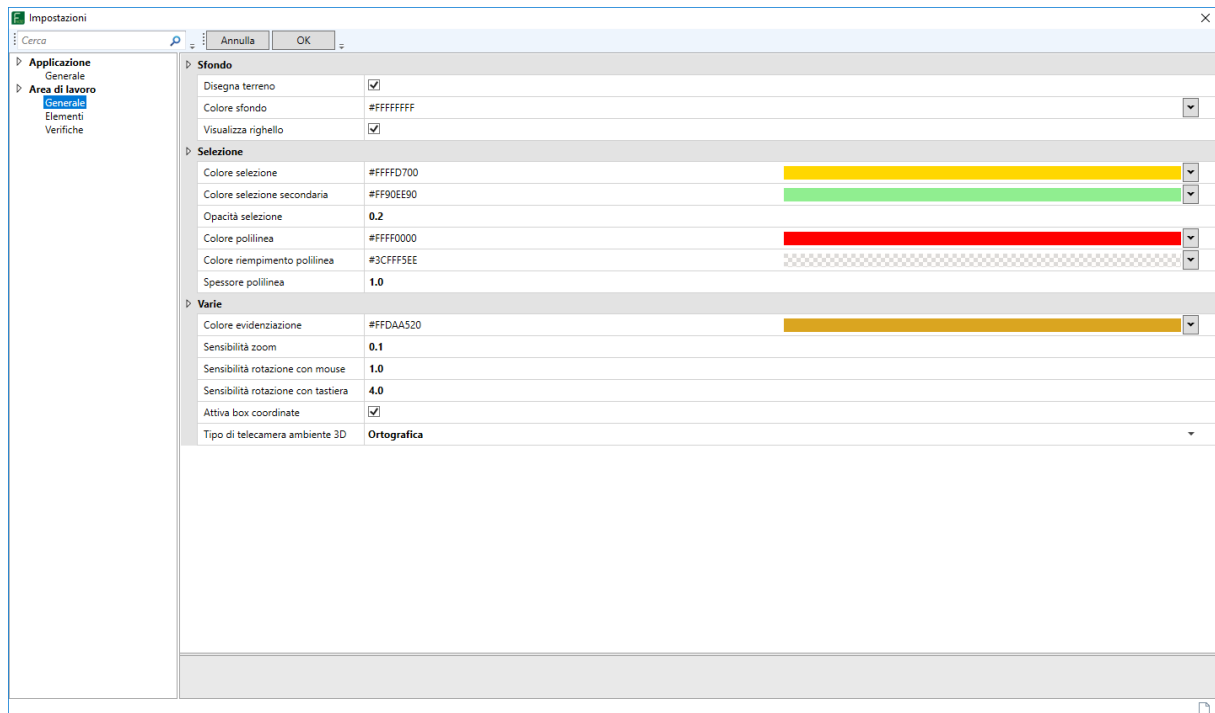
- **Impostazioni** . Consente di definire le impostazioni generali. Nella pagina "Applicazione – Generale" è possibile personalizzare la gestione delle preferenze all'avvio del programma.



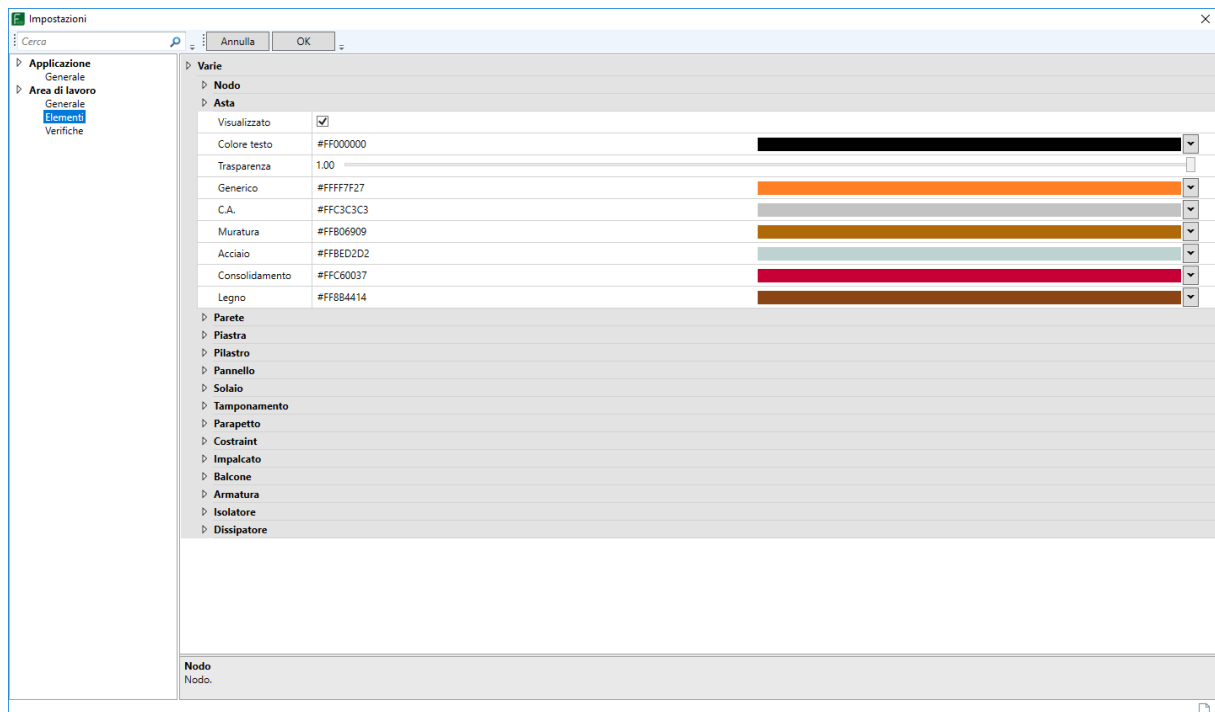
Nella pagina "Area di lavoro – Generale" è possibile personalizzare:

- colori e personalizzazioni dei vari ambienti di input;

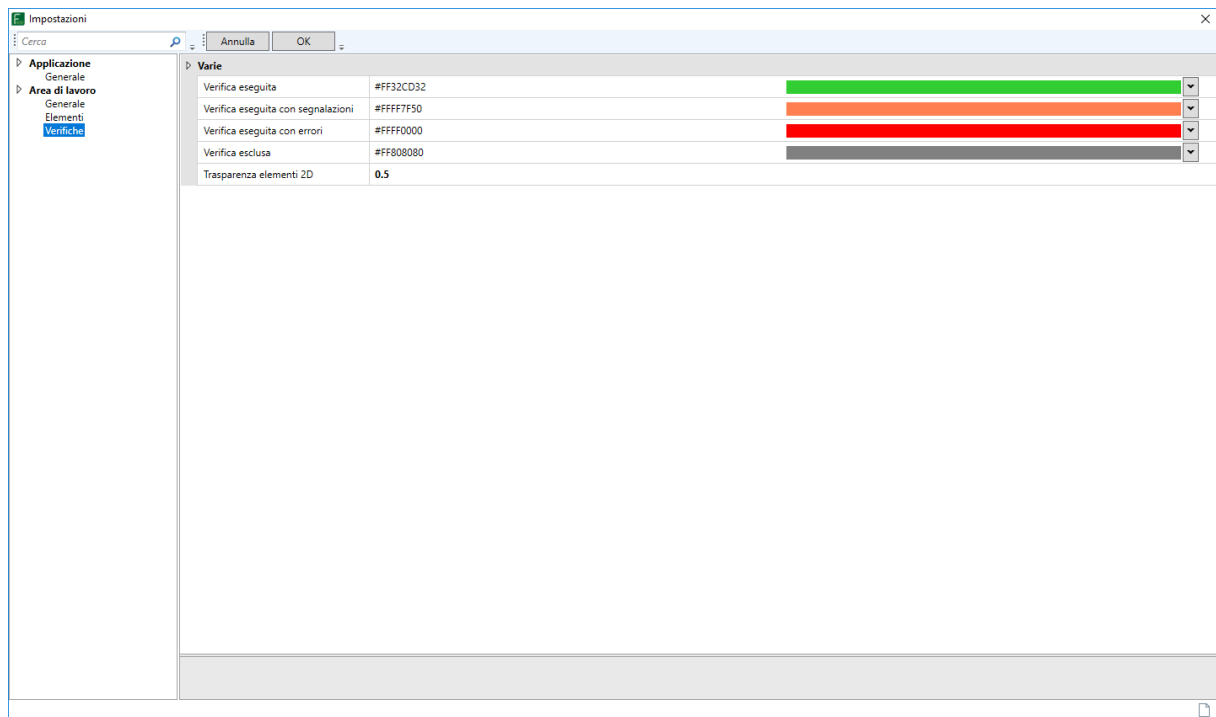
- colori e opacità degli elementi selezionati;
- sensibilità di zoom del mouse e della tastiera.



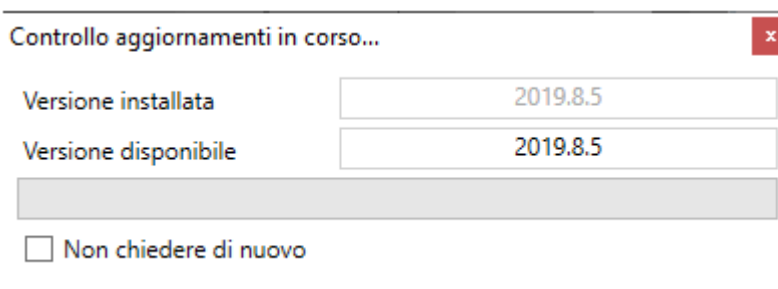
Nella pagina "Area di lavoro – Elementi" è possibile personalizzare i parametri relativi alla visualizzazione degli elementi strutturali.



Nella pagina "Area di lavoro – Verifiche" è possibile personalizzare i colori con i quali rappresentare visivamente gli esiti delle verifiche degli elementi strutturali.



- **Controllo aggiornamenti** . Controlla se in rete è disponibile una release aggiornata del software.



- **Help** . Consente di consultare il manuale d'uso del programma.
- **Informazioni su** . Fornisce informazioni sulla release corrente e sul titolare della licenza del software.

### 2.1.1 File

E' il menù di gestione dei file creati e utilizzati in **Degrado Next**. L'estensione propria utilizzata è identificata con il codice ".plt".

I comandi disponibili sono:

- **Nuovo progetto.** Crea un nuovo progetto;
- **Apri progetto.** Consente l'apertura di un progetto precedentemente creato;
- **Progetti recenti.** Visualizza un elenco degli ultimi progetti a cui si è lavorato con la possibilità di visualizzare l'orario di apertura e, passando sopra il nome con il mouse, l'anteprima del file e le informazioni principali del progetto. Cliccando su uno di essi si ha la possibilità di aprire direttamente il progetto stesso;
- **Salva progetto.** Salva l'archivio aperto sovrascrivendo il file;

- **Salva progetto con nome.** Salva l'archivio in una posizione e con un nome diverso;
- **Chiudi progetto.** Chiude il progetto su cui si sta lavorando;
- **Esci.** Termina l'esecuzione di **Degrado Next**.

## 2.1.2 Home

E' il menu di gestione di tutti gli editor utili per la definizione in maniera centralizzata delle proprietà degli elementi dell'input (Dati generali, Materiali, Carichi predefiniti, ecc);



Il menu contiene i seguenti pulsanti:

**Dati generali**

Avvia la finestra per l'input dei dati generali.

**Materiali**

Avvia la finestra per l'input dei materiali.

**Azioni e combinazioni e analisi**

Avvia la finestra per l'input delle azioni, delle combinazioni e delle analisi.

**Carichi predefiniti**

Avvia la finestra per l'input dei carichi predefiniti.

**Fattori di rigidezza predefiniti**

Avvia la finestra per l'input delle tipologie di Fattore di rigidezza.

**Livelli**

Avvia la finestra per l'input dei Livelli.

**Tipologie Durabilità**

Avvia la finestra per l'input delle Tipologie durabilità.

**Tipologie consolidamenti**

Avvia la finestra per l'input delle Tipologie dei consolidamenti.

**Colonne stratigrafiche**

Avvia la finestra per l'input delle colonne stratigrafiche.

### Dati spinte terreno pareti

Avvia la finestra per l'input delle tipologie di spinta del terreno sulle pareti.

### Editor Criteri di progetto

Avvia la finestra per l'input dei criteri di progetto.

### Importazione Dati

Avvia la finestra per l'Importazione Dati.

### Editor Tipologie profilati

Avvia la finestra per l'input delle Tipologie Profilati.

### Editor Tipologie Solai

Avvia la finestra per l'input delle tipologie solai.

### Editor Tipologie Tamponamenti

Avvia la finestra per l'input delle tipologie dei tamponamenti.

### Editor Mezzi di unione

Avvia la finestra per l'input delle tipologie dei mezzi di unione.

### Editor Tipologie DAN

Avvia la finestra per l'input delle tipologie DAN.

### Editor Layers

Avvia la finestra per l'input dei layers.

#### 2.1.2.1 Dati Generali

### Dati generali

Consente di definire i parametri generali della struttura (Intestazioni, parametri strutturali, parametri relativi agli spettri, al calcolo ed alle verifiche). Alla pressione del pulsante **"Dati generali"** viene visualizzato il seguente ambiente di input:

Sulla parte superiore dell'ambiente "Dati generali" sono presenti i seguenti pulsanti:

- Il pulsante **"Annulla"** chiude la finestra "Dati generali" annullando tutte le modifiche apportate ai parametri della stessa;
- La pressione del pulsante **"Ok"** comporta la conferma della modifiche apportate ai parametri della finestra "Dati generali" ma anche la necessità di ricalcolare la struttura.

Nell'ambiente "Dati Generali" i parametri di input sono organizzati per argomenti.

### Intestazione

Nella pagina **"Intestazione"** sono riportati i dati di input inerenti alle informazioni e la descrizione dell'intervento progettuale. I vari parametri verranno utilizzati nell'intestazione della relazione di calcolo e dei disegni esecutivi.

The screenshot shows a software window titled "Dati generali". At the top, there is a search bar with the text "Cerca", and two buttons: "Annulla" and "OK". On the left side, there is a tree view with the following structure:

- Intestazione (highlighted with a blue background)
  - Intestazione (with a yellow warning icon)
  - Committente (with a yellow warning icon)
  - Progettista architettonico (with a yellow warning icon)
  - Progettista strutturale (with a yellow warning icon)
  - Direttore dei lavori (with a yellow warning icon)
- Struttura
  - Generale
- Verifiche
  - Verifiche

The main area of the window is titled "Intestazione" and contains a section labeled "Varie" with the following fields:

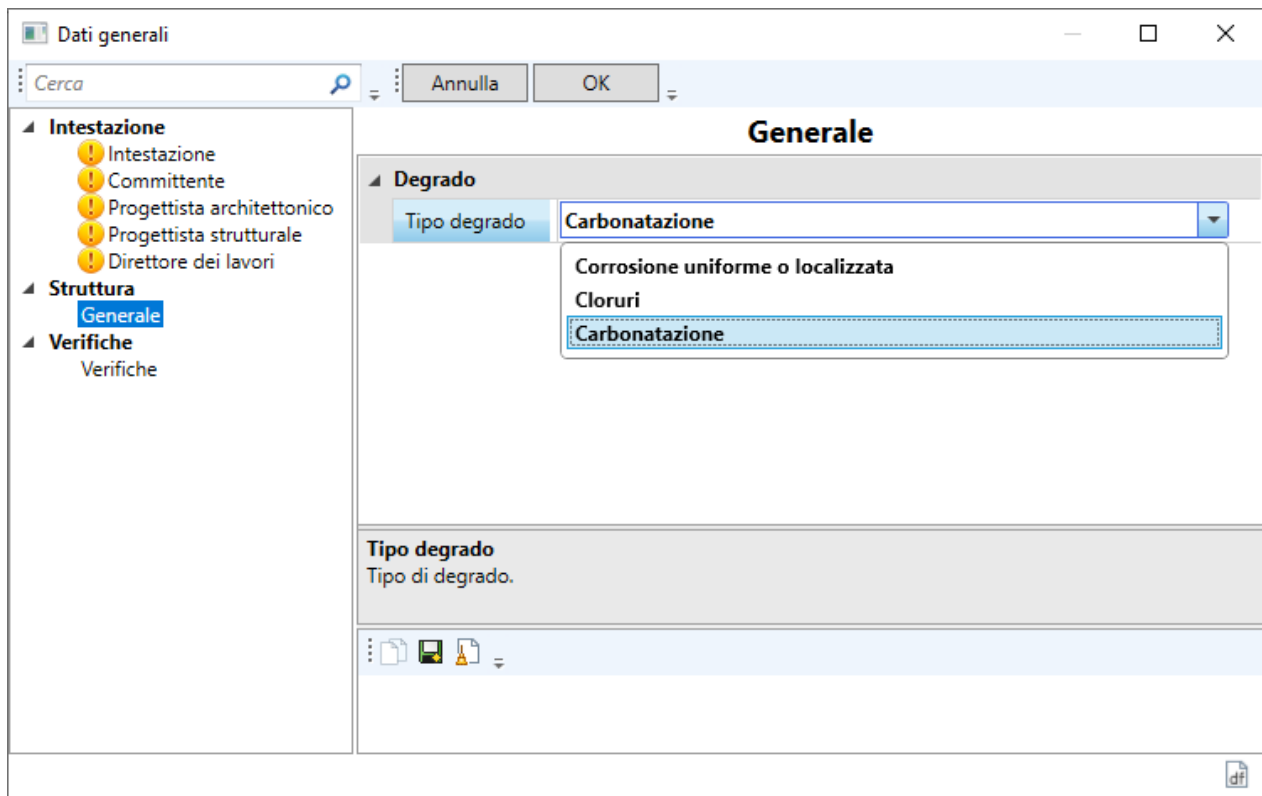
Provincia	
Comune	
Oggetto	
Data	08/04/2022
Immagine	Scegliere un file

At the bottom of the window, there are icons for file operations (new, open, save, print) and a "df" icon.

Le altre pagine della sezione contengono i dati delle figure professionali coinvolte, per le quali risulta superfluo ogni commento.

### Struttura/Generale

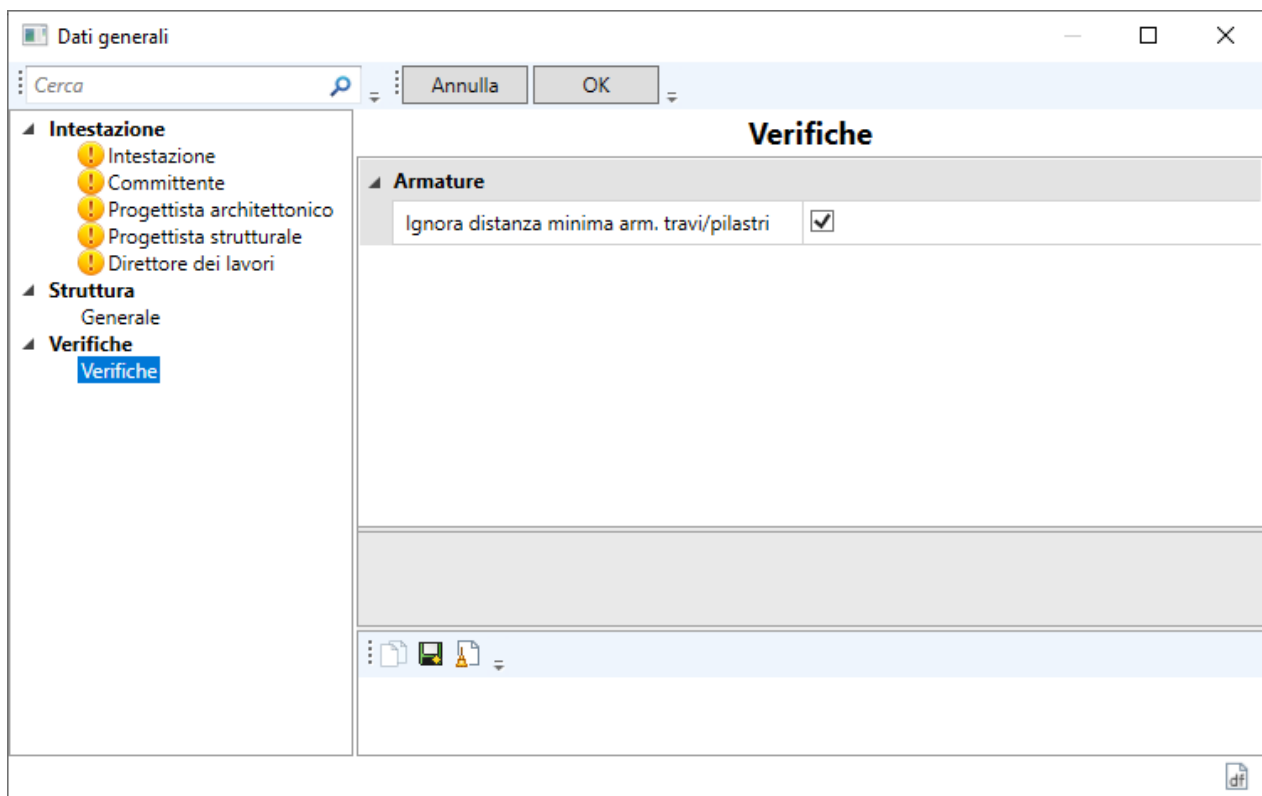
La pagina **"Struttura/Generale"** contiene, come unico parametro, il tipo di degrado:



Questo parametro consente di impostare sia il tipo di analisi diffusiva da eseguire in modo da filtrare le scelte possibili nella definizione dei "Modelli di degrado". Alla modifica di questo parametro verranno automaticamente aggiornati i modelli di degrado precedentemente definiti.

### Verifiche

In questa sezione sarà possibile attivare o disattivare il controllo sulla distanza minima di interfero.





### 2.1.2.2 Materiali



Consente di definire i materiali degli elementi strutturali relativi all'archivio. Alla pressione del pulsante **"Materiali"** viene aperta e visualizzato l'ambiente "Editor Materiali" in cui è possibile definire le caratteristiche dei seguenti materiali:

- Acciaio per CA
- Acciaio per carpenterie
- Calcestruzzo
- Calcestruzzo alleggerito

Varie	
Nome materiale	Barre (1)
Utente	<input type="checkbox"/>
Esistente	<input type="checkbox"/>
Modulo elastico (E) [N/mm <sup>2</sup> ]	210000.00
Tipo acciaio	B450C
Coefficiente parziale di sicurezza (Ym)	1.15
Modello di calcolo	Incrudente

Resistenze	
Tensione caratteristica di snervamento (fyk) [N/mm <sup>2</sup> ]	450.00
Tensione caratteristica di rottura (ftk) [N/mm <sup>2</sup> ]	540.00
Resistenza di calcolo (fd) SLU [N/mm <sup>2</sup> ]	391.304

Nella parte superiore della finestra "Materiali" sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Nuovo**: da utilizzare per aggiungere una nuova tipologia di materiale selezionando un tipo di materiale dall'elenco ad albero;
- **Elimina**: dopo la selezione di un materiale ha la funzione di eliminare l'elemento selezionato;
- **Duplica**: ha la funzione di duplicare il materiale selezionato creandone uno nuovo con le stesse caratteristiche;
- **Pulisci**: elimina tutte le tipologie di materiali non utilizzate nel modello fra quelle presenti nella lista (ad esclusione della prima che è di sistema);
- **Annulla**: chiude la presente finestra annullando tutte le modifiche in essa apportate;
- **OK**: chiude l'ambiente di definizione delle tipologie materiali confermando tutte le modifiche effettuate.

Per tutti i tipi di materiale sono presenti alcuni campi che hanno significato comune:

- **Nome materiale:** nome con il quale identificare il materiale aggiunto;
- **Utente:** se selezionato consente di definire un materiale assegnando ogni valore personalizzato;
- **Esistente:** selezionare per materiale esistente.

## Acciaio per CA

Materiali			
Cerca		Nuovo	Elimina
		Duplica	Pulisci
		Annulla	OK

**Acciaio per CA**

- Acciaio per CA (1)
- Acciaio per carpenterie
  - Acciaio per carpenterie (1)
- Calcestruzzo
  - Calcestruzzo (1)
- Calcestruzzo alleggerito
  - Calcestruzzo alleggerito (1)
- Legno
  - Legno (1)
- Fibre
  - Fibre (1)
- Generico isotropo
  - Generico isotropo (1)

### Acciaio per CA (1)

Acciaio per CA

**Varie**

Nome materiale	Acciaio per CA (1)		
Utente	<input type="checkbox"/>		
Esistente	<input type="checkbox"/>		
Modulo elastico (E)	[N/mm <sup>2</sup> ]	210000.00	
Tipo acciaio		B450C	
Coefficiente parziale di sicurezza (Ym)		1.15	
Modello di calcolo		Incrudente	

**Resistenze**

Tensione caratteristica di snervamento (fyk) [N/mm <sup>2</sup> ]	450.00
Tensione caratteristica di rottura (ftk) [N/mm <sup>2</sup> ]	540.00
Resistenza di calcolo (fd) SLU [N/mm <sup>2</sup> ]	391.304
Resistenza di calcolo (fd) SLE [N/mm <sup>2</sup> ]	391.304
Resistenza di calcolo (fd) SLD [N/mm <sup>2</sup> ]	450.00

**Deformazioni**

E ud	[%]	1.00
------	-----	------

**Analisi non lineare**

Modello di calcolo

b	0.01
Ro	20.00
a1	18.50
a2	0.15

Nella pagina materiale **"Acciaio per CA"** è possibile definire i seguenti parametri:

- **Aderenza migliorata.** Selezionare se le barre esistenti sono barre ad aderenza migliorata (editabile solo se campo "Utente" e\o il campo "Esistente" selezionato\i);

- **Incrudente.** Selezionare nel caso di modello di calcolo di tipo "incrudente" (editabile solo se campo "Utente" e/o il campo "Esistente" selezionato\i);
- **Modulo elastico.** Modulo elastico del materiale (editabile solo se campo "Utente" e/o il campo "Esistente" selezionato\i);
- **Tipo acciaio.** Nomenclatura da normativa dell'acciaio da c.a. (campo visibile ed editabile se il campo "Utente" risulta non selezionato);
- **Fattore di confidenza (FC).** Valore da assegnare al fattore di confidenza in funzione del Livello di conoscenza (visibile solo per campo "Esistente" selezionato).
- **Coefficiente parziale di sicurezza (Ym).** Coefficiente parziale di sicurezza del materiale (utilizzato nelle verifiche);
- **Modello di calcolo.** Modello tensione-deformazione per l'implementazione del comportamento del materiale (è possibile scegliere fra "Incrudente" e "Non incrudente");
- **Tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk}$ .** Resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio da calcestruzzo armato;
- **Tensione caratteristica di rottura  $f_{tk}$ .** Resistenza caratteristica di rottura dell'acciaio da calcestruzzo armato;
- **Resistenza di calcolo (fd) SLU :** Resistenza di calcolo dell'acciaio in barre da adottare per le verifiche relative agli SLU, SLV ed SLC;
- **Resistenza di calcolo (fd) SLE :** Resistenza di calcolo dell'acciaio in barre da adottare per le verifiche agli SLE;
- **Resistenza di calcolo (fd) SLD :** Resistenza di calcolo dell'acciaio in barre da adottare per le verifiche agli SLD;
- **$\epsilon_{ud}$ .** Deformazione ultima di calcolo;
- **Modello di calcolo** (analisi non lineare). Modello di calcolo da adottare per analisi non lineare (a scelta fra "Bilineare finito con incrudimento" e "Menegotto-Pinto");
- **b.** Fattore di riduzione della rigidezza;
- **Ro, a1, a2.** Costanti del modello di "Menegotto-Pinto";

### Acciaio per carpenterie

Cerca		Nuovo	Elimina	Duplica	Pulisci	Annulla	OK
<p><b>Materiali</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Acciaio per CA               <ul style="list-style-type: none"> <li>Acciaio per CA (1)</li> </ul> </li> <li>Acciaio per carpenterie               <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Acciaio per carpenterie (1)</b></li> </ul> </li> <li>Calcestruzzo               <ul style="list-style-type: none"> <li>Calcestruzzo (1)</li> </ul> </li> <li>Calcestruzzo alleggerito               <ul style="list-style-type: none"> <li>Calcestruzzo alleggerito (1)</li> </ul> </li> <li>Legno               <ul style="list-style-type: none"> <li>Legno (1)</li> </ul> </li> <li>Fibre               <ul style="list-style-type: none"> <li>Fibre (1)</li> </ul> </li> <li>Generico isotropo               <ul style="list-style-type: none"> <li>Generico isotropo (1)</li> </ul> </li> </ul>							
<b>Acciaio per carpenterie (1)</b>							
Acciaio per carpenterie							
<b>Varie</b>							
Nome materiale	Acciaio per carpenterie (1)						
Utente	<input type="checkbox"/>						
Esistente	<input type="checkbox"/>						
Modulo elastico (E)	[N/mm <sup>2</sup> ]	210000.00					
Coefficiente di Poisson (ν)		0.30					
Peso per unità di volume	[kN/m <sup>3</sup> ]	78.50					
Coefficiente di dilatazione termica (αT)	[1/°C]	1.2E-05					
Tipo di acciaio		S235 (UNI EN 10025-2) ▼					
Coefficiente sicurezza sezioni trasversali (YM0)		1.05					
Coefficiente sicurezza instabilità membrature (YM1)		1.05					
Coefficiente sicurezza sezioni a rottura (YM2)		1.25					
Tensione di snervamento (fyk)	[N/mm <sup>2</sup> ]	235.00					
Resistenza caratteristica a rottura (ftk)	[N/mm <sup>2</sup> ]	360.00					
<b>Spessori superiori a 40 mm</b>							
Tensione di snervamento (fyk)	[N/mm <sup>2</sup> ]	215.00					
Tensione di rottura a trazione (ftk)	[N/mm <sup>2</sup> ]	360.00					
<b>Analisi non lineare</b>							
Modello di calcolo		Menegotto-Pinto ▼					
b		0.01					
Ro		20.00					
a1		18.50					
a2		0.15					

Nella pagina materiale "**Acciaio per carpenterie**" è possibile definire i seguenti parametri:

- **Modulo elastico.** Modulo elastico del materiale (editabile solo se campo "Utente" è selezionato);
- **Coefficiente di Poisson ( $\nu$ ).** Coefficiente di Poisson (editabile solo se campo "Utente" è selezionato);
- **Peso per unità di volume.** Peso per unità di volume (editabile solo se campo "Utente" è selezionato);
- **Coefficiente di dilatazione termica ( $\alpha T$ ).** Coefficiente di dilatazione termica;
- **Tipo acciaio.** Nomenclatura da normativa dell'acciaio da carpenteria metallica;

- **Fattore di confidenza (FC).** Valore da assegnare al fattore di confidenza in funzione del Livello di conoscenza (visibile solo per campo "Esistente" selezionato).
- **Coefficiente sicurezza sezioni trasversali ( $\gamma_{M0}$ ).** Coefficiente parziale di sicurezza del materiale per verifiche di resistenza;
- **Coefficiente sicurezza instabilità membrature ( $\gamma_{M1}$ ).** Coefficiente parziale di sicurezza del materiale per verifiche di instabilità;
- **Coefficiente di sicurezza sezioni a rottura ( $\gamma_{M2}$ ).** Coefficiente parziale di sicurezza del materiale per verifiche a rottura;
- **Tensione di snervamento ( $f_{yk}$ ).** Resistenza caratteristica di snervamento;
- **Resistenza caratteristica a rottura ( $f_{tk}$ ).** Resistenza caratteristica a rottura;
- **Tensione di snervamento ( $f_{yk}$ ) per spessori superiori a 40 mm.** Tensione caratteristica di snervamento per i profilati aventi spessore >40 mm;
- **Tensione di rottura a trazione ( $f_{tk}$ ) per spessori superiori a 40 mm.** Tensione caratteristica a rottura per i profilati aventi spessore >40 mm;
- **Modello di calcolo** (analisi non lineare). Modello di calcolo da adottare per analisi non lineare (a scelta fra "Bilineare finito con incrudimento" e "Menegotto-Pinto");
- **b.** Fattore di riduzione della rigidezza;
- **Ro, a1, a2.** Costanti del modello di "Menegotto-Pinto";

#### Calcestruzzo e Calcestruzzo alleggerito

**Materiali**

Cerca

Nuovo Elimina Duplica Pulisci Annulla OK

### Calcestruzzo (1)

Calcestruzzo

**Varie**

Nome materiale	Calcestruzzo (1)	
Valori utente	<input type="checkbox"/>	
Esistente	<input type="checkbox"/>	
Coefficiente di Poisson ( $\nu$ )	0.15	
Peso per unità di volume [kN/m³]	25.00	
Coefficiente di dilatazione termica ( $\alpha_T$ ) [1/°C]	1E-05	
Classe	C25/30	
Riduzione caratteristiche elastiche	0.50	
Coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_m$ )	1.50	
Modulo elastico ( $E_c$ ) [N/mm²]	31475.806	
Resistente solo a compressione	<input checked="" type="checkbox"/>	
Ect/Ec	0.50	

**Resistenze**

Resistenza caratteristica cubica ( $R_{ck}$ ) [N/mm²]	30.00
Resistenza caratteristica cilindrica ( $f_{ck}$ ) [N/mm²]	25.00
Resistenza di calcolo ( $f_{cd}$ ) [N/mm²]	14.167
Resistenza di calcolo ( $f_{cd}$ ) SLD [N/mm²]	21.25
Resistenza di calcolo a trazione ( $f_{ctd}$ ) [N/mm²]	1.197
Resistenza di calcolo a trazione ( $f_{ctd}$ ) SLD [N/mm²]	1.795
Resistenza caratteristica a trazione ( $f_{ctk,0.05}$ ) [N/mm²]	1.795
Valore medio resistenza a trazione ( $f_{ctm}$ ) [N/mm²]	2.565
Fattore di resistenza ultima	0.20

**Deformazioni**

$\epsilon_{c2}$ [%]	0.20
$\epsilon_{cu2}$ [%]	0.35

Nella pagina materiale "**Calcestruzzo**" è possibile definire i seguenti parametri:

- **Coefficiente di Poisson ( $\nu$ )**. Coefficiente di Poisson (editabile solo se campo "Utente" è selezionato);
- **Peso per unità di volume**. Peso per unità di volume (editabile solo se campo "Utente" è selezionato);
- **Coefficiente di dilatazione termica ( $\alpha_T$ )**. Coefficiente di dilatazione termica;
- **Classe**. Classe di resistenza. (editabile solo se campo "Utente" non è attivato);
- **Riduzione caratteristiche elastiche**. Coefficiente di riduzione delle caratteristiche elastiche per effetto delle distorsioni termiche  $\Delta t$ ;
- **Fattore di confidenza (FC)**. Valore da assegnare al fattore di confidenza in funzione del Livello di conoscenza (visibile solo per campo "Esistente" selezionato);
- **Coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_m$ )**. Coefficiente parziale di sicurezza del materiale;

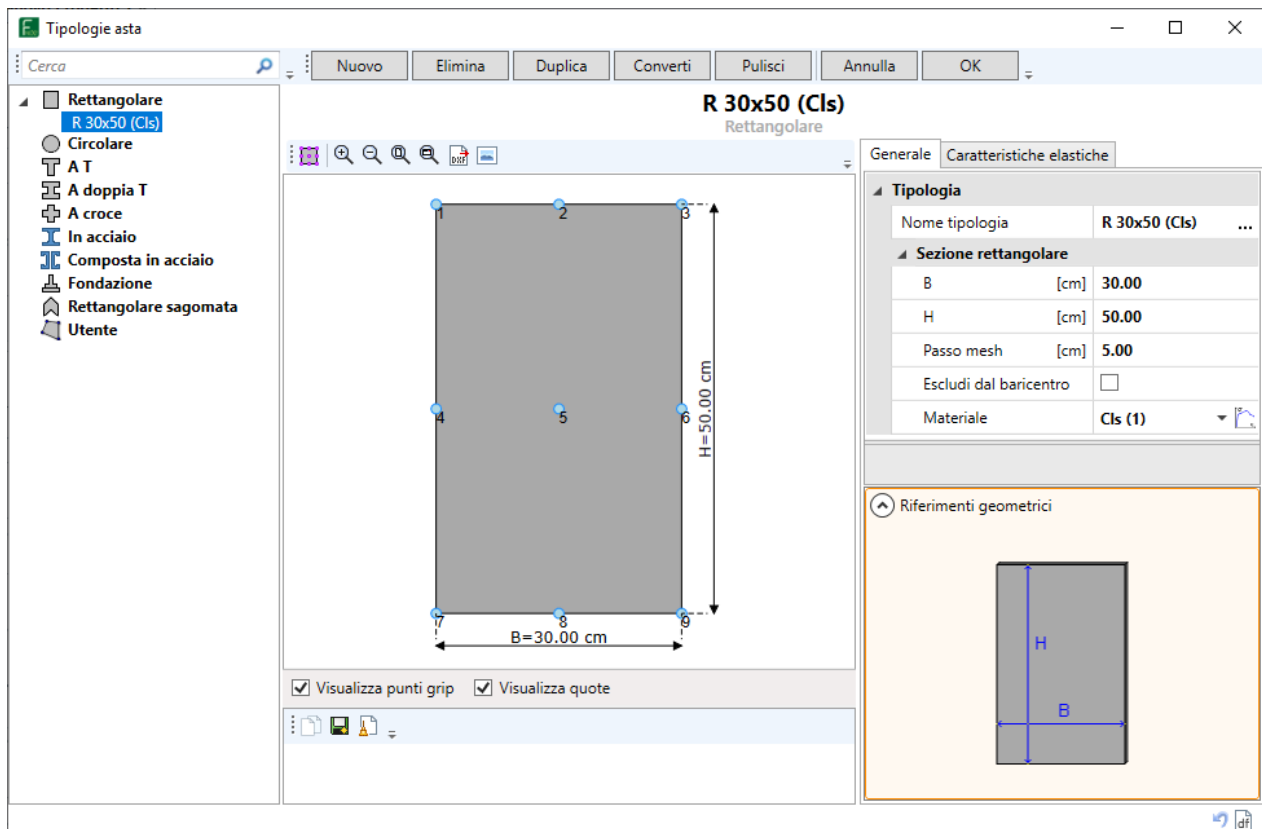
- **Modulo elastico Ec.** Modulo elastico a compressione del materiale;
- **Resistente solo a compressione.** Nel caso di analisi non lineari consente di considerare solo la resistenza a compressione;
- **Ect/Et** : Rapporto tra il modulo elastico a trazione ed il modulo elastico a compressione;
- **Resistenza caratteristica cubica (Rck).** Resistenza caratteristica cubica (Rck);
- **Resistenza caratteristica cilindrica (fck).** Resistenza caratteristica cilindrica (fck);
- **Resistenza di calcolo (fcd).** Resistenza di calcolo (fcd);
- **Resistenza di calcolo (fcd) SLD.** Resistenza di calcolo (fcd) per verifiche agli SLD;
- **Resistenza di calcolo a trazione (fctd).** Resistenza di calcolo a trazione (fctd);
- **Resistenza di calcolo a trazione (fctd) SLD.** Resistenza di calcolo a trazione (fctd) SLD per verifiche agli SLD;
- **Resistenza caratteristica a trazione (fctk,0.05).** Resistenza caratteristica a trazione (fctk0.05);
- **Valore medio resistenza a trazione (fctm).** Valore medio resistenza a trazione;
- **Fattore di resistenza ultima.** Fattore di resistenza ultima per analisi non lineare;
- $\epsilon_{c2}$ . Deformazione al raggiungimento della massima tensione;
- $\epsilon_{uc2}$ . Deformazione ultima.

Per il calcestruzzo alleggerito i valori vengono calcolati in funzione del peso per unità di volume inserito in base alle indicazioni delle norme UNI EN 206:2016.

### 2.1.2.3 Sezioni

#### Tipologie Sezioni

Consente di accedere all'ambiente "**Tipologie Asta**" in cui potranno essere definire le caratteristiche delle sezioni delle varie aste che verranno imputate nel modello strutturale.




Sulla parte superiore dell'ambiente **"Tipologie asta"** sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Nuovo.** Il pulsante "Nuovo" ha la funzione di aggiungere alla lista una nuova sezione;
- **Elimina.** Il pulsante "Elimina" ha la funzione di eliminare dalla lista la sezione selezionata;
- **Pulisci.** Il pulsante "Pulisci" ha la funzione di eliminare dalla lista tutte le sezioni non utilizzate nel progetto attuale;
- **Duplica.** Il pulsante "Duplica" ha la funzione di duplicare la sezione selezionata;
- **Converti.** Il pulsante "Converti" ha la funzione di convertire la sezione selezionata in un'altra;
- **Annulla** Il pulsante "Annulla" chiude la finestra annullando tutte le modifiche in essa apportate;
- **OK.** Il pulsante "OK" chiude la finestra confermando tutte le modifiche in essa apportate.

Per ogni tipologia di sezione aggiunta è possibile personalizzare i parametri caratterizzanti:



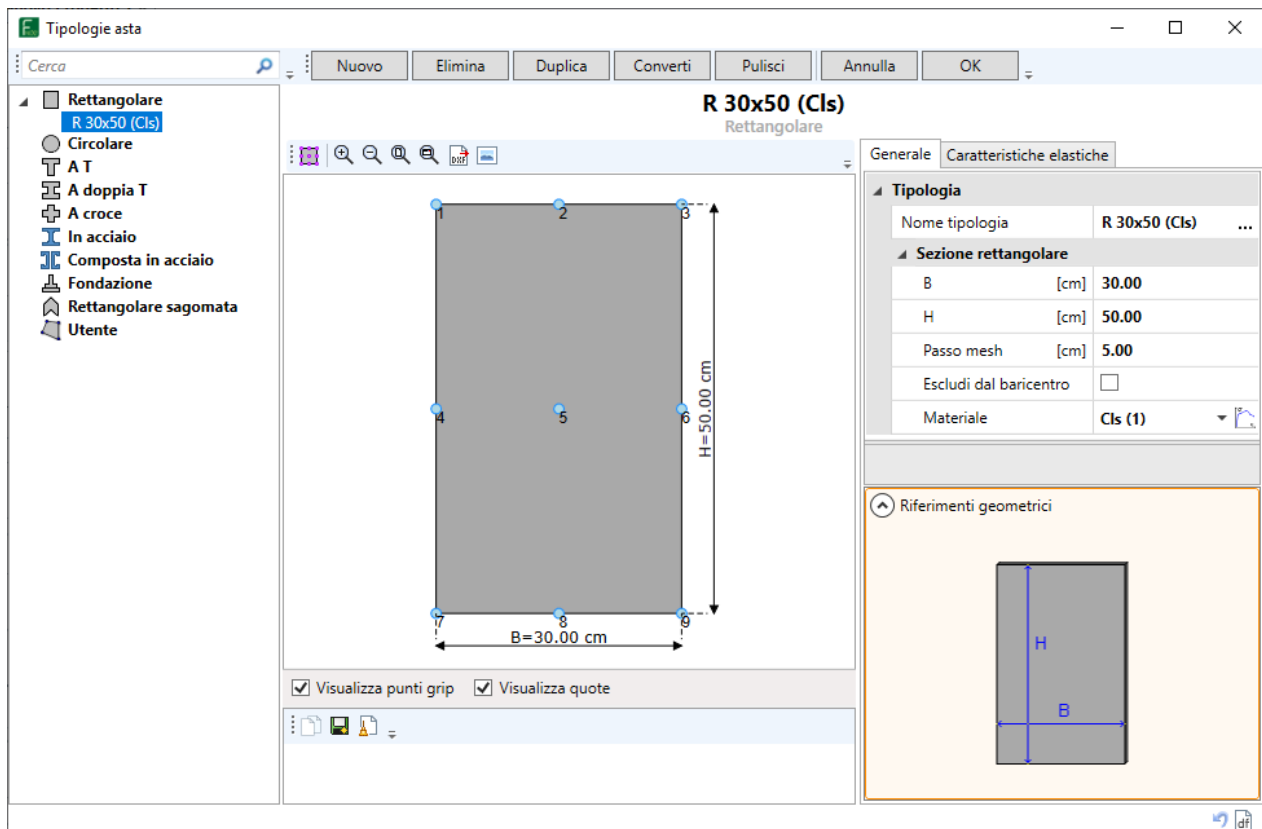
Generale		Caratteristiche elastiche	
<b>Tipologia</b>			
Nome tipologia	R 30x50 (Cls)	...	
<b>Sezione rettangolare</b>			
B	[cm]	30.00	
H	[cm]	50.00	
Passo mesh	[cm]	5.00	
Escludi dal baricentro		<input type="checkbox"/>	
Materiale	Cls (1)	▼ 	

E' possibile, inoltre, visualizzare le caratteristiche elastiche della sezione aggiunta:



Generale		Caratteristiche elastiche	
<b>Dati generali</b>			
Peso	[N/m]	3750.00	
tMax	[cm]	0.00	
Area taglio 2	[mm <sup>2</sup> ]	150000.00	
Area taglio 3	[mm <sup>2</sup> ]	150000.00	
It	[mm <sup>4</sup> ]	2807100000.0	
Area	[mm <sup>2</sup> ]	150000.00	
<b>Assi baricentrici</b>			
WG3	[mm <sup>3</sup> ]	7500000.00	
2Gmax	[cm]	15.00	
3Gmax	[cm]	25.00	
WG2	[mm <sup>3</sup> ]	12500000.00	
rG2	[cm]	8.66	
JG1	[mm <sup>4</sup> ]	4250000000.0	▼

### Sezione rettangolare

Interfaccia per la definizione di sezioni rettangolari o quadrate. Le sezioni rettangolari o quadrate possono essere assegnate ad elementi travi di elevazione, travi di accoppiamento o pilastri.

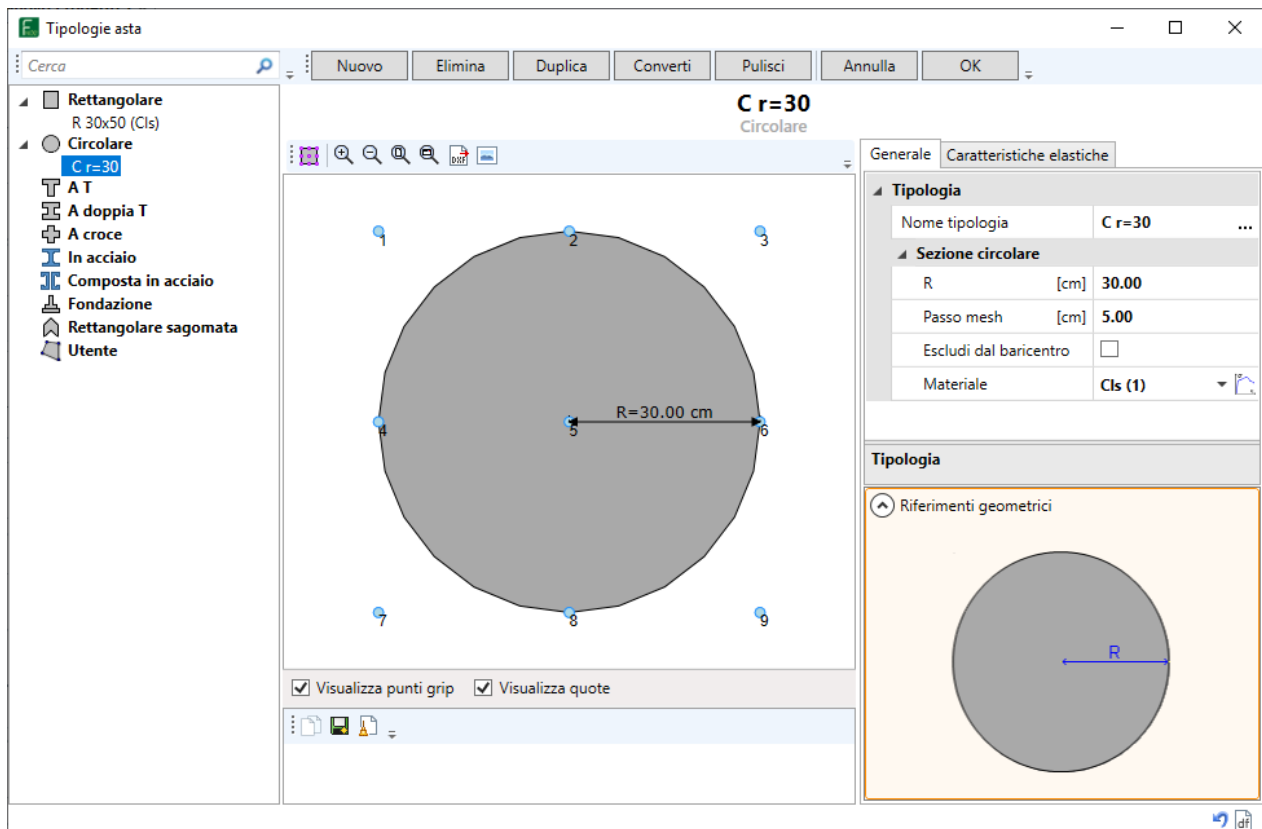


Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:



- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "R Base x Altezza";
- **B.** Base della sezione;
- **H.** Altezza della sezione;
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;
- **Escludi dal baricentro.** Esclude la sezione dal calcolo del baricentro (Per esempio nel caso dei consolidamenti);
- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;

## Sezione Circolare

Interfaccia per la definizione di sezioni circolari. Le sezioni circolari possono essere assegnate ad elementi pilastri.

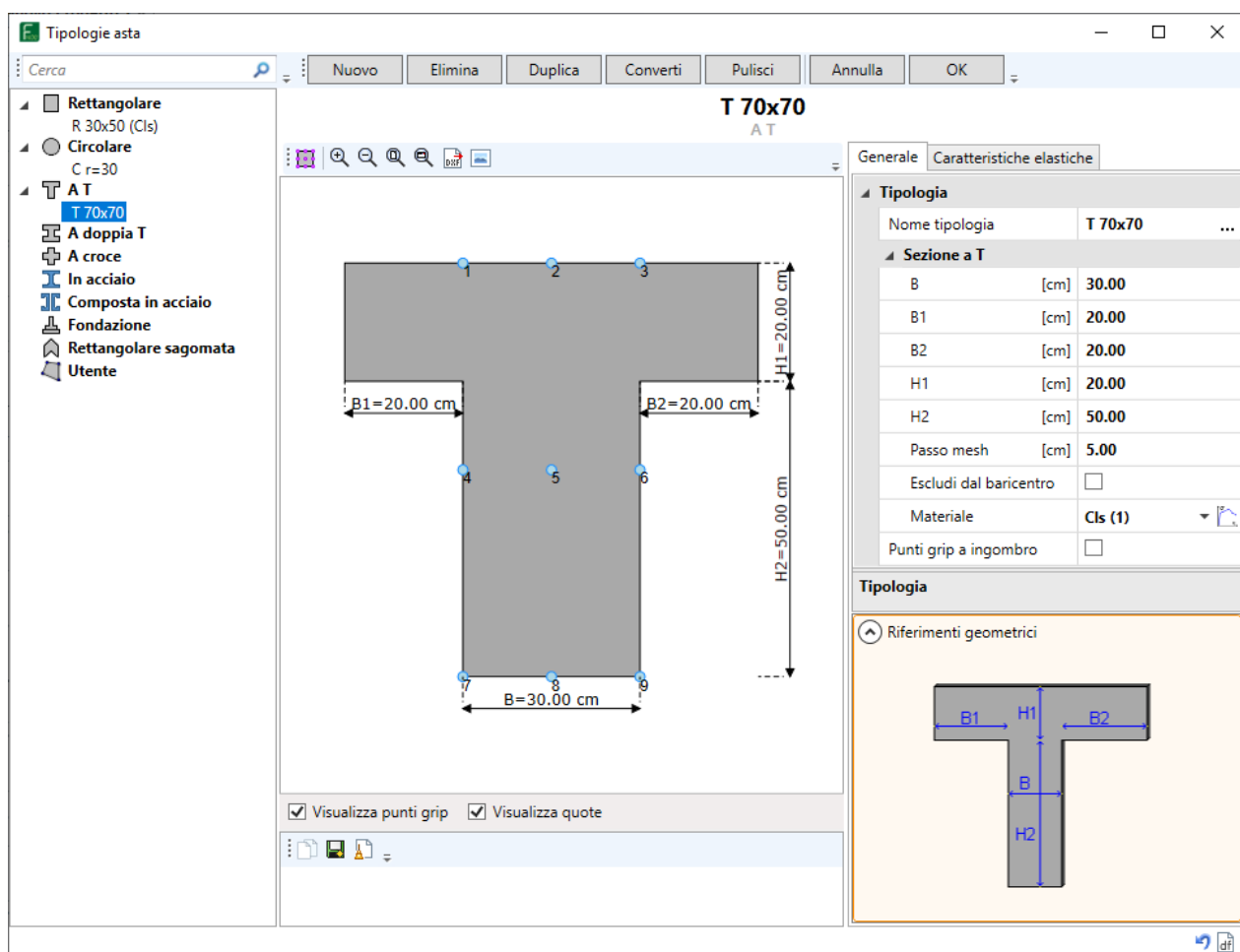


Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:



- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "C r = Raggio";
- **R.** Raggio della sezione;
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;
- **Escludi dal baricentro.** Esclude la sezione dal calcolo del baricentro (Per esempio nel caso dei consolidamenti);
- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali.

## Sezione a T

Interfaccia per la definizione di sezioni a T o di sezioni a L. Le sezioni a T o a L possono essere assegnate ad elementi travi di elevazione o pilastri.

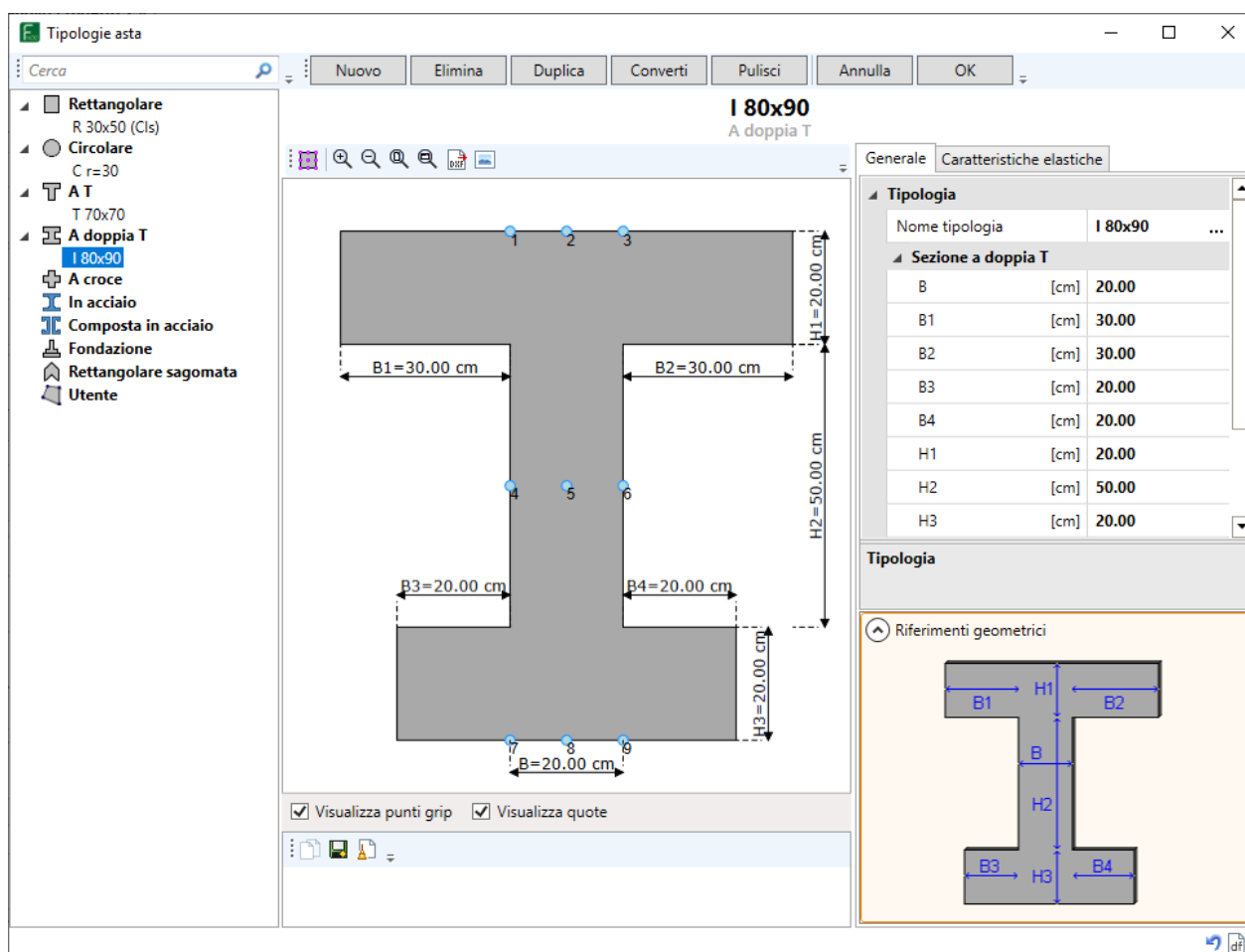


Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:



- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "T B1+B+B2 x H1+H2";
- **B.** Larghezza dell'anima;
- **B1.** Larghezza ala sinistra. Assegnando valore '0' se sezione a T viene trasformata in sezione a L (se B2 = 0 allora l'assegnazione non viene accettata);
- **B2.** Larghezza ala destra. Assegnando valore '0' se sezione a T viene trasformata in sezione a L (se B1 = 0 allora l'assegnazione non viene accettata);
- **H1.** Altezza ali;
- **H2.** Altezza dell'anima (escluse le ali);
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;
- **Escludi dal baricentro.** Esclude la sezione dal calcolo del baricentro (Per esempio nel caso dei consolidamenti);
- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

## Sezione a doppia T

Interfaccia per la definizione di sezioni a doppia T o per sezioni che si possono ottenere dalla doppia T. Esse possono essere assegnate ad elementi travi di elevazione o pilastri.

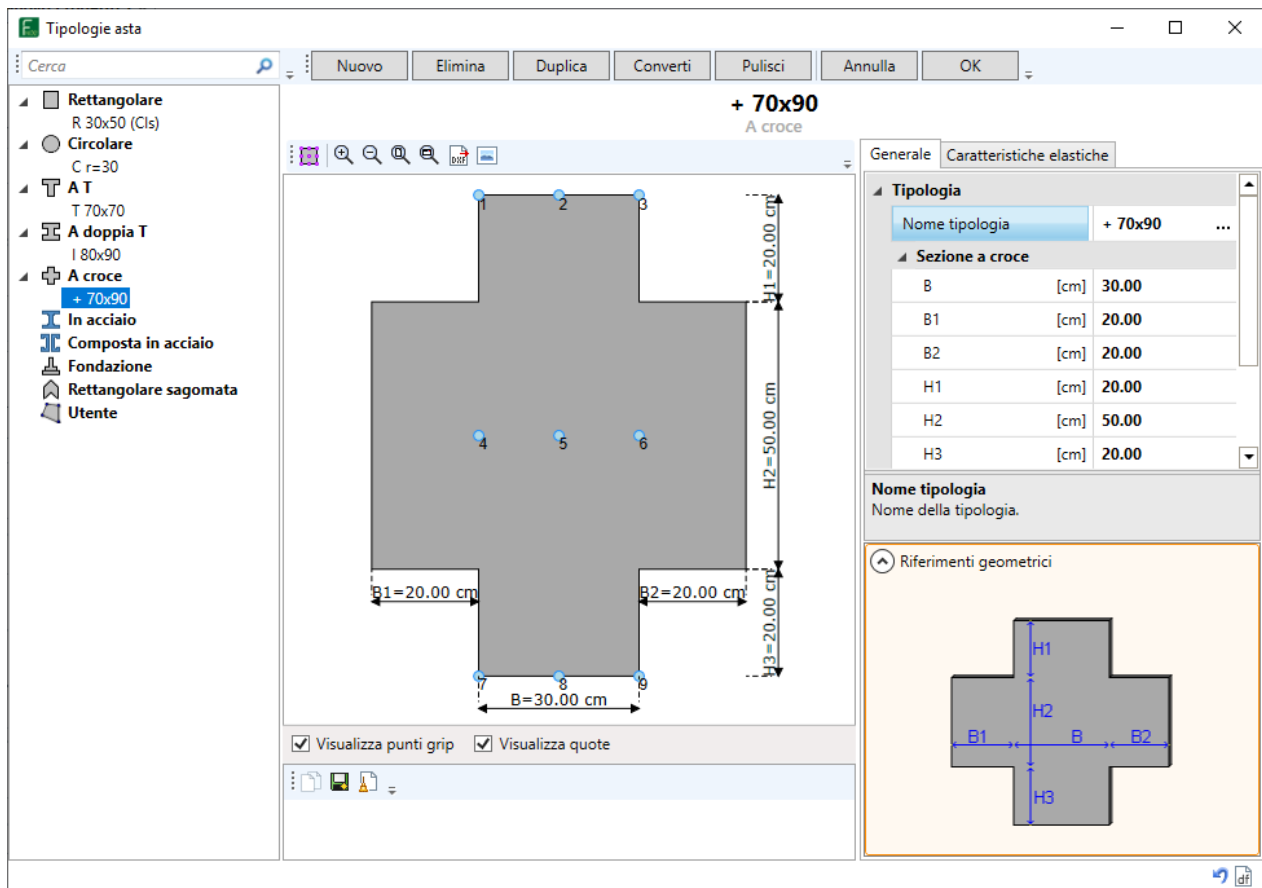


Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:



- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "I B1+B2 x H1+H2+H3";
- **B.** Larghezza dell'anima;
- **B1.** Larghezza ala superiore sinistra;
- **B2.** Larghezza ala superiore destra;
- **B3.** Larghezza ala inferiore sinistra;
- **B4.** Larghezza ala inferiore destra;
- **H1.** Altezza ali superiori;
- **H2.** Altezza dell'anima (escluse le ali);
- **H3.** Altezza ali inferiori;
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;
- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

## Sezione a croce

Interfaccia per la definizione di sezioni a croce o per sezioni che si possono ottenere dalla forma a croce. Esse possono essere assegnate ad elementi travi di elevazione o pilastri.

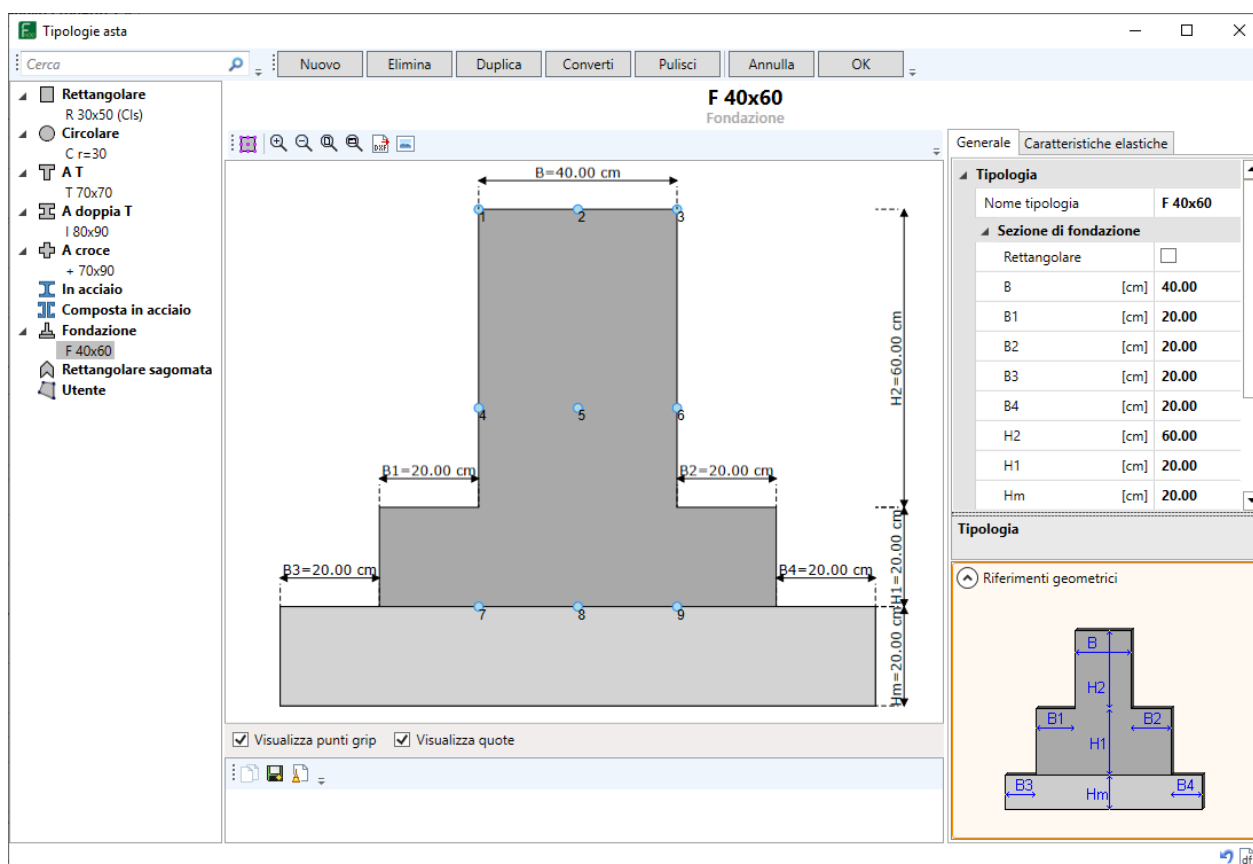


Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:



- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "+ B1+B+B2 x H1+H2+H3";
- **B.** Larghezza dell'anima;
- **B1.** Larghezza ala sinistra;
- **B2.** Larghezza ala destra;
- **H1.** Altezza parte superiore dell'anima (escluse ali e parte inferiore);
- **H2.** Altezza ali;
- **H3.** Altezza parte inferiore dell'anima (escluse ali e parte superiore);
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;
- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

## Sezione di Fondazione

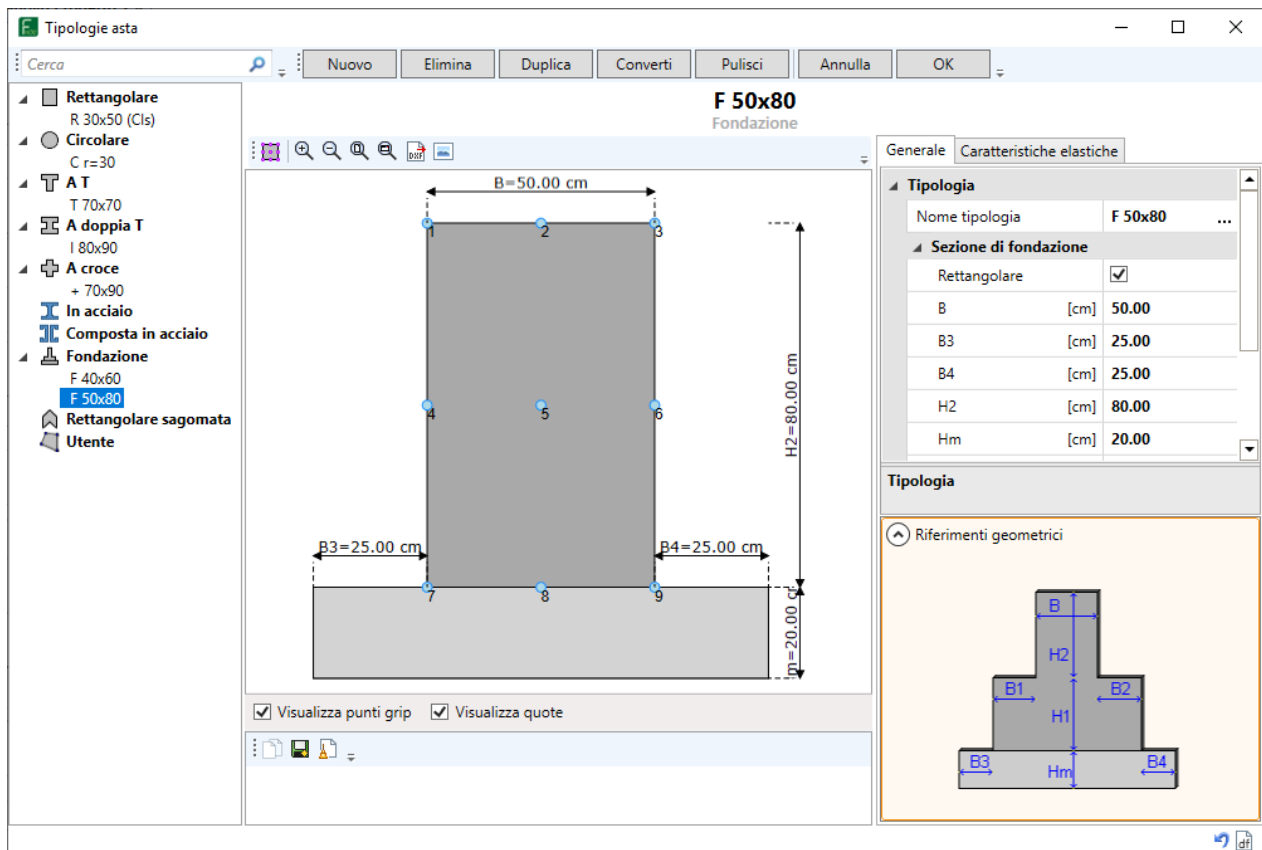
Interfaccia per la definizione di sezioni di fondazione a forma di T rovescia o rettangolare.





Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:

- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "F B1+B2 x H1+H2";
- **Rettangolare.** Se selezionato imposta automaticamente la forma Rettangolare per la sezione di fondazione;
- **B.** Spessore dell'anima della trave a T rovescia;
- **B1.** Larghezza dell'ala sinistra della sezione;
- **B2.** Larghezza dell'ala destra della sezione;
- **B3.** Risega sinistra del magrone di sottofondazione;
- **B4.** Risega destra del magrone di sottofondazione;
- **H2.** Altezza dell'anima (esclusa quella delle ali);
- **H1.** Altezza delle ali della sezione;
- **Hm.** Altezza del magrone di sottofondazione;
- **Passo mesh.** Passo di discretizzazione della sezione nel caso di analisi non lineare;
- **Materiale.** Materiale da assegnare alla sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

Nel caso in cui si sceglie la sezione rettangolare si ha:



Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:

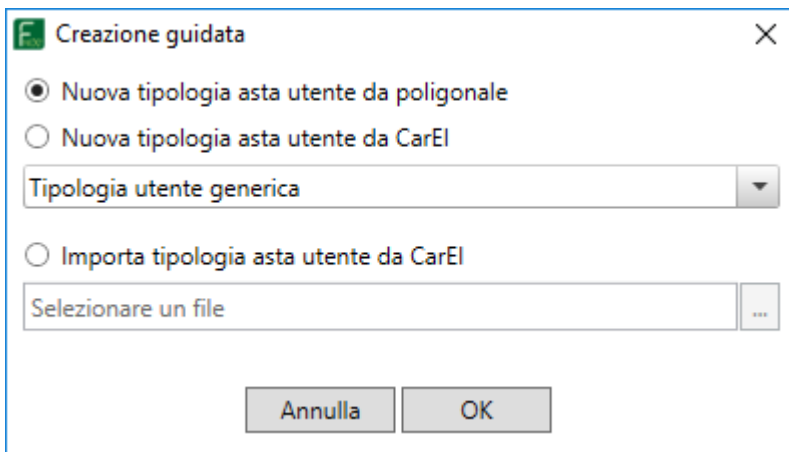
- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** . Consente di attribuire il nome alla sezione del tipo "F B1+B+B2 x H1+H2";
- **Rettangolare.** Se selezionato imposta automaticamente la forma Rettangolare per la sezione di fondazione;
- **B.** Base della sezione;
- **B3.** Risega sinistra del magrone di sottofondazione;
- **B4.** Risega destra del magrone di sottofondazione;
- **H2.** Altezza della sezione;
- **Hm.** Altezza del magrone di sottofondazione;
- **Passo mesh.** Passo di discretizzazione della sezione nel caso di analisi non lineare;
- **Materiale.** Materiale da assegnare alla sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali;
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

## Sezione utente

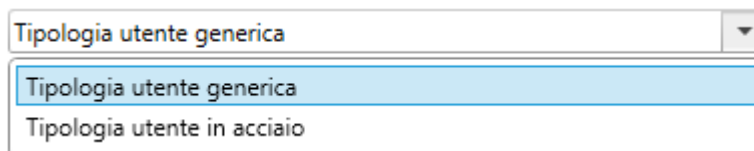
Il tipo "sezione utente" può essere utilizzato per modellare, usando elementi finiti di tipo beam, elementi particolari presenti nel modello strutturale.

Scegliendo la sezione "Utente" si apre la finestra per la creazione guidata di una nuova sezione utente.



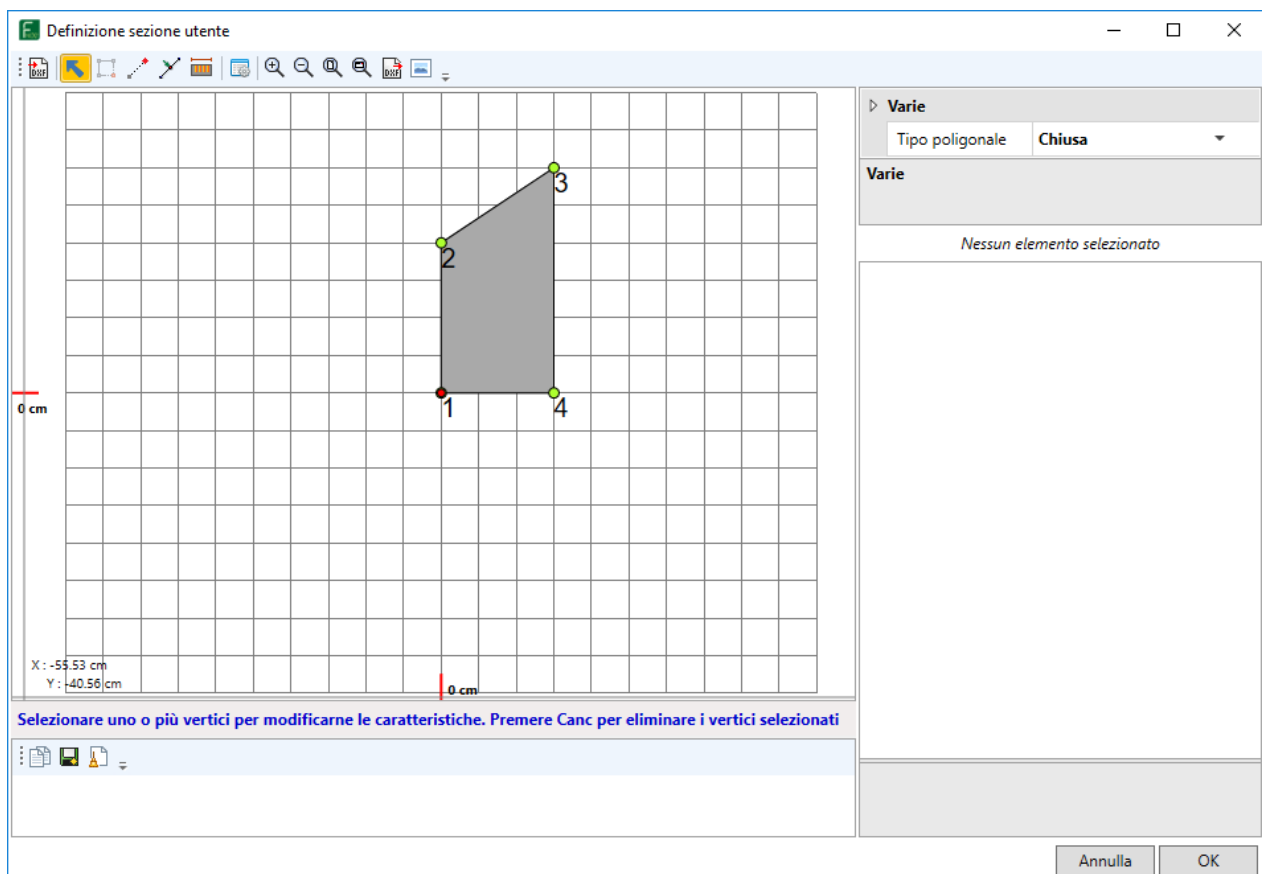


- **Nuova tipologia asta utente da poligonale.** Consente di creare una nuova tipologia asta utente a partire da una poligonale;
- **Nuova tipologia asta utente da CarEI.** Consente di creare una nuova tipologia asta utente tramite il software "CarEI";




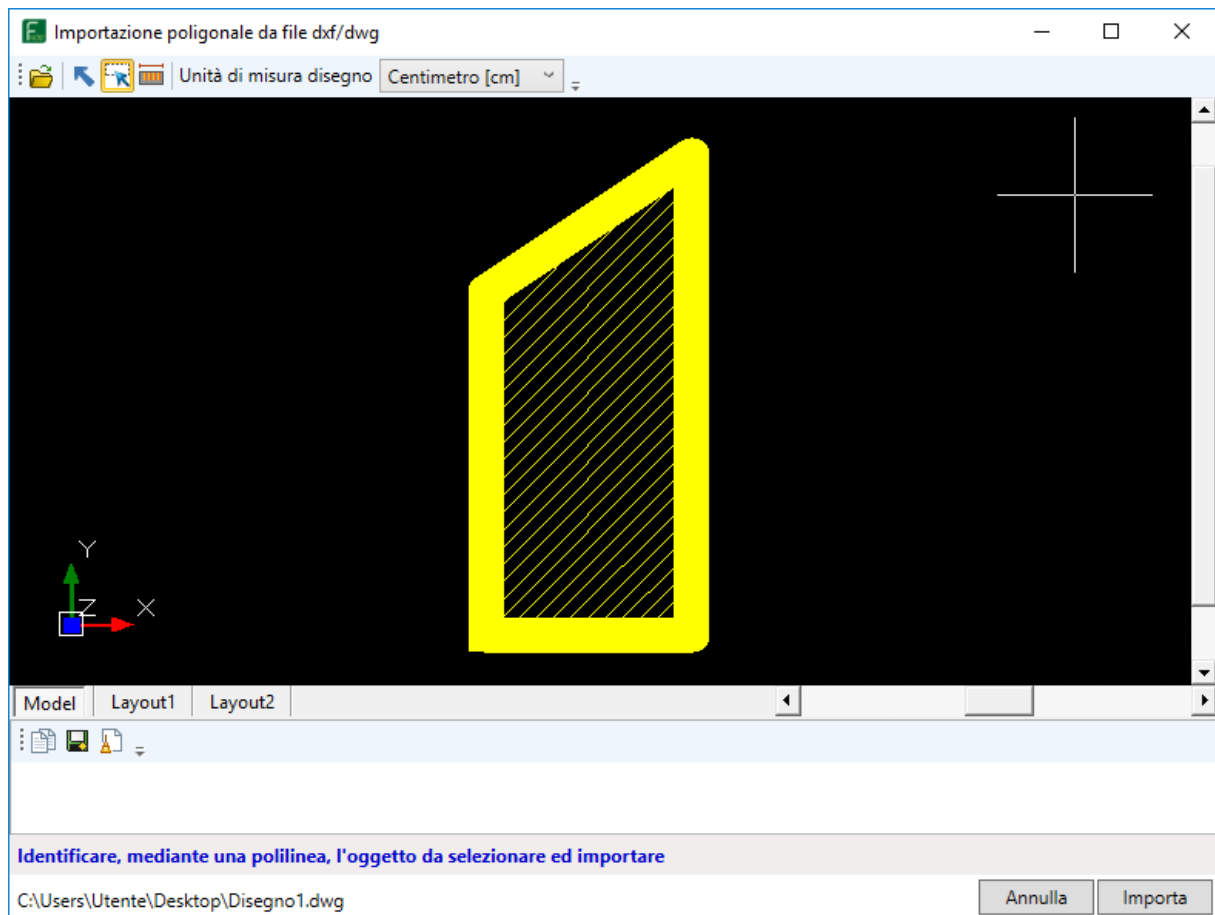
- **Tipologia utente generica.** Consente di creare una nuova tipologia asta utente di materiale generico.
  - **Tipologia utente in acciaio.** Consente di creare una nuova tipologia asta utente in acciaio.
- **Importa tipologia asta utente da CarEI.** Consente di importare una tipologia di asta utente dal software "CarEI".

Supponendo di scegliere "Nuova tipologia asta utente da poligonale" di conseguenza si apre la seguente finestra per la definizione della sezione utente:







Sulla parte superiore di questo ambiente sono presenti i seguenti pulsanti:







- **Importa poligonale da file dxf/dwg** . Consente di importare un file dxf/dwg contenente il poligono della sezione utente. Alla pressione del corrispondente pulsante si apre la seguente finestra:



Sulla parte superiore di questo ambiente sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Apri file dxf/dwg** . Consente di scegliere il file da importare;
- **Seleziona** . Selezionare un oggetto, tra quelli evidenziati, da importare;
- **Seleziona polilinea** . Identifica, mediante una polilinea, l'oggetto da selezionare e importare;
- **Calcola la distanza tra due punti** . Consente di misurare la distanza tra due punti sul disegno.

Selezionata la polilinea dell'oggetto da importare si completa cliccando sul pulsante "Importa".

- **Seleziona** . Permette di selezionare uno o più vertici per modificarne le caratteristiche. Premere "Canc" per eliminare i vertici selezionati.
- **Attiva/disattiva input grafico poligonale** . Consente di definire la poligonale per ottenere la sezione compatta chiusa. Premere il tasto destro del mouse per completare l'operazione.
- **Sosta punto** . Consente di spostare un punto della poligonale.
- **Spezza poligonale** . Consente di spezzare la poligonale della sezione.
- **Calcola la distanza tra due punti** . Consente di misurare la distanza tra due punti sul disegno.
- **Opzioni griglia** . Consente di modificare la griglia per l'introduzione delle coordinate dei vertici della sezione.

**Opzioni griglia**

► **Griglia**

Attiva griglia	<input checked="" type="checkbox"/>
Passo X [cm]	5.00
Passo Y [cm]	5.00
Nx	15
Ny	11

► **Origine**

X [cm]	-35.00
Y [cm]	-25.00

Annulla OK

Una volta definito il poligono della sezione, cliccando sul tasto "OK" si apre la seguente finestra:

**Tipologie asta**

Cerca

Nuovo Elimina Duplica Converti Pulisci Annulla OK

► **Rettangolare**  
R 30x50 (Cl)  
R 60x30 (Cl)  
R 30x30 (Cl)

► **Circolare**  
C r=30  
C r=25

► **A T**  
T 80x70

► **A doppia T**  
I 80x90

► **A croce**  
+ 70x90

► **In acciaio**  
HEA120

► **Composta in acciaio**  
Composta in acciaio (1)

► **Fondazione**  
Rettangolare sagomata  
R (sagomata) 30x50 (Cl)

► **Utente**  
**Utente (1)**

**Utente (1)**

Utente

Generale Caratteristiche elastiche

► **Tipologia**

Nome tipologia	Utente (1)	...
----------------	------------	-----

► **Sezione utente**


Nome sezione	Sezione utente (1)
Passo mesh [cm]	5.00
Materiale	Calcestruzzo (1)
Punti grip a ingombro	<input type="checkbox"/>

Sezione utente  
Sezioni.

Visualizza punti grip Visualizza quote

Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:

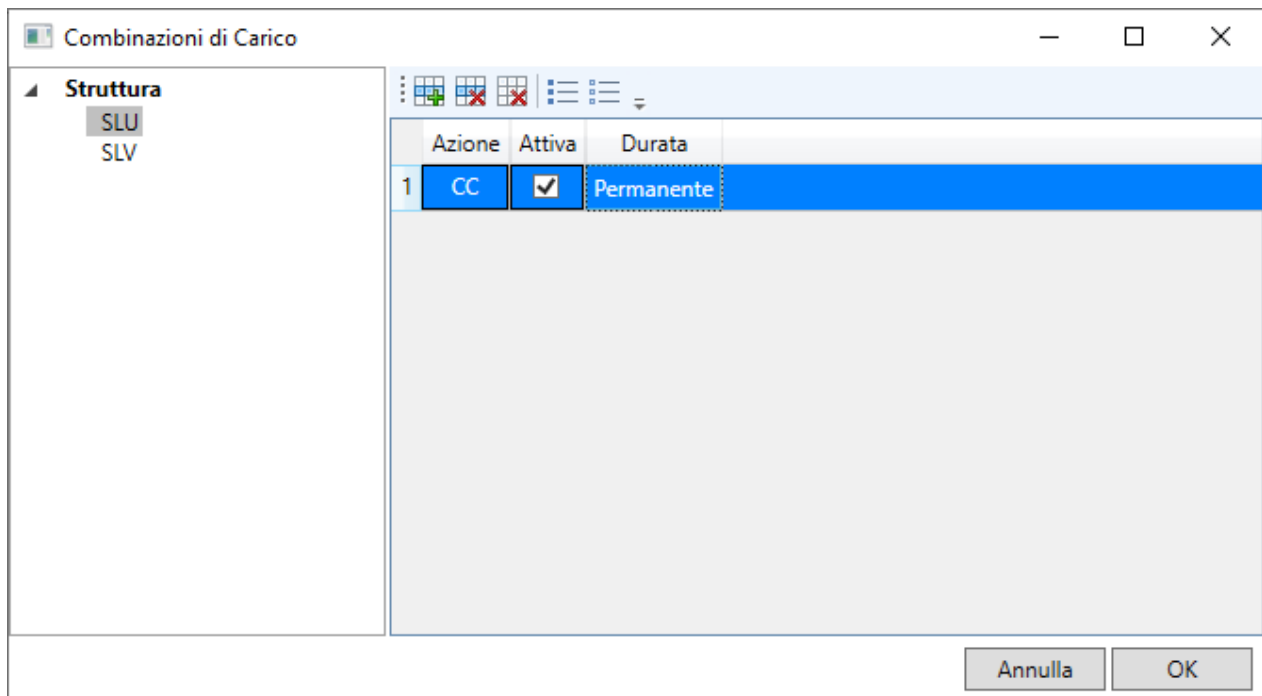
- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome**
- **Nome sezione.**
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;

- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali.
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

#### 2.1.2.4 Azioni e combinazioni

##### Azioni e combinazioni

Consente di visualizzare e definire le condizioni di calcolo da considerare nelle verifiche strutturali. Alla click del pulsante **"Azioni e combinazioni"** viene visualizzata la seguente interfaccia:



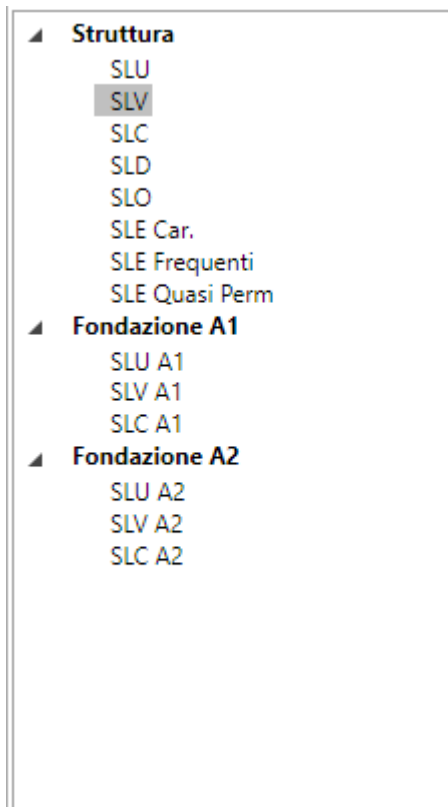
##### Combinazioni

Nell'ambiente **"Combinazioni di carico"** vi è la possibilità di gestire le condizioni di carico per ogni stato limite (selezionandolo dal "Navigatore Involuppi").

Nell'ambiente "Combinazioni" sono presenti due zone:

##### Navigatore Involuppi

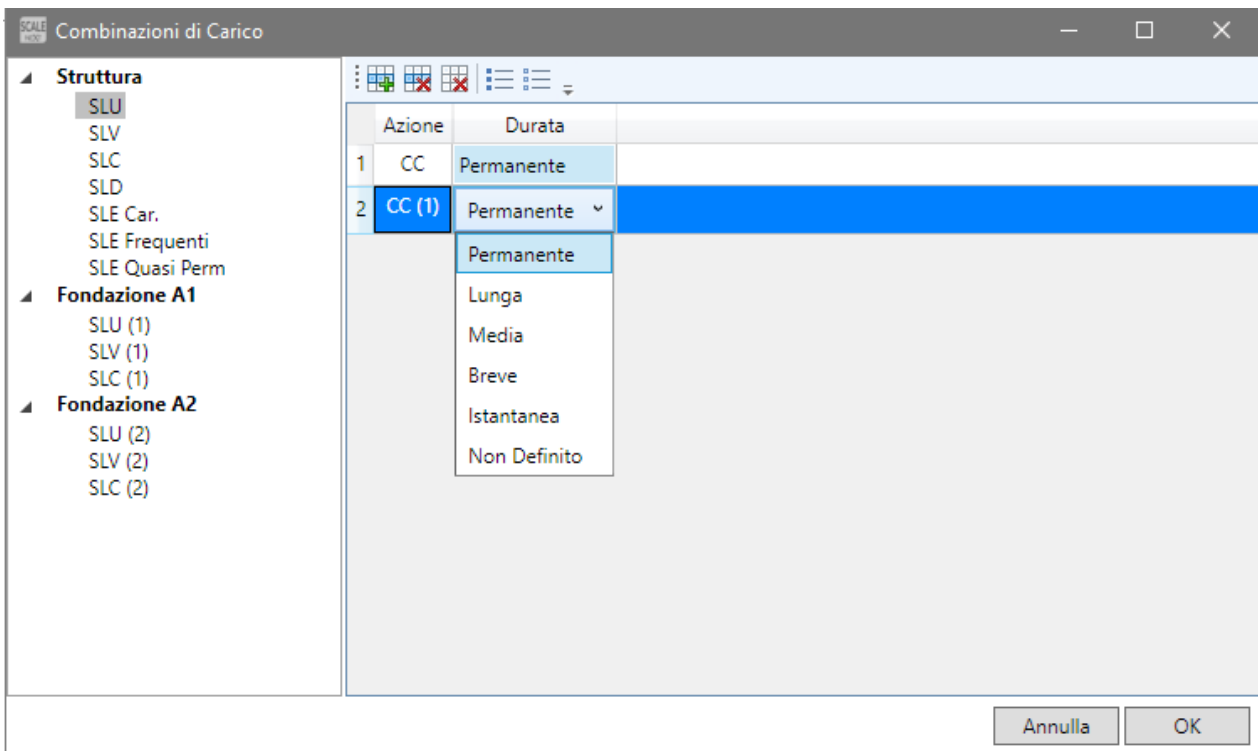
In questa zona della finestra è possibile selezionare lo stato limite rispetto al quale visualizzare le relative condizioni di carico presenti nell'ambiente "Griglia condizioni".






### Griglia condizioni

E' l'ambiente in cui è possibile gestire le varie condizioni di carico aggiungendone o modificando quelle già definite. La griglia viene aggiornata automaticamente in funzione dello stato limite selezionato nel "Navigatore Involuppi".

Ciascuna colonna indica una condizione di carico. Ciascuna condizione di carico ha il nome riportato nella testata della colonna. Il nome è formato dall'insieme del simbolo "CC" affiancato da un identificatore numerico che rappresenta il numero della condizione di carico. Affianco al nome può comparire il simbolo "\*\*"; se presente significa che la condizione di carico risulta attiva.



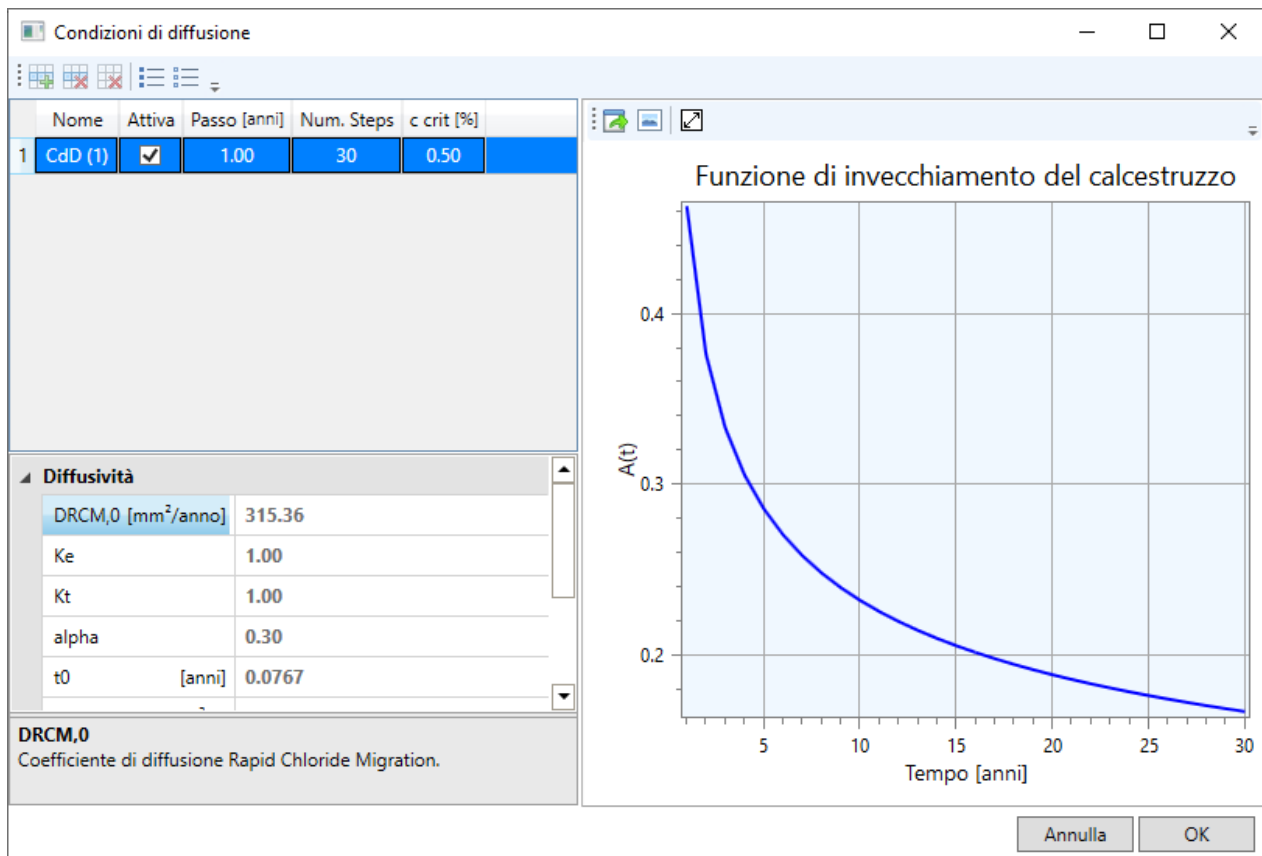
I comandi di gestione delle condizioni sono:

- **Inserisci condizione** . Cliccare per aggiungere una condizione di carico;
- **Elimina condizione** . Cliccare in una casella della condizione di carico da eliminare e quindi cliccare su "Elimina condizione" per eliminarla;
- **Elimina tutte le condizioni** . Cliccare per eliminare tutte le condizioni.

#### 2.1.2.5 Condizioni di diffusione

##### Condizioni di diffusione

Mediante questo pulsante è possibile definire i parametri per le condizioni di diffusione.



I parametri presenti sono i seguenti:

- **Passo** : passo dell'analisi in anni;
- **Num. Steps** : numero di passi di analisi da eseguire;
- **c crit** : contrazione critica dei cloruri;
- **DRCM,0** : coefficiente di diffusione Rapid Chloride Migration;
- **Ke** : parametro funzione dell'esposizione ambientale;
- **Kt** : parametro funzione del rapporto acqua/cemento;
- $\alpha$  : parametro in funzione del tipo di cemento;
- **t0** : step temporale iniziale (default 28 gg);
- **Dcr** : coefficiente per la diffusività relativa alla fessurazione;
- **wspal** : ampiezza delle fessure da spalling;
- **mesh D.** : discretizzazione diametro barra longitudinale.

Nella parte destra è presente il grafico della funzione di invecchiamento  $A(t)$  la cui espressione è funzione di  $t_0$  e  $\alpha$ :

$$A(t) = (t_0/t)^\alpha$$

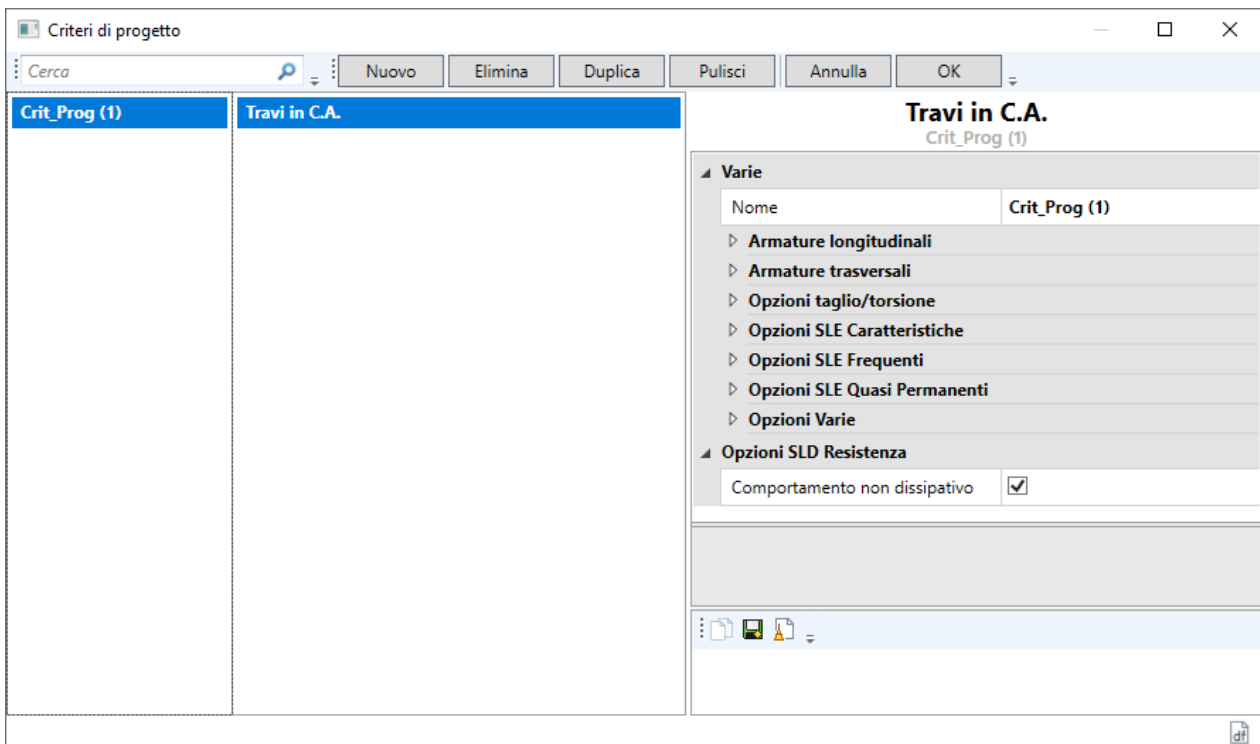
Nel caso di analisi di "Carbonatazione" i parametri presenti sono "Passo", "Num. Steps", "wspal" e "mesh D.", già commentati in precedenza.

#### 2.1.2.6 Criteri di progetto

##### Criteri di progetto

Tramite l'ambiente "**Criteri di progetto**" si ha la possibilità di definire diversi criteri di progetto per poi assegnarli ai diversi elementi strutturali.





Sulla parte superiore dell'ambiente **"Criteri di progetto"** sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Nuovo.** Il pulsante "Nuovo" ha la funzione di inputare un nuovo criterio di progetto;
- **Elimina.** Il pulsante "Elimina" ha la funzione di eliminare il criterio di progetto selezionato;
- **Duplica.** Il pulsante "Duplica" ha la funzione di duplicare il criterio di progetto selezionato;
- **Pulisci.** Il pulsante "Pulisci" ha la funzione di eliminare tutti i criteri di progetto (ad esclusione del primo) presenti nella lista;
- **Annulla.** Il pulsante "Annulla" chiude la finestra criterio di progetto annullando tutte le modifiche in essa apportate;
- **OK.** Il pulsante "OK" chiude la finestra criterio di progetto confermando tutte le modifiche in essa apportate.

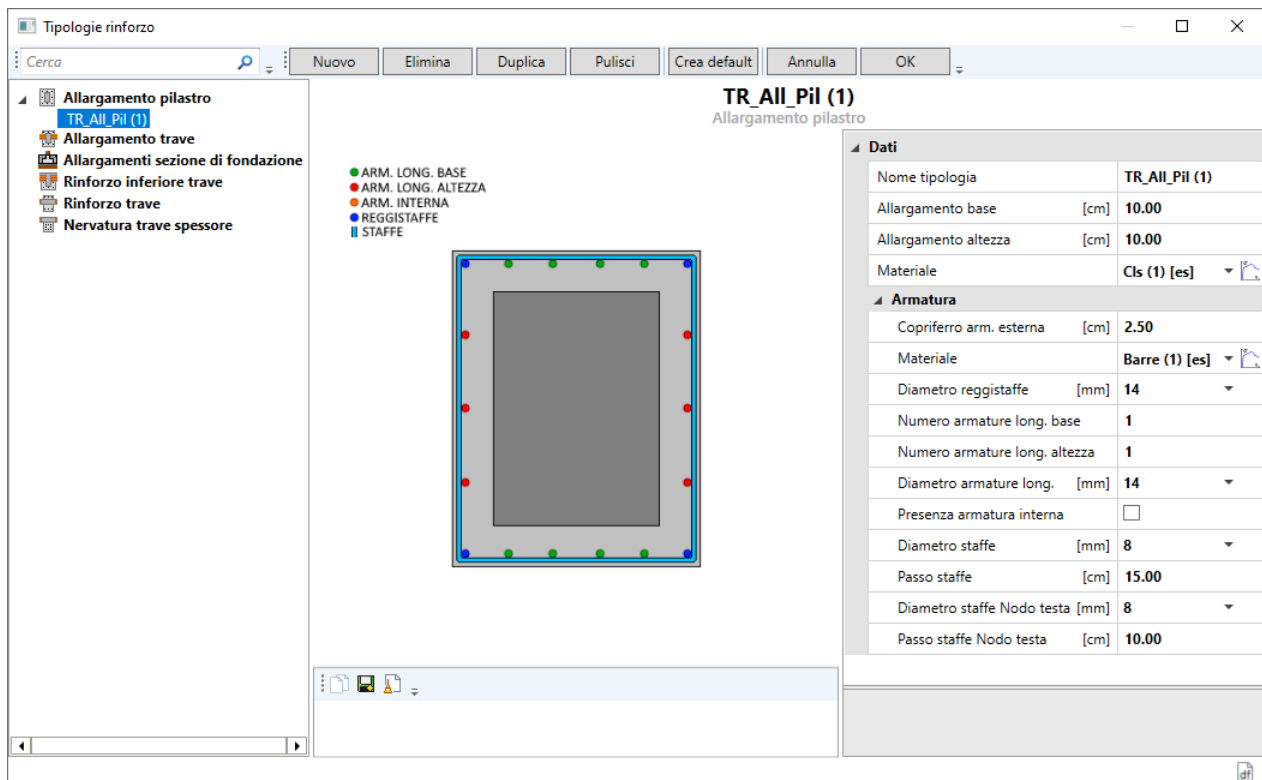
Per ogni Criterio di progetto è possibile personalizzare le preferenze progetto e verifica relativo a ciascuna tipologia di elemento strutturale.

#### 2.1.2.7 Rinforzi



Tramite l'ambiente **"Tipologie rinforzi"** è possibile configurare le varie tipologie di consolidamento che potranno essere utilizzate per consolidare gli elementi di una struttura esistente.

Bisogna tenere presente che i rinforzi possono essere utilizzati per qualsiasi tipo di calcolo (scelto in dati generali) ad eccezione di **"Struttura nuova"**.



La gestione delle tipologie avviene come gli altri editor di FaTA Next, utilizzando i comandi standard "Nuovo", "Elimina", "Duplica", ecc.

L'ambiente di gestione consente di realizzare i seguenti tipi di consolidamento:

- **Allargamenti sezione di fondazione:** per elementi di fondazione, consente diverse possibilità per i vari tipi di sezione ("rettangolare", "a T rovescia");
- **Allargamento pilastro:** per colonne in c.a. di sezione rettangolare, consente di differenziare lo spessore di allargamento nelle due direzioni;
- **Rinforzo inferiore trave:** per travi in c.a. di sezione rettangolare;
- **Allargamento trave:** per travi in c.a. di sezione rettangolare, consente di differenziare lo spessore di allargamento nelle due direzioni;
- **Rinforzo trave:** per travi in c.a. di sezione rettangolare, consiste nell'aumento dell'altezza sia superiormente che inferiormente;
- **Nervatura trave spessore:** indicato per travi a spessore, consiste nella costruzione di una nervatura inferiore;

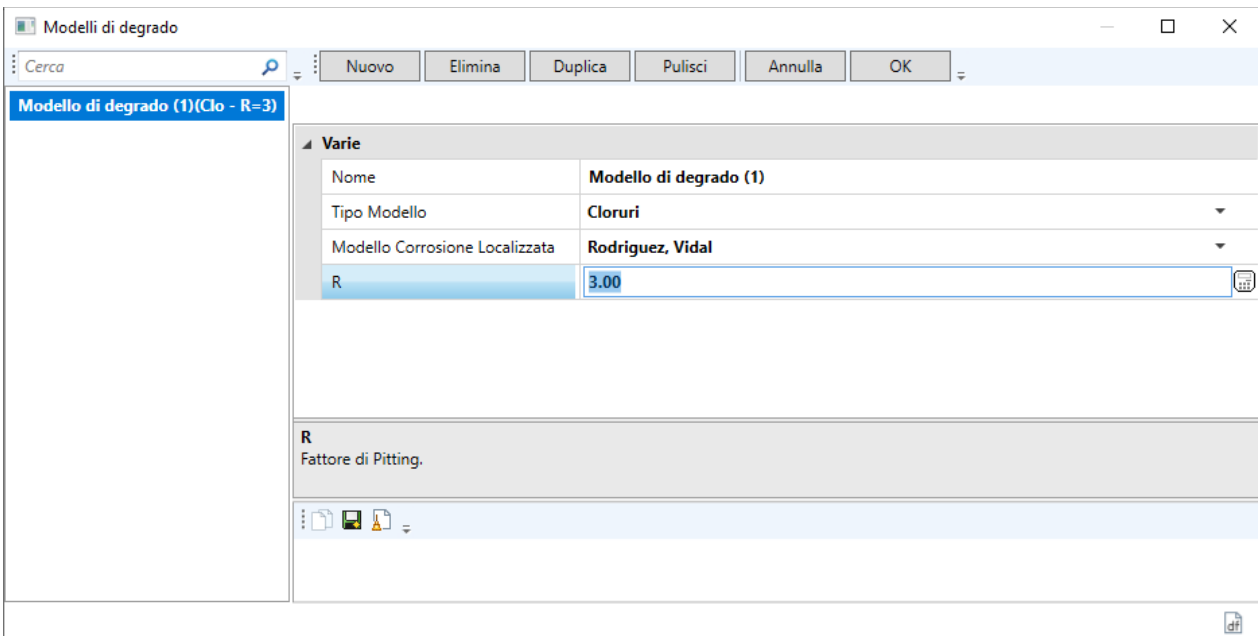
La tipologia viene assegnata mediante l'utilizzo dell'apposita proprietà:


Asta	
Tipologia	Tip_F (1)
Lunghezza [cm]	300.00
Rinforzo	Nessuno
Tipo elemento	Nessuno
Copriferro [cm]	TR_All_Pil (1)
Criteri di progetto	Crit_Prog (1)

### 2.1.2.8 Modelli di degrado

#### Modelli di degrado

I modelli di degrado vengono gestiti mediante l'apposita finestra:



Modelli di degrado									
Cerca									
Nuovo Elimina Duplica Pulisci Annulla OK									
Modello di degrado (1)(Clo - R=3)									
<b>Varie</b> <table border="1"> <tr> <td>Nome</td> <td>Modello di degrado (1)</td> </tr> <tr> <td>Tipo Modello</td> <td>Cloruri</td> </tr> <tr> <td>Modello Corrosione Localizzata</td> <td>Rodriguez, Vidal</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>3.00</td> </tr> </table>		Nome	Modello di degrado (1)	Tipo Modello	Cloruri	Modello Corrosione Localizzata	Rodriguez, Vidal	R	3.00
Nome	Modello di degrado (1)								
Tipo Modello	Cloruri								
Modello Corrosione Localizzata	Rodriguez, Vidal								
R	3.00								
<b>R</b> Fattore di Pitting.									
									

I tipi di modello personalizzabili sono:

- Corrosione uniforme
- Corrosione localizzata
- Cloruri
- Carbonatazione

Nel caso di **corrosione uniforme** l'unico parametro di personalizzazione è la proprietà "x" definita come la "Penetrazione raggiunta dalla corrosione".

Nel caso di **corrosione localizzata** è possibile personalizzare:

- Modello corrosione localizzata (la scelta è tra "Rodriguez, Vidal" o "Val-Melchers, Vidal")
- x (Penetrazione raggiunta dalla corrosione)

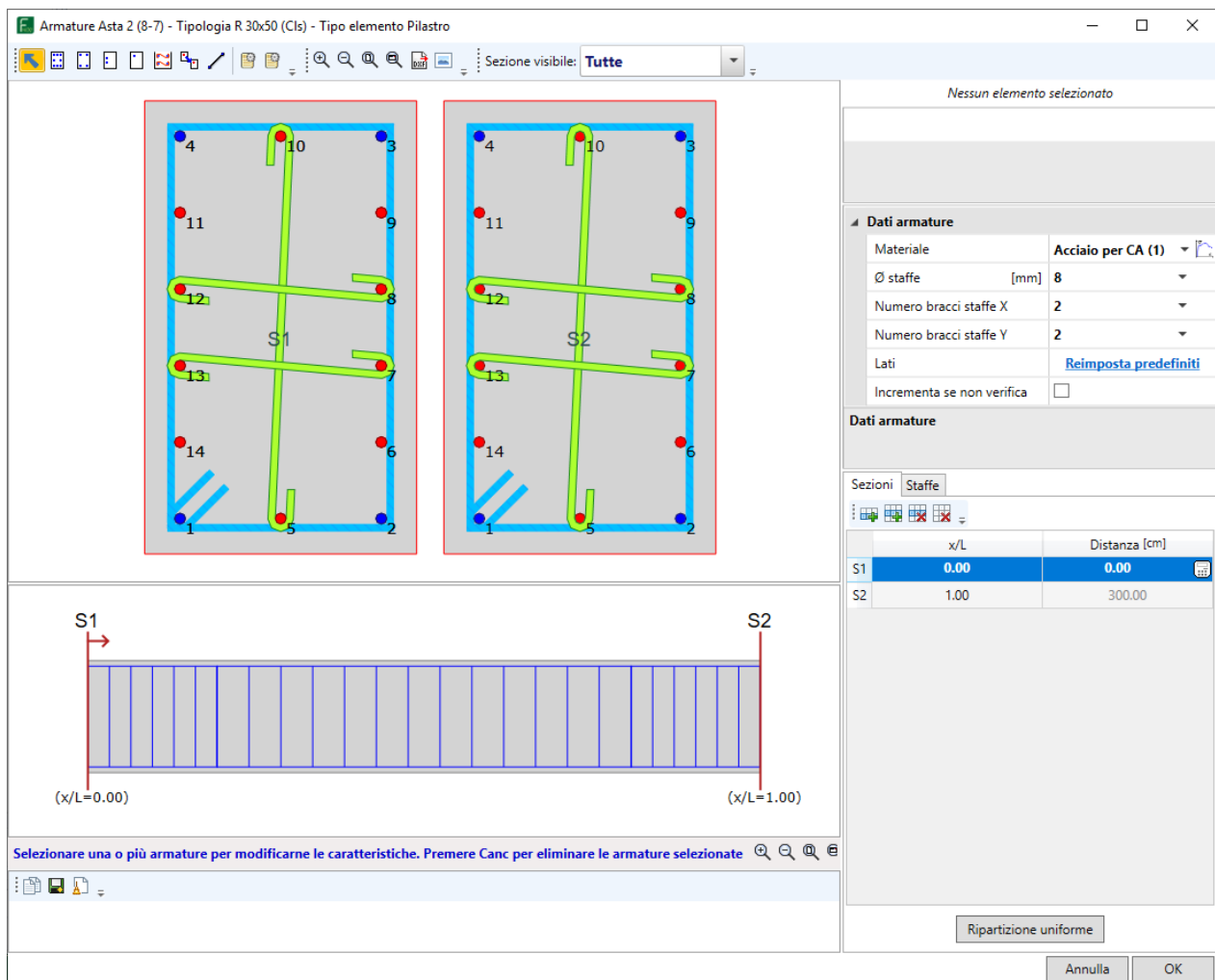
- R (Fattore di pitting)

Nel caso di **Cloruri** sono presenti gli stessi parametri della corrosione localizzata a meno della penetrazione  $x$ , la quale sarà calcolata in funzione della concentrazione dei cloruri elaborata mediante il "problema della diffusione".

### 2.1.2.9 Armature




Per inputare l'armatura è necessario cliccare sul comando **"Armatura"**. Si avvia la finestra di input per l'armatura sull'asta.








Sulla parte superiore dell'ambiente **"Armature Asta"** sono presenti i seguenti pulsanti:


- **Seleziona armatura** . Selezionata una o più armature è possibile modificare le seguenti caratteristiche nella parte destra della finestra precedente:

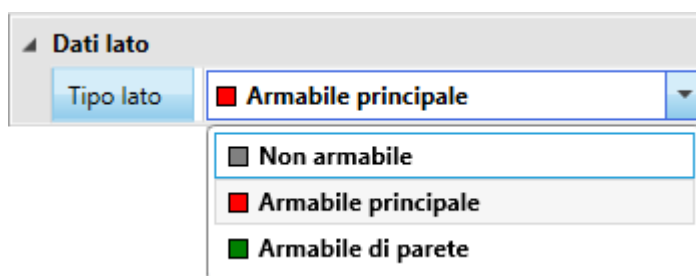
Armatura		
X [cm]	-11.10	
Y [cm]	12.66	
Ø [mm]	12	▼
Utente	<input type="checkbox"/>	









- **X** : Coordinata X della/e barra/e rispetto alla sezione;
- **Y** : Coordinata Y della/e barra/e rispetto alla sezione;
- **Ø** : Diametro della/e barra/e;
- **Utente**. Consente il posizionamento libero dell'armatura.
- **Posizionamento automatico di tutte le armature** . Cliccare nella sezione iniziale di un tratto per il posizionamento automatico dell'armatura longitudinale; Al click su questo pulsante, nella parte destra della finestra principale, è possibile settare le seguenti caratteristiche per il posizionamento automatico delle armature:

Dati input armature	
Diametro [Ø]	12 [mm]
Num. armature lato	3

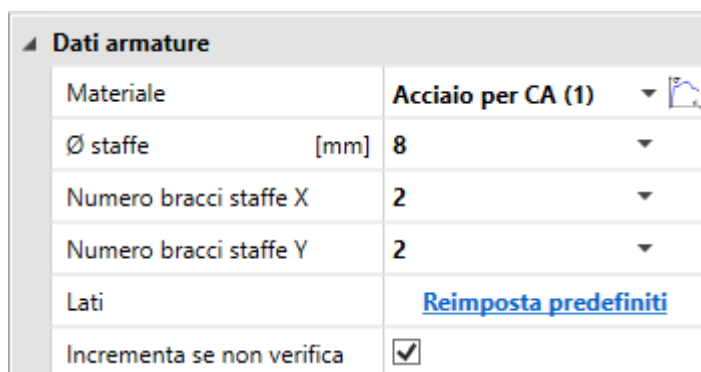
- **Diametro [Ø]**. Diametro dell'armatura da inserire;
- **Num. armature lato**. Numero delle armature da inserire per lato.
- **Posizionamento automatico di tutte le armature agli spigoli** . Cliccare nella sezione iniziale di un tratto per il posizionamento automatico dell'armatura agli spigoli; Al click su questo pulsante, nella parte destra dell'ambiente principale si apre la finestra "Dati input armature" (come sopra) in cui è possibile settare il diametro delle armature da inserire agli spigoli;
- **Posizionamento automatico di tutte le armature lungo un lato** . Cliccare su un lato nella sezione iniziale di un tratto per il posizionamento automatico dell'armatura lungo un lato della sezione stessa; Al click su questo pulsante, nella parte destra dell'ambiente principale si apre la finestra "Dati input armature" (come sopra) in cui è possibile settare il diametro e il numero delle armature da inserire per lato;
- **Inserimento singola armatura** . Cliccare in un punto per la posizione libera dell'armatura all'interno della sezione iniziale di un tratto; Al click su questo pulsante, nella parte destra dell'ambiente principale si apre la finestra "Dati input armature" (come sopra) in cui è possibile settare il diametro delle armature da inserire;
- **Inserimento/Selezione/Cancellazione armature** . Cliccare due armature su un tratto per inserire una legatura. Selezionare a box una o più legature esistenti per eliminarle. Per attivare questo pulsante, e quindi gestire manualmente le legature, bisogna disattivare il campo "Incrementa se non verifica";
- **Copia armature tra tratti** . Cliccare sul tratto sorgente e successivamente sugli elementi di destinazione. Completare con il tasto destro del mouse per confermare;

- **Selezione dei lati** . Selezionare uno o più lati per modificarne le caratteristiche; Selezionati uno o più lati è possibile scegliere tra:



- **Non armabile.** Il lato selezionato non verrà armato;
- **Armabile principale.** Il lato selezionato verrà considerato come armabile principale;
- **Armabile di parete.** Il lato selezionato verrà armato con ferri di parete.
- **Disposizione armatura minima da normativa** . Dispone l'armatura minima (sia longitudinale che trasversale) di normativa;
- **Disposizione legature da normativa** . Nel caso di pilastri, dispone le legature minime di normativa; Per attivare questo pulsante, e quindi gestire manualmente le legature, bisogna disattivare il campo "Incrementa se non verifica";
- **Zoom in** . Effettua uno zoom in avanti;
- **Zoom out** . Effettua uno zoom indietro;
- **Zoom estensione** . Effettua uno zoom in maniera tale da rendere visibili tutti gli elementi ottimizzandone le dimensioni rispetto alla finestra dell'interfaccia;
- **Zoom finestra** . Effettua uno zoom in avanti per gli elementi racchiusi nella finestra;
- **Esporta nel formato DXF** . Esporta nel formato DXF la finestra corrente;
- **Esporta nel formato JPG** . Esporta nel formato JPG la finestra corrente;

#### Dati armature



Dati armature	
Materiale	Acciaio per CA (1)
Ø staffe [mm]	8
Numero bracci staffe X	2
Numero bracci staffe Y	2
Lati	<a href="#">Reimposta predefiniti</a>
Incrementa se non verifica	<input checked="" type="checkbox"/>

- **Materiale.** Materiale da assegnare alle armature dell'elemento;
- **Ø staffe.** Diametro delle staffe;




- **Numero Bracci X.** Numero dei bracci delle staffe in direzione X;
- **Numero Bracci Y.** Numero dei bracci delle staffe in direzione Y;
- **Lati + Reimposta predefiniti.** Cliccando su **"Reimposta predefiniti"** nelle sezioni delle travi verrà re-inputata l'armatura di parete predefinita;
- **Incrementa se non verifica.** Gli elementi per i quali si è inserita l'armatura, nel calcolo di "Elaborazione Verifiche" verranno sottoposti a verifica. Qualora l'esito delle verifiche dovesse risultare negativo, per gli elementi per i quali il campo **"Incrementa se non verifica"** risulta selezionato il programma incrementa l'armatura inputata riprogettandola. Nel caso in cui si vogliono gestire manualmente le legature dei pilastri è necessario disattivare questo campo.




### Concetto di "blocco" per il posizionamento dell'armatura trasversale

Il **"blocco"** rappresenta un concio di trave per il quale la disposizione delle staffe rimane costante. Ogni blocco staffe è caratterizzato da un'ascissa della sezione di inizio concio (normalizzata rispetto alla luce dell'elemento) e da un passo staffe.

Il numero minimo di blocchi staffe all'interno di un elemento longitudinale è pari a 1 e corrisponde al caso di distribuzione uniforme di staffe. Il numero massimo di blocchi è pari a 3.

### Operazioni sui blocchi (Staffe)

Sezioni		Staffe
		
		
		
	x/L	Passo [cm]
1	0.00	8.00
2	0.12	15.00
3	0.88	8.00

- **Inserisci un nuovo blocco di staffe** . Inserisce un nuovo blocco di staffe in fondo alla lista;
- **Inserisci un nuovo blocco di staffe prima del blocco di staffe selezionato** . Inserisce un nuovo blocco di staffe prima del blocco selezionato;
- **Elimina il blocco di staffe selezionato** . Elimina il blocco di staffe selezionato;
- Pulsante **"Ripartizione Uniforme"**. Ripartisce uniformemente i blocchi di staffe lungo la trave.

### Parametri input Blocco

- **x<sub>l</sub>.** Posizione dell'ascissa normalizzata della sezione di inizio del blocco di staffe (espressa in percentuale rispetto alla lunghezza dell'elemento).
- **Passo.** Passo delle staffe all'interno del blocco (espresso in cm).

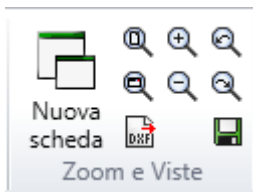
Sulla parte inferiore destra dell'ambiente **"Armature Aste"** sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Annulla.** Chiude la finestra **"Armature Aste"** annullando tutte le modifiche apportate ai parametri della stessa.
- **Ok.** Chiude la finestra confermando le modifiche apportate ai parametri della stessa.










### 2.1.2.10 Zoom e Viste

#### Zoom e Viste

E' il menù che contiene gli strumenti per aprire una nuova vista nel progetto corrente e le operazioni di zoom finestra , zoom avanti, zoom indietro, l'esportazione in Dxf. Esiste inoltre la possibilità di salvare il punto di vista della struttura e il livello di zoom e richiamarle successivamente.



I comandi presenti in quest'ambiente sono:

- **Nuova scheda di input** . Consente di aprire una nuova scheda del progetto corrente;
- **Zoom to fit** . Effettua uno zoom in maniera tale da rendere visibili tutti gli elementi ottimizzandone le dimensioni rispetto alla finestra dell'interfaccia;
- **Zoom finestra** . Effettua uno zoom in avanti per gli elementi racchiusi nella finestra;
- **Zoom in** . Effettua uno zoom in avanti;
- **Zoom out** . Effettua uno zoom indietro;
- **Imposta la vista precedente** ;
- **Imposta la vista successiva** ;
- **Esporta su DXF** . Esporta nel formato DXF la finestra corrente;
- **Salva la vista attuale** . Salva il punto di vista della struttura e il livello di zoom della finestra corrente.

### 2.1.3 Carichi e diffusione

E' il menu che consente di operare personalizzazioni sulle condizioni di carico e le condizioni di diffusione.

#### 2.1.3.1 Condizioni di carico sezione

##### Condizioni di carico sezione



Consente la definizioni dei carichi nodali da applicare ai punti di scarico definiti (pilastro compreso). Per la definizione dei carichi cliccare sul nodo di input e verrà visualizzata la seguente schermata:



Condizioni di Carico Sezione S1

Struttura  
SLU  
SLV

	Azione	Attiva	Durata	N [kN]	T2 [kN]	T3 [kN]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	M3 [kNm]
1	CC	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	100.00	0.00	254.00	152.00	100.00	0.00
2	CC (0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	CC (1)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	CC (2)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	CC (3)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	CC (4)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	CC (5)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	CC (6)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	CC (7)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	CC (8)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	CC (9)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	CC (10)	<input checked="" type="checkbox"/>	Permanente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Annulla OK

### 2.1.3.2 Condizioni diff. sezione

#### Condizione di diff. sezione



Consente la definizione della concentrazione dei cloruri iniziale  $c_0[\%]$ .

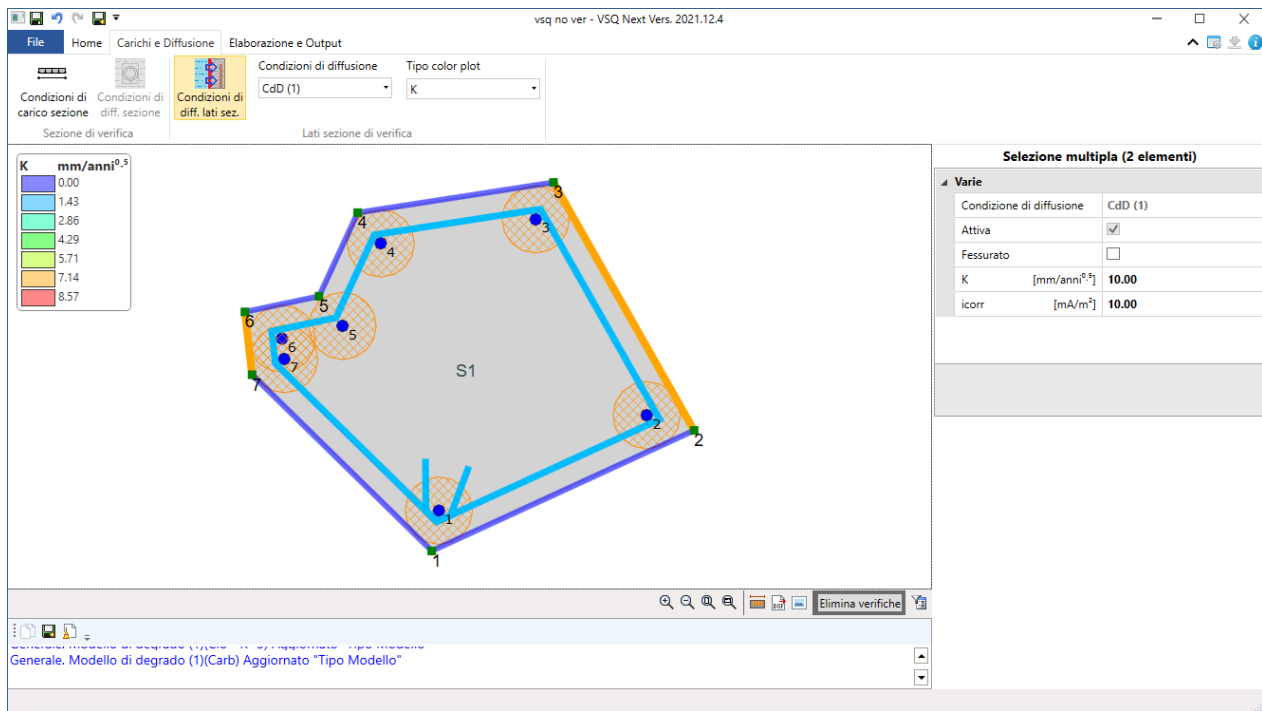
Il pulsante viene attivato solo se il tipo di degrado è "Cloruri".

### 2.1.3.3 Condizioni diff. lati. sez.

#### Condizione diff. lati sezione



Consente la definizione sui vari lati dei parametri per lo studio della diffusione. Dopo l'attivazione del comando è sufficiente selezionare i vari lati e modificare i parametri proposti in funzione del tipo di degrado presente. La selezione dei lati è attiva se il lato viene colorato di giallo.



Nel caso di degrado da "Cloruri" il parametro modificabile è la "concentrazione dei cloruri superficiale del lato" (**cs**). Nel caso di "Carbonatazione" i parametri presenti sono:

- **K** : coefficiente di carbonatazione;
- **icorr** : intensità di corrente;

Il pulsante viene attivato solo se il tipo di degrado è "Cloruri" o "Carbonatazione".


## 2.1.4 Elaborazione


E' il menù predisposto alle elaborazioni di calcolo e verifiche.

### 2.1.4.1 Calcolo

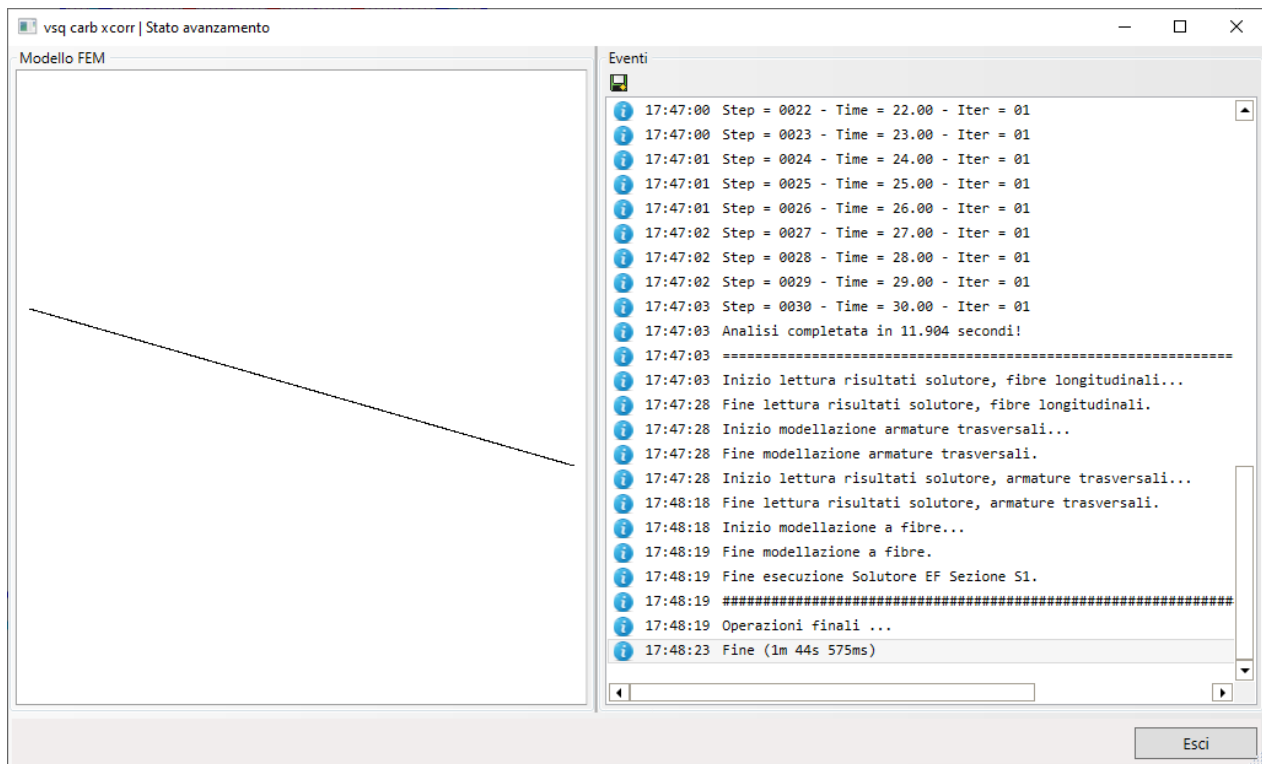


Il pulsante **"Calcolo"** ha la funzione di avviare l'analisi del modello. Prima di avviare il calcolo il programma effettua i controlli di validazione. Se non sono presenti anomalie viene avviato il calcolo. Se il controllo riscontra anomalie le stesse vengono segnalate come "Errori di modello" o "Avvisi" nella barra delle segnalazioni.

L'errore di modello è contraddistinto da una stringa che descrive l'errore stesso e dal simbolo  posto alla sinistra dello stesso. L'errore nel modello non consente di procedere con il calcolo, pertanto l'errore va eliminato dal modello strutturale.

L'avviso è contraddistinto da una stringa che descrive l'errore stesso e dal simbolo  posto alla sinistra dello stesso. L'avviso consente di procedere con il calcolo.

Durante l'elaborazione vengono fornite informazioni sulla fase di avanzamento del calcolo.



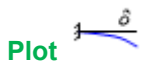
#### 2.1.4.2 Verifiche



##### Verifiche

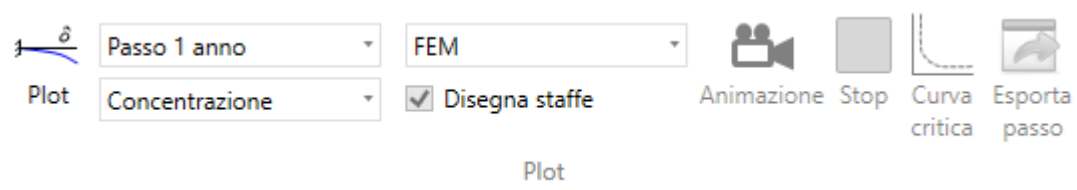
Il pulsante "**Verifiche**" consente l'elaborazione delle verifiche strutturali. Nell'ambiente inferiore, destinato alla descrizione degli eventi, vengono riportati le verifiche che hanno generato esito negativo.

#### 2.1.4.3 Plot (Risultati)



##### Plot

La visualizzazione dei risultati dell'analisi viene attivata cliccando sul pulsante "Plot" e utilizzando i vari comandi della barra dedicata:

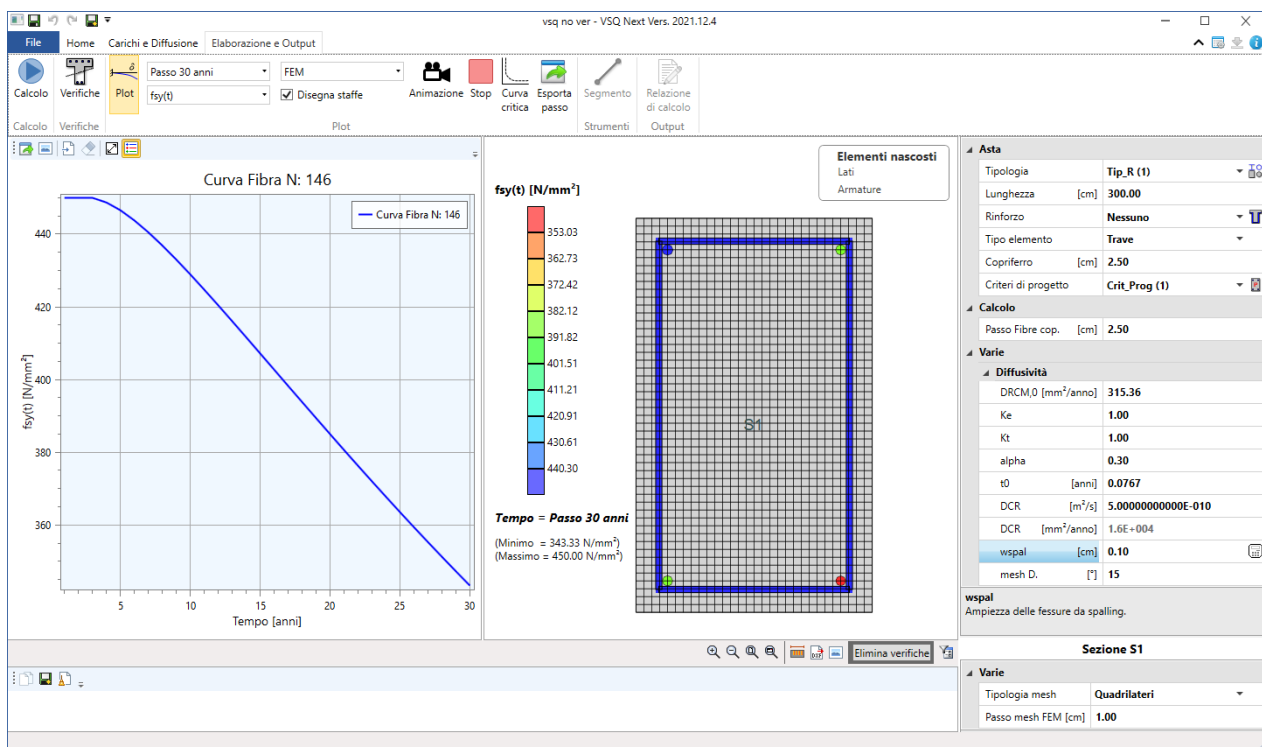


Un volta scelto il "passo di calcolo" da visualizzare sarà possibile controllare i risultati mediante colormap per i vari **parametri**:

- **Concentrazione** (dei cloruri);
- **Carbonatazione** (evidenza zone di carbonatazione);
- **icorr(t)** : intensità di corrente;
- **vcorr(t)** : velocità di corrosione;
- **δ(R)** : indice di danno del diametro;
- **xcorr(R)** : profondità di penetrazione della corrosione;
- **δAs(t)** : coefficiente di degradazione della sezione;
- **As[δ(t)]** : area delle barre degradata in funzione del coefficiente di degradazione;

- $As[\delta(t)]/As_0$  : rapporto tra area delle barre degradata e area iniziale;
- $\delta fs(t)$  : coefficiente di degradazione della resistenza delle barre;
- $fsy(t)$  : resistenza di snervamento degradata delle barre;
- $fsu(t)$  : resistenza a rottura degradata delle barre;
- $\delta \epsilon su(t)$  : coefficiente di degradazione della deformazione ultima delle barre;
- $\epsilon su(t)$  : deformazione ultima delle barre degradata;
- $\epsilon su(t)/\epsilon su_0$  : rapporto tra deformazione ultima delle barre degradata e iniziale;
- $w(t)$  : ampiezza delle fessure la passo  $t$ ;
- **Stato fessurativo** : "Non Fessurato" ( $w = 0$ ), "Fessurato" ( $w < 0.05$ ), "Splitting", "Spalling";
- $\epsilon t(t)$  : deformazione del calcestruzzo fessurato;
- $fc,rid(t)$  : resistenza a compressione del calcestruzzo degradato;
- $fc,rid(t)/fc,0$  : rapporto tra la resistenza a compressione del calcestruzzo degradato e la resistenza iniziale;

Cliccando su una delle fibre del dominio è possibile visualizzare il **grafico** nel tempo del parametro scelto. Nella figura seguente viene riportato, per esempio, l'andamento della resistenza a trazione di una delle barre.



Dal menù a tendina posta a fianco al passo è possibile scegliere il **tipo di modello** da visualizzare: FEM (per analisi diffusiva) o fibre (per analisi meccanica).

Il pulsante **"Animazione"** consente di scorrere automaticamente i vari passi di calcolo e visualizzare i valori sulla sezione.

Il pulsante **"Curva critica"** consente di visualizzare la curva critica relativa alla concentrazione dei cloruri definita dal valore limite critico ( $c_{crit}\%$ ) contenuto nella finestra "Condizioni di diffusione".

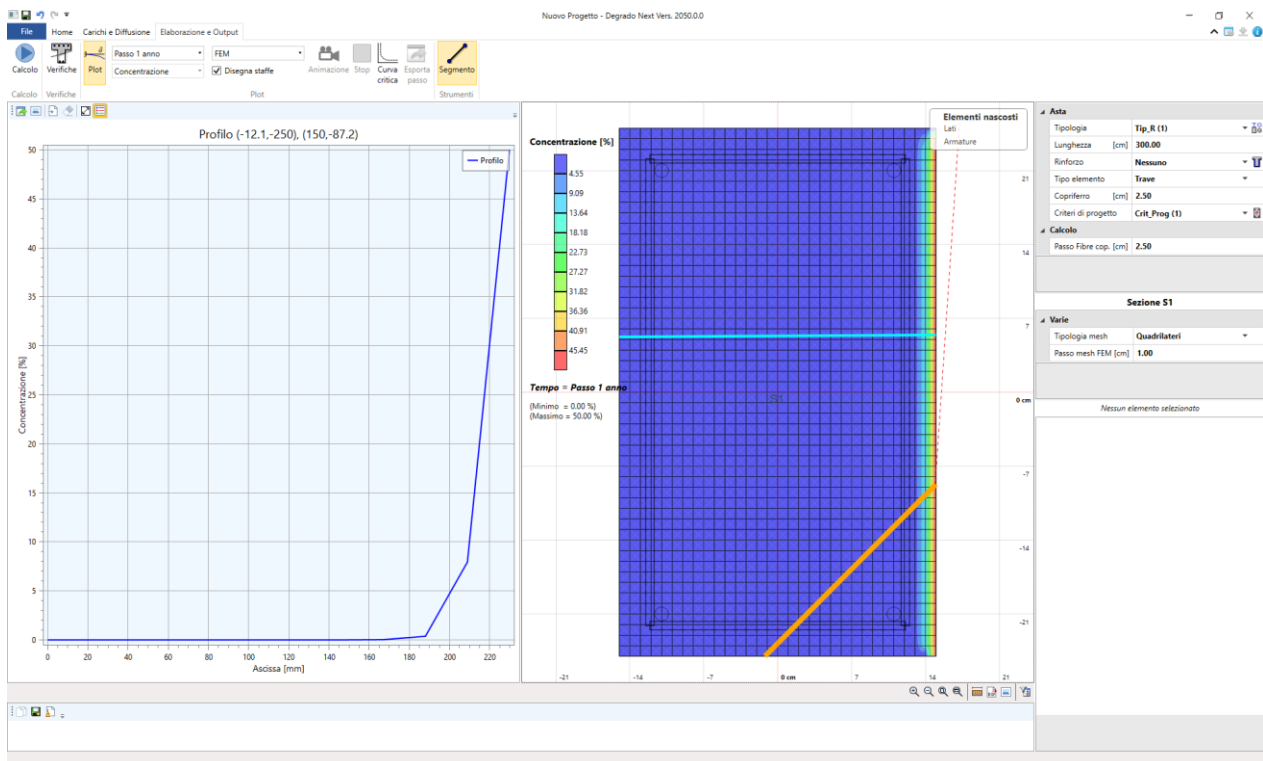
Il pulsante **"Esporta passo"**, consente di esportare lo stato di degrado di un singolo passo in modo da importarlo in FaTA Next.

#### 2.1.4.4 Strumenti

Nel gruppo "Strumenti" è presente la funzione "Segmento", attivabile mediante il seguente pulsante:



Mediante questo comando è possibile creare un grafico del parametro "Concentrazione" creato a partire da una linea di sezione. Per realizzare la linea è sufficiente cliccare sulla figura della sezione:



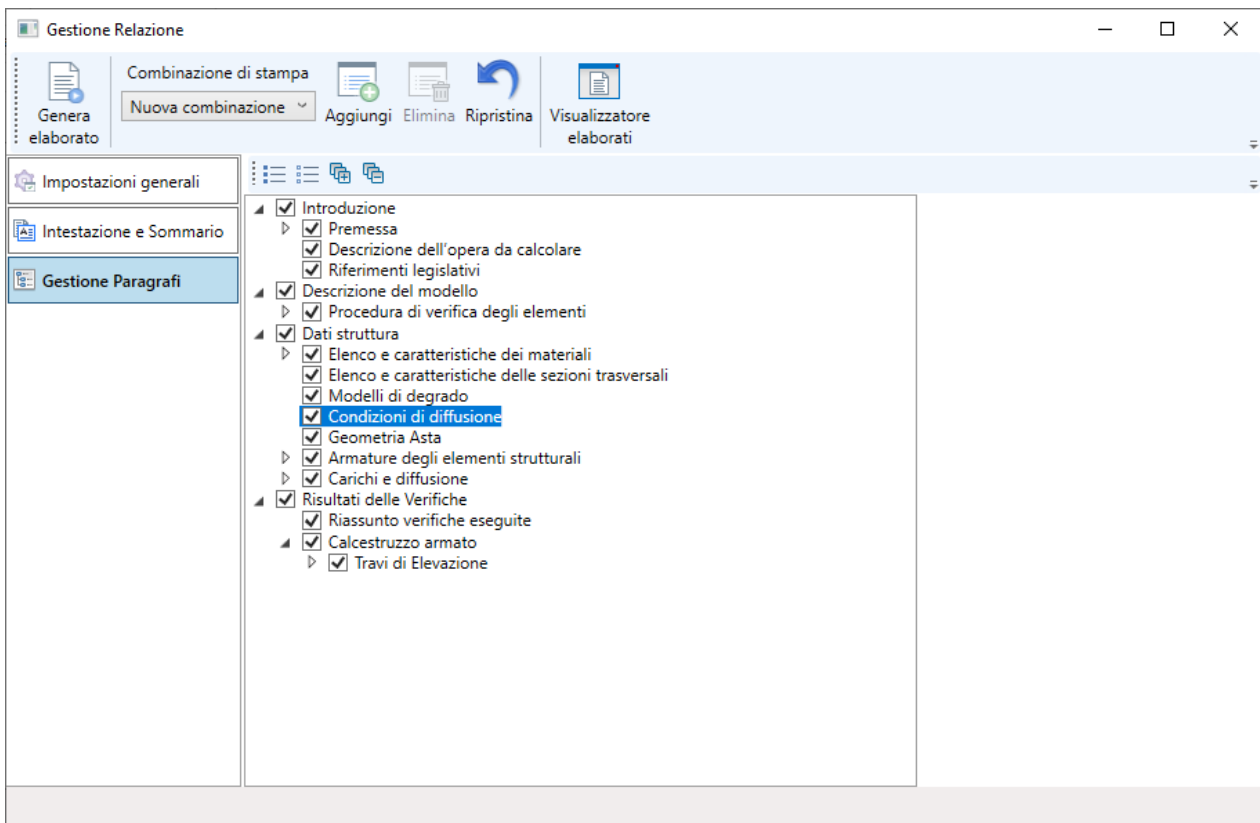
Dopo aver creato i segmenti sarà possibile selezionarli per visualizzare/esportare il grafico corrispondente.

#### 2.1.4.5 Relazione di calcolo

##### Relazione di calcolo

Il pulsante **"Relazione di calcolo"** consente di definire le operazioni relative alla creazione della relazione di calcolo.

La relazione di calcolo può essere creata in formato standard .docx (Documento di Word) oppure .pdf (File PDF). In automatico viene richiamato l'editor installato sul pc al quale sono associati i file .docx oppure .pdf. Alla pressione del pulsante corrispondente viene visualizzato il seguente ambiente:








Le opzioni presenti consentono di personalizzare la relazione attraverso le scelte relative a:

- Impostazioni generali;
- Intestazione e Sommario;
- Gestione Paragrafi.





La combinazione di stampa è rappresentata da un elenco di paragrafi da stampare. Nell'ambiente "Gestione Paragrafi" si ha la possibilità di personalizzare le combinazioni di stampa operando una selezione dalla lista ad albero.

Nella parte superiore dell'ambiente "Gestione Relazione di calcolo" sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Genera elaborato** . Genera la relazione di calcolo in un unico file.
- **Combinazione di stampa**. Consente di selezionare una combinazione di stampa dalla lista delle combinazioni di stampa precedentemente create.
- **Aggiungi combinazione di stampa** . Consente di salvare nella lista "Combinazioni di stampa" la combinazione di stampa creata nell'ambiente "Gestione Paragrafi".
- **Elimina combinazione di stampa** . Consente di eliminare dalla lista "Combinazioni di stampa" la combinazione di stampa selezionata.
- **Ripristina combinazione di stampa** . Ripristina il default nella selezione dei paragrafi da stampare.
- **Visualizzatore elaborati** . Consente la visualizzazione di file formato docx

Nell'ambiente "Gestione Paragrafi" l'elenco dei paragrafi della relazione è riportato in una struttura ad albero. Ogni voce dell'elenco ad albero può essere selezionata/deselezionata. Nella parte superiore sono presenti i

seguenti pulsanti:

- **Seleziona tutto** . Seleziona tutte le voci dell'elenco ad albero;
- **Deseleziona tutto** . Deseleziona tutte le voci dell'elenco ad albero;
- **Espandi tutto** . Espande l'elenco ad albero visualizzando i paragrafi annidati;
- **Comprimi tutto** . Comprime l'elenco dei paragrafi.

Nell'ambiente "Impostazioni generali" sono presenti le seguenti voci:

Impostazioni generali	Varie
Intestazione e Sommario	Chiedi dove salvare l'elaborato <input type="checkbox"/>
Gestione Paragrafi	Apri elaborato dopo salvataggio <input checked="" type="checkbox"/>
	Formato elaborati Documento di Word (*.docx) ▼
	Modalità apertura elaborato Programma predefinito ▼

- **Chiedi dove salvare la relazione.** Se attivo viene chiesto il percorso dove salvare la relazione;
- **Apri elaborato dopo salvataggio.** Se attivo l'elaborato viene aperto automaticamente subito dopo il salvataggio del file;
- **Formato elaborati.** Consente di scegliere se salvare l'elaborato in formato "Documento di Word (\*.docx)" oppure "PDF (\*.pdf)";

Documento di Word (\*.docx) ▼

Documento di Word (\*.docx)

File PDF (\*.pdf)

- **Modalità apertura elaborato.** Consente di scegliere la modalità di apertura del file, scegliendo tra "Programma predefinito" oppure "Visualizzatore elaborati".

Programma predefinito ▼

Programma predefinito

Visualizzatore elaborati

Nell'ambiente "Intestazione e Sommario" sono presenti le seguenti voci:

Impostazioni generali	Varie
Intestazione e Sommario	Inserisci intestazione superiore <input checked="" type="checkbox"/>
Gestione Paragrafi	Inserisci numeri di pagina <input checked="" type="checkbox"/>
	Inserisci copertina <input checked="" type="checkbox"/>
	Num. iniziale capitoli 1
	Sommario
	Inserisci sommario <input checked="" type="checkbox"/>
	Posizione sommario Inizio documento ▼
	Aggiorna sommario all'apertura <input checked="" type="checkbox"/>

- **Inserisci intestazione superiore.** Se attivo su ogni pagina verrà stampata l'intestazione che avrà per dicitura "Relazione" + in nome del committente;
- **Inserisci numeri di pagina.** Se attivo i numeri di pagina saranno stampati a piè di pagina;

- **Inserisci copertina.** Se attivo verrà creata la copertina della relazione;
- **Num. iniziale capitoli.** Numerazione di partenza dei vari capitoli attivati per la relazione;
- **Inserisci sommario.** Se attivo alla fine della relazione verrà creato il sommario della relazione;
- **Posizione sommario.** Consente di scegliere se posizionare il sommario a inizio o a fine documento;
- **Aggiorna sommario all'apertura.** Se il formato del file è "Documento di Word (\*.docx)" attiva la richiesta di aggiornamento del sommario all'apertura. In caso di problemi nell'apertura del file, con alcune versioni di software specifici, disattivare questa opzione.

## 3 Cenni teorici sulla corrosione (M. Felitti - F. Oliveto)

---

### 3.1 La corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato

Le strutture in calcestruzzo armato (in seguito strutture in c.a.), realizzate all'inizio del secolo scorso, oggi presentano evidenti stati di degrado dovuti, essenzialmente, alla intrinseca vulnerabilità dei due materiali alle azioni ambientali. Per contenere gli effetti di una tale vulnerabilità occorrerebbe, a monte, una adeguata prescrizione del calcestruzzo in funzione dell'aggressività ambientale e, successivamente, una manutenzione programmata dei manufatti. Invece, ancora oggi, nonostante i meccanismi di invecchiamento e danneggiamento del calcestruzzo nel tempo siano ormai noti, leggiamo su alcuni capitolati incongruenze tra le prestazioni del calcestruzzo e l'ambiente in cui l'opera deve nascere, oppure, incongruenze tra le classi di consistenza del calcestruzzo e l'elemento strutturale da gettare.

Nell'ambito della Building Pathology, molti sono i segnali (sintomi) riconducibili al degrado delle strutture (patologie). Fatta una ipotesi preliminare del danno, occorre redigere il piano di indagine che elenchi il tipo di prove distruttive e non, da eseguirsi sulla struttura. Acquisiti i risultati dei test è poi possibile procedere alla conferma della diagnosi per l'individuazione degli interventi necessari a rimuoverne, ove possibile, le cause di degrado.

### 3.2 Il processo elettrochimico di base

La corrosione è un processo di natura elettrochimica. Nel caso del calcestruzzo armato l'elettrolita è la soluzione presente nei pori del calcestruzzo. Si tratta, sostanzialmente, di una soluzione di idrossido di calcio, sodio e potassio con un  $\text{pH} > 13$ . In questo ambiente basico, il ferro si ricopre di un film protettivo dello spessore di qualche nanometro. In presenza di anidride carbonica, il  $\text{pH}$  del calcestruzzo scende a valori  $< 9$ , provocando una distruzione generalizzata del film protettivo.

La presenza dei cloruri, invece, ne provoca una rottura localizzata, ma se il loro tenore raggiunge valori molto elevati tale danneggiamento può interessare anch'esso l'intera superficie. In entrambi i casi, la corrosione si innesca nelle parti di struttura a contatto diretto con acqua e ossigeno.

In Figura1 viene illustrato il meccanismo elettrochimico che è alla base dei processi corrosivi.



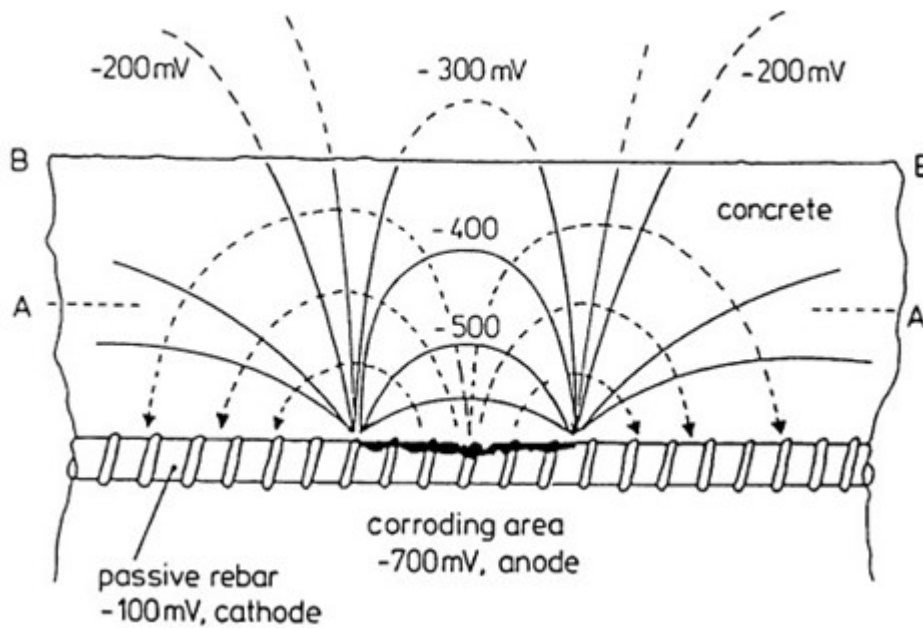


Figura 1: Processo elettrochimico relativo alla corrosione di una barra in acciaio con indicazione dei potenziali

Quando un conduttore metallico, come la barra di armatura, è immerso in una soluzione acquosa o in un mezzo poroso come il calcestruzzo, permeato d'acqua contenente sali disciolti, la presenza di eterogeneità chimico-fisiche, nella parte metallica, può generare differenze di potenziale tra le diverse parti del sistema. Si formano così zone anodiche e zone catodiche, per via delle quali si origina un funzionamento analogo a quello delle pile di generazione della corrente elettrica. La corrosione avviene, infatti, nelle regioni anodiche, come si evince dalla Figura 1.

Nella vita delle strutture in cemento armato si possono distinguere due fasi della corrosione:

- fase di INNESCO, nella quale si sviluppano tutti i fenomeni che portano alla depassivazione delle armature;
- fase di PROPAGAZIONE, in cui si avvia il degrado che dipende sostanzialmente dall'umidità e dalla temperatura in cui sono immerse le strutture.

Al loro procedere, si assiste ad una lenta alterazione dei materiali con fessurazione del calcestruzzo e corrosione delle barre di armatura che, in assenza di interventi di manutenzione programmata, possono portare fino al collasso strutturale.

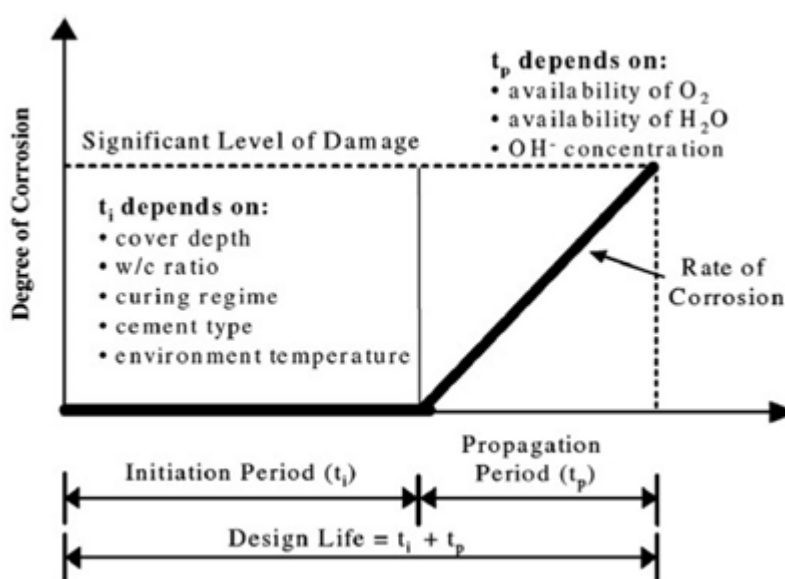


Figura 2 Periodo di innesco e periodo di propagazione della corrosione in strutture in cemento armato (Tuutti, 1982)

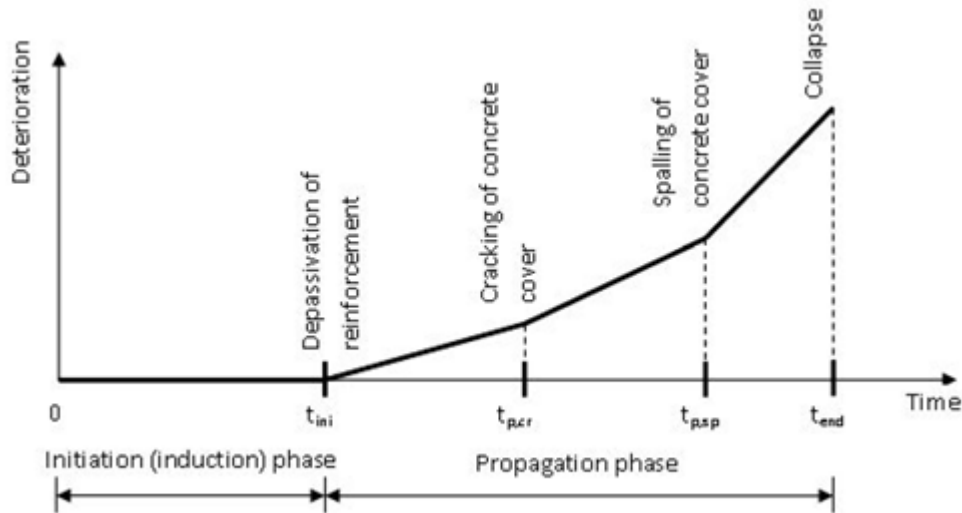
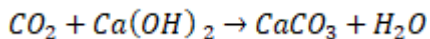


Figura 3 Fasi di deterioramento di una struttura fino al possibile collasso (Cervenka Consulting)

### 3.3 Diffusione dell'anidride carbonica in un calcestruzzo non fessurato

L'anidride carbonica è presente sia nell'acqua che nell'aria in percentuali variabili in funzione delle condizioni ambientali e di inquinamento. Quando l'anidride carbonica viene a contatto con i manufatti in calcestruzzo armato, neutralizza i componenti alcalini presenti nel calcestruzzo e il pH passa da valori >13 a valori <9, riducendo il pH del calcestruzzo "fisiologicamente" basico. Tale processo è noto come carbonatazione.

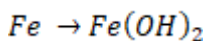
La reazione di carbonatazione è la seguente:



Essa non produce danni direttamente al calcestruzzo ma, riducendo il pH della soluzione nei pori, comporta che questo non assicuri le condizioni di passività alle barre di armatura predisponendo le condizioni chimico-fisiche favorevoli alla corrosione delle stesse.

Quando la carbonatazione penetra l'intero spessore del copriferro, il film protettivo (ossido ferrico) delle barre di armatura, diventa poroso ed incoerente e non più in grado di bloccare l'ingresso dell'ossigeno e dell'acqua al substrato metallico. Il ferro si trasforma in ruggine, con aumento di volume pari a circa 4 volte il volume del ferro non corroso, e il copriferro si fessura.

Per dirla con Mario Collepari, l'anidride carbonica ha un ruolo di "complice", ma i veri "killer", nei confronti delle barre di armatura, sono l'ossigeno O<sub>2</sub> e l'acqua H<sub>2</sub>O, indispensabili al processo di corrosione:



Tale reazione non avviene nelle opere in cemento armato completamente e permanentemente immerse in acqua, per la mancanza di ossigeno e, nelle opere permanentemente collocate in ambienti "asciutti", per mancanza di acqua.

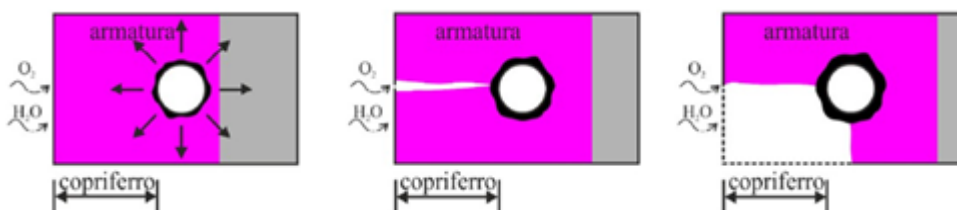


Figura 4 Evoluzione dello stato fessurativo nel calcestruzzo per effetto della corrosione della barra di armatura

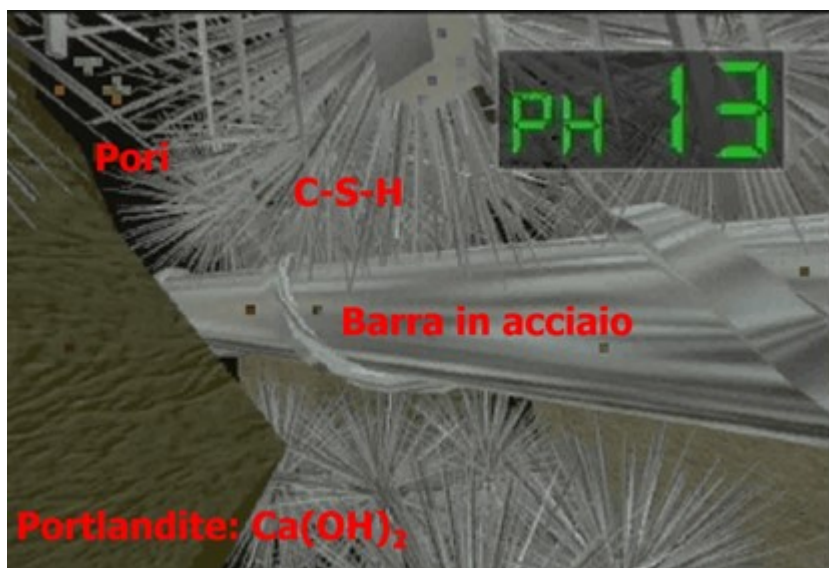


Figura 5 Condizioni iniziali di pH 13 in cui si trova la barra di armatura prima della depassivazione: in tali condizioni si forma – sulla barra – un sottile film di ossido protettivo FeOOH (Mapei-M. Collepari, modificata)

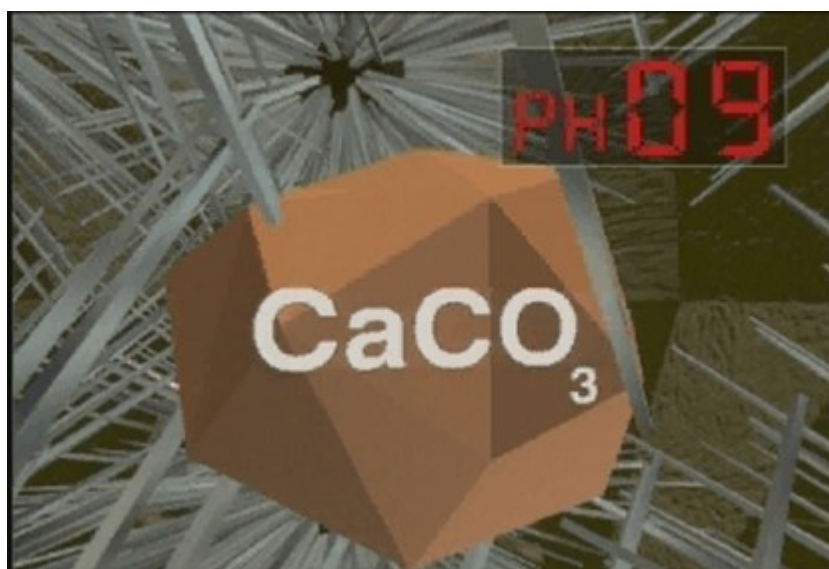


Figura 6 Condizioni di depassivazione a pH < 09 (Mapei-M. Collepari, modificata)

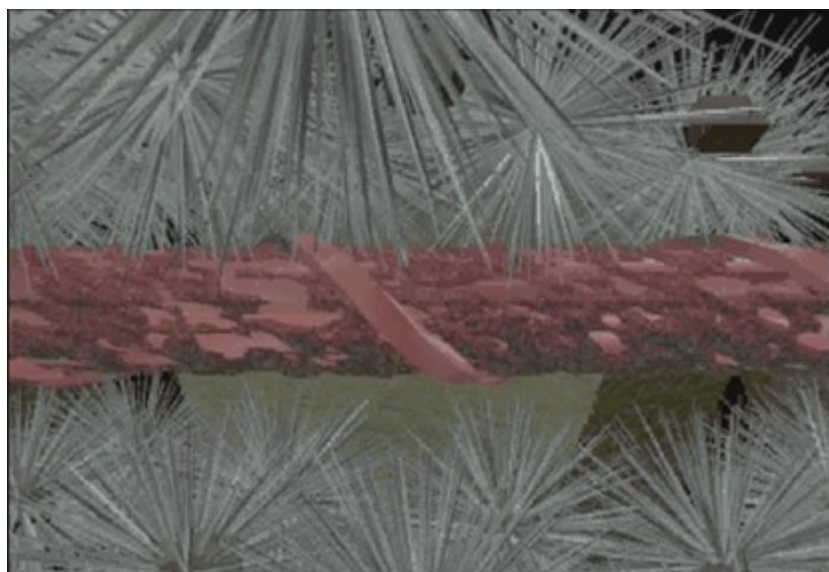


Figura 7 Condizioni di depassivazione a pH < 09 con distruzione del film protettivo sulle barre di armatura (Mapei-M. Collepari, modificata)



Figura 8 Esempio di corrosione uniforme su una trave in c.a. promossa dalla carbonatazione in un fabbricato di civile abitazione realizzato negli anni cinquanta

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera, in tenori variabili da 0,04% in ambiente rurale a 0,2% in ambiente urbano, quando viene a contatto con il calcestruzzo tende a neutralizzare, a partire dagli strati più esterni, i componenti alcalini.

Quando il fronte carbonatato raggiunge le armature, facendo loro perdere la condizione di passività, la corrosione può avere inizio in presenza di acqua e ossigeno. Se la struttura è esposta all'atmosfera, vi è sempre un apporto sufficiente di ossigeno e la cinetica della corrosione è dominata dalla resistività del calcestruzzo, quindi dal suo contenuto d'acqua. All'aumentare dell'umidità, diminuisce la resistività e quindi aumenta la velocità di corrosione.

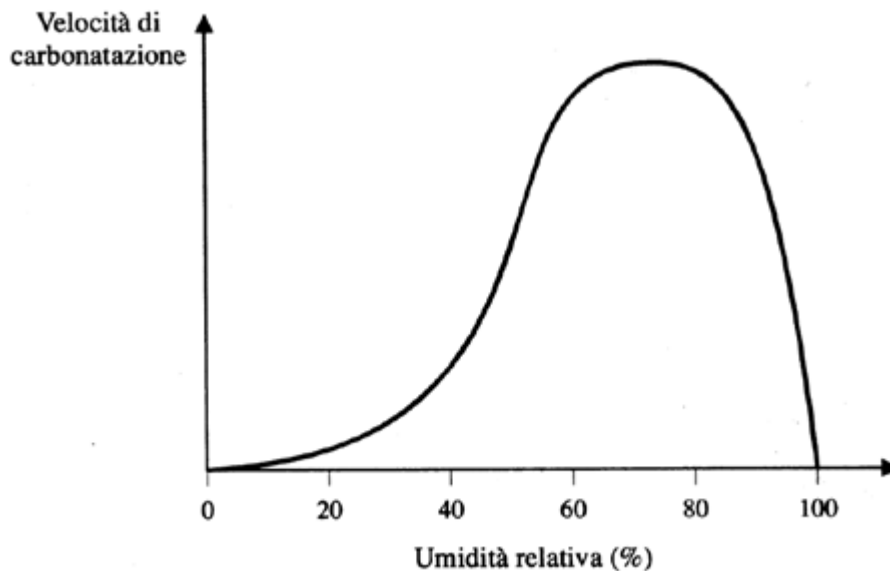


Figura 9 Andamento della velocità di carbonatazione al variare dell'umidità relativa. L'intervallo di umidità più pericoloso per la carbonatazione è compreso tra 50 e 80% (Pedferri e Bertolini, 2000)

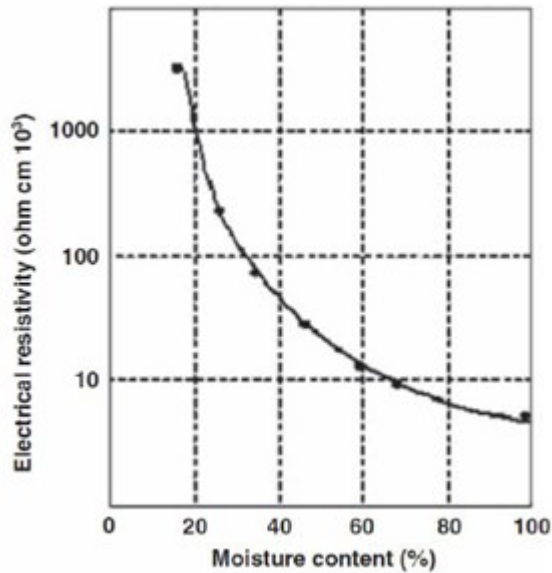


Figura 10 Dipendenza della resistività elettrica del calcestruzzo dall'umidità relativa: aumenta l'umidità → diminuisce la resistività (Gjörv, 2009)

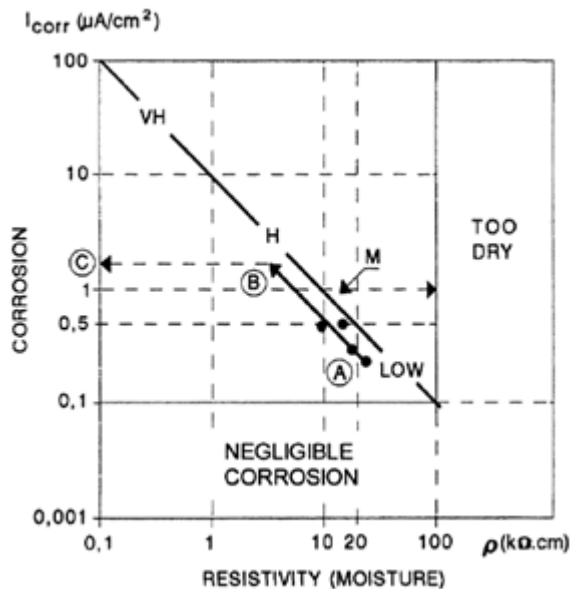


Figura 11 Dipendenza della velocità di corrosione per carbonatazione (attraverso  $I_{corr}$ ) dalla resistività elettrica del calcestruzzo: diminuisce la resistività → aumenta la velocità di corrosione (Andrade)

La reazione di carbonatazione inizia sulla superficie esterna e la sua velocità di penetrazione diminuisce nel tempo a mano a mano che avanza in profondità. La profondità di carbonatazione può essere ragionevolmente descritta da una legge proporzionale alla radice quadrata del tempo (andamento parabolico):

$$s = K\sqrt{t}$$

dove:

**s** è lo spessore (in mm) di calcestruzzo carbonatato;  
**t** è il tempo (in anni);  
**K** è il coefficiente di carbonatazione (in mm/anni<sup>0.5</sup>).



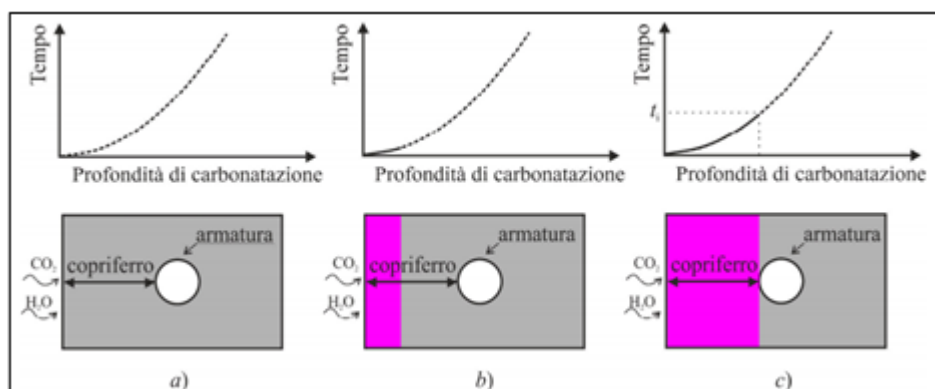


Figura 12 – Evoluzione nel tempo della profondità della carbonatazione di una struttura in calcestruzzo armato. Le zone in rosa indicano il calcestruzzo carbonatato, quelle in grigio il calcestruzzo alcalino.

Il coefficiente di carbonatazione, che esprime la velocità di penetrazione della carbonatazione, dipende da fattori ambientali e dalle proprietà del calcestruzzo. La conoscenza del coefficiente di carbonatazione, unita allo spessore di copriferro consente di valutare il tempo di innesco della corrosione. La Figura 13 mostra, ad esempio, la variazione del tempo di innesco in funzione dello spessore di copriferro e del coefficiente di carbonatazione.

A titolo d'esempio sono stati considerati tre valori corrispondenti a un calcestruzzo poco poroso ( $K=5 \text{ mm/anno}^{0.5}$ ), un calcestruzzo di media porosità ( $K = 7 \text{ mm/anno}^{0.5}$ ) e un calcestruzzo di scarsa qualità ( $K=10 \text{ mm/anno}^{0.5}$ ).

Considerando, ad esempio, uno spessore di copriferro di 30 mm, si osserva come il tempo di innesco aumenta da 9 a 18 e 36 anni, riducendo il coefficiente di carbonatazione da 10 a 7 e a 5  $\text{mm/anno}^{0.5}$ .

Si osserva come, al fine di aumentare il tempo di innesco, sia possibile aumentare lo spessore di copriferro: un suo aumento infatti consente di incrementare il tempo necessario alle sostanze aggressive per raggiungere le armature (è tuttavia importante sottolineare che lo spessore non può superare certi limiti, soprattutto a causa di problemi legati alla fessurazione).

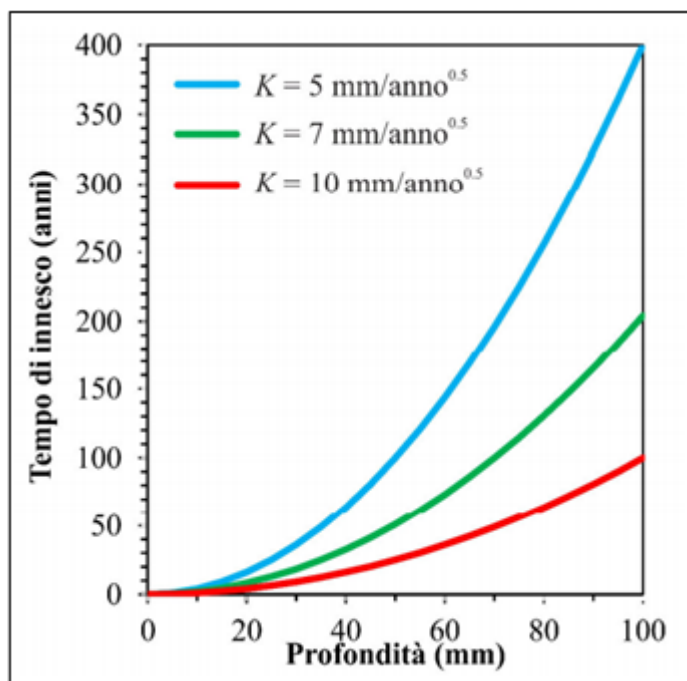


Figura 13 Tempo di innesco della corrosione in funzione dello spessore di copriferro e del coefficiente di carbonatazione, K.

La Figura 14 mostra le conseguenze della corrosione una volta che la carbonatazione ha raggiunto le armature e il film di passività è stato distrutto, se sono presenti acqua e ossigeno sulla superficie dell'armatura. Gli ossidi prodotti alla superficie dell'armatura (Figura 14a), occupando un volume maggiore rispetto al ferro da cui sono prodotti, possono produrre sforzi di trazione nello spessore di copriferro, che possono portare a fessurazione (Figura 14b), distacchi in aree localizzate (Figura 14c) o delaminazioni. Possono anche provocare una riduzione di aderenza tra armatura e calcestruzzo. La durata del periodo di propagazione è principalmente governata dalla velocità di corrosione delle armature e dai fattori da cui

essa dipende; minore è la velocità di corrosione maggiore sarà la durata del tempo di propagazione.

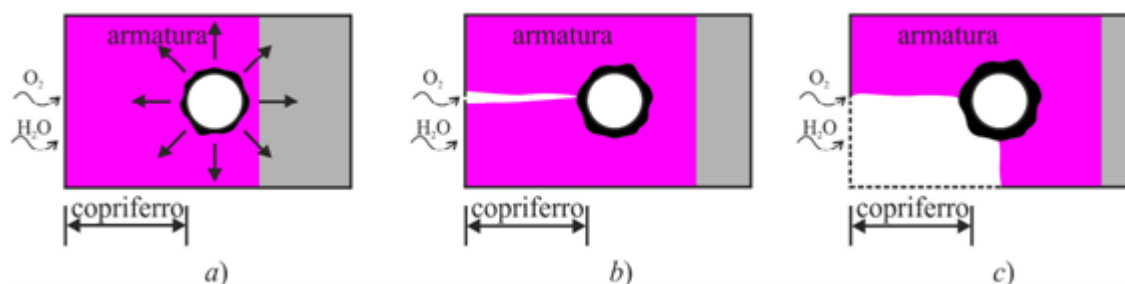


Figura 14 – Evoluzione nel tempo delle conseguenze della propagazione della corrosione.

Quando lo spessore di carbonatazione raggiunge il livello delle barre di armature, quali staffe e ferri longitudinali, si innesca il fenomeno di corrosione, da quell'istante la corrosione dell'armatura può essere descritta dal modello di corrosione uniforme con velocità pressoché costante. Per strutture esistenti la velocità di corrosione  $V_{corr}$  ( $\mu\text{m}/\text{anno}$ ) viene stimata con la legge di Faraday a partire da misure di intensità di corrente  $i_{corr}$  ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ):

$$V_{corr} = 1.16 \cdot i_{corr}$$

Nel caso di calcestruzzo soggetto a carbonatazione, la velocità di corrosione cresce fino a valori massimi di 100-200  $\mu\text{m}/\text{anno}$  per umidità relativa vicina al 100%, come mostrato nel grafico di Figura 15, per poi decrescere se il calcestruzzo è immerso in acqua a causa del mancato apporto di ossigeno: i valori massimi in condizioni di esposizione atmosferica (umidità relativa del 70-80%) sono tra 5 e 50  $\mu\text{m}/\text{anno}$ , mentre i valori medi sono di un ordine di grandezza più piccoli. La velocità di corrosione è quindi significativa solo per umidità elevata o in situazioni in cui si formano condense sulla superficie tali da far variare il contenuto d'acqua anche a livello delle armature. La situazione più pericolosa è per il calcestruzzo esposto alla pioggia.

Dalla Figura 16 risulta evidente come, nel calcestruzzo carbonatato, la presenza di una piccola concentrazione di cloruri provochi l'aumento della velocità di corrosione e mostra comunque circa lo stesso andamento del grafico precedente per quanto riguarda la variazione con l'umidità relativa.

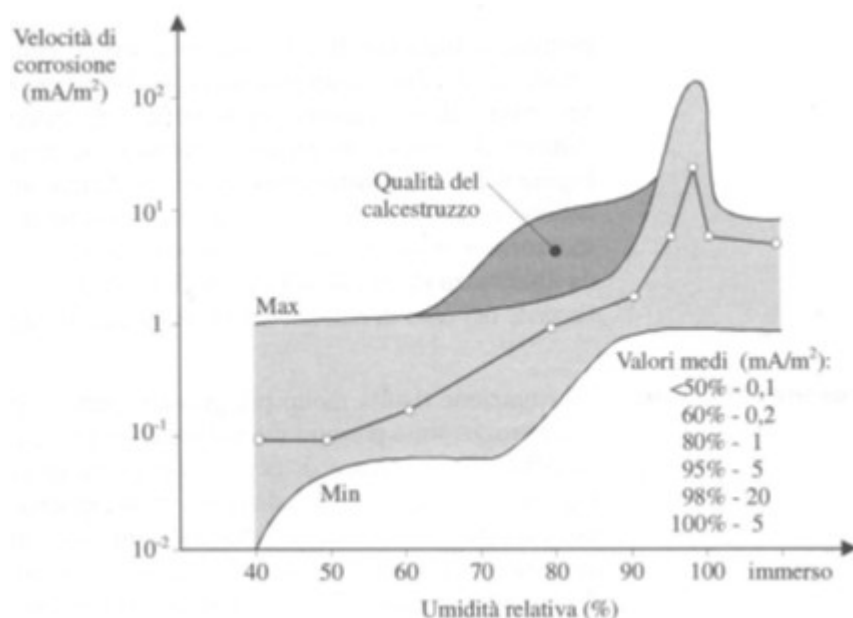


Figura 15 Velocità di corrosione in funzione dell'umidità relativa (Pedefferri et al., 1996)

Dai grafici di Figura 16 e 17, basati su un notevole numero di rilevazioni sperimentali, si sono ricavate espressioni in forma esponenziale per correlare la velocità di corrosione ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) all'umidità relativa nel caso di corrosione da carbonatazione ed al contenuto di cloruri, vedi anche Tabelle 1 e 2.

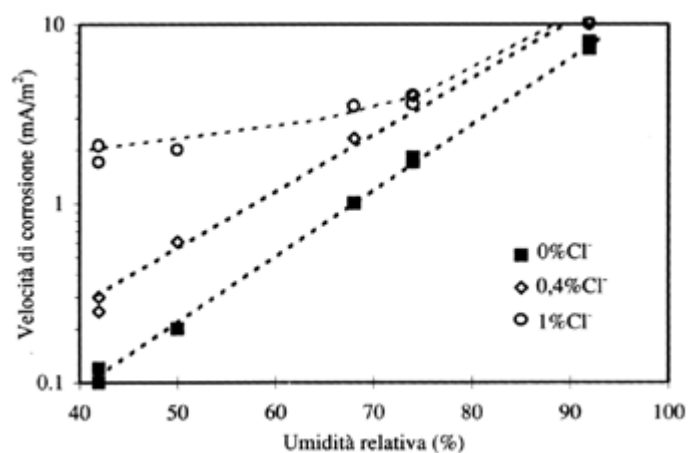


Figura 16 Relazione tra umidità relativa e velocità di corrosione in assenza e in presenza di piccoli tenori di cloruri (Pedefferri e Bertolini, 1996)

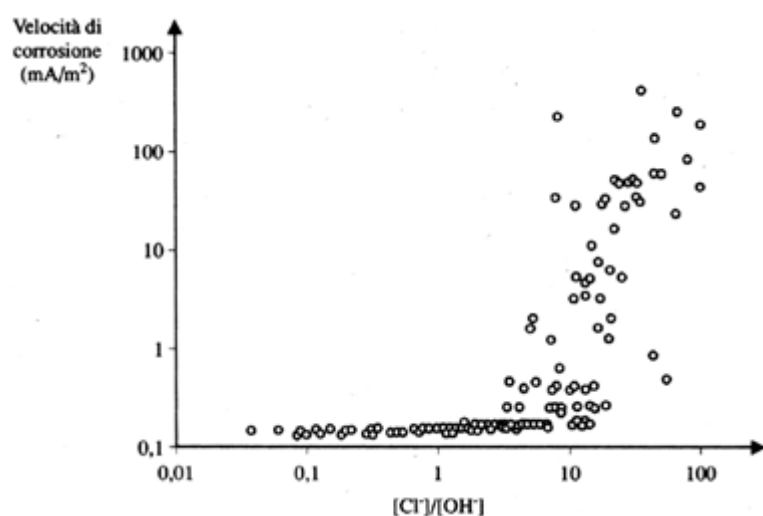


Figura 17 Relazione tra rapporto molare di Cl⁻ e OH⁻ nella soluzione presente nei pori e velocità di corrosione nel caso di strutture aeree e umide (Pedefferri e Bertolini, 1996)

0% Cl⁻	$I_{CORR} = 0,003 \cdot e^{0,0853(U.R.)}$	$\forall U.R.$
0,4% Cl⁻	$I_{CORR} = 0,0132 \cdot e^{0,0743(U.R.)}$	$\forall U.R.$
1% Cl⁻	$I_{CORR} = 1,0588 \cdot e^{0,0159(U.R.)}$	$40\% \leq U.R. \leq 65,5\%$
1% Cl⁻	$I_{CORR} = 0,3269 \cdot e^{0,0338(U.R.)}$	$65,5\% \leq U.R. \leq 74\%$
1% Cl⁻	$I_{CORR} = 0,0132 \cdot e^{0,0654(U.R.)}$	$74\% \leq U.R. \leq 100\%$

Tabella 1 Velocità di corrosione in funzione del contenuto di cloruri e dell'umidità relativa (da Assinnata, 2006)

Umidità relativa (%)	Velocità di corrosione nel calcestruzzo carbonatato (µm/anno)	Velocità di corrosione nel calcestruzzo contaminato da cloruri (µm/anno)
99	2	34
95	50	122
90	12	98
85	3	78
80	1	61
75	0.1	47
70	0	36
65	0	27
60	0	19
55	0	14
50	0	9

Tabella 2 Velocità di corrosione in calcestruzzo carbonatato ed esposto a cloruri (da RILEM, 1996)



### 3.4 Diffusione dell'anidride carbonica in un calcestruzzo fessurato

La prima manifestazione del degrado in atto è spesso rappresentata da una fessurazione. Le fessure si formano quando all'interno del calcestruzzo si generano sforzi di trazione maggiori della sua resistenza a trazione. Oltre alle sollecitazioni meccaniche dovute direttamente ai carichi applicati alla struttura, gli sforzi di trazione nel calcestruzzo possono essere dovuti anche ad altre cause, come il ritiro, la corrosione delle armature, i cicli di gelo disgelo, etc. Nelle zone fessurate la penetrazione della carbonatazione è più marcata e può essere valutata dalla seguente relazione (Vesikari, 1988):

$$s(t) = 50\sqrt{w} \cdot \sqrt[4]{t}$$

dove:

**s(t)** indica lo spessore dello strato carbonatato [mm];

**w** è la larghezza della fessura [mm];

**t** il tempo [anni].

Si fa notare che, qualunque sia la causa, la fessurazione nel calcestruzzo ha effetti sulla resistenza meccanica della struttura e sulla penetrazione dell'anidride carbonica. E' evidente, infatti, che in presenza di fessurazioni il tempo di innesco della corrosione diminuisce drasticamente. Una corretta valutazione numerica della profondità dello strato carbonatato non può quindi prescindere dal comportamento meccanico della struttura (Figura 18).

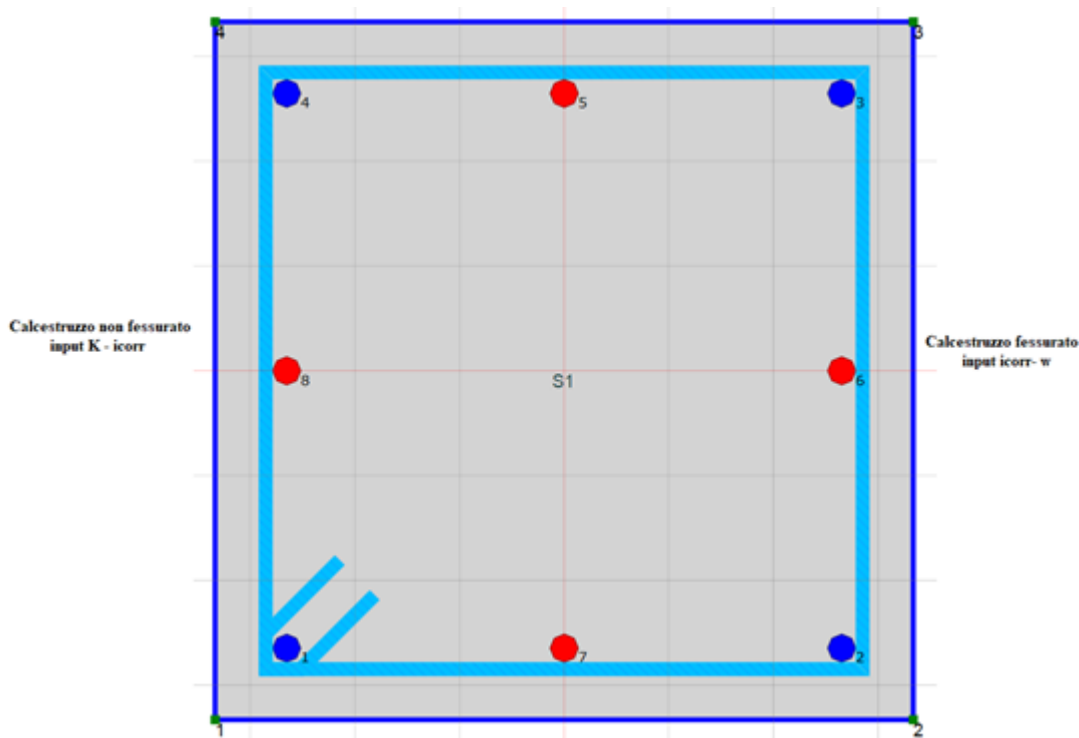


Figura 18 Sezione in c.a.: a sinistra parametri per la zona non fessurata e a destra parametri per la zona fessurata

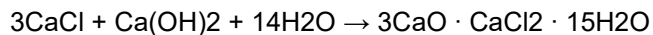
### 3.5 La diffusione dei cloruri in un calcestruzzo non fessurato

I cloruri sono naturalmente presenti nell'acqua di mare, pertanto, tutte le opere marittime in calcestruzzo armato risultano potenzialmente vulnerabili al loro attacco. I cloruri sono anche presenti artificialmente nei sali disgelanti e, dove usati, rendono particolarmente esposte tutte le opere in c.a. di tipo autostradale e le pavimentazioni esterne. I cloruri, oltre ad aggredire le barre di armatura, possono danneggiare in modo diretto anche il calcestruzzo.

Si possono distinguere due casi:

1. Cloruro di calcio ( $\text{CaCl}_2$ ): sale utilizzato come disgelante;

La reazione che sta alla base di tale meccanismo di danneggiamento è la seguente:



Il cloruro di calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) penetrando nel calcestruzzo, reagisce con la calce libera sotto forma di idrossido di calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), sviluppata durante la reazione dell'acqua con il cemento, con conseguente formazione di ossicloruro di calcio idrato ( $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ );

2. Cloruro di sodio ( $\text{NaCl}$ ): sale utilizzato come disgelante;

Questo secondo caso, riguarda il calcestruzzo confezionato con aggregati "reattivi". Il cloruro di sodio, a contatto con tali aggregati, può innescare la cosiddetta "reazione alcali-aggregato" tra sodio e potassio, presenti nel cemento, e la silice amorfa, presente negli aggregati.

Come precedentemente accennato, la corrosione delle barre di armatura ad opera dell'anidride carbonica o dei cloruri è un processo elettrochimico molto complesso e, affinché si possa innescare, necessita della presenza di ossigeno e acqua. In questa condizione il ferro metallico si trasforma chimicamente in ossido o idrossido di ferro formando la cosiddetta ruggine. E' importante distinguere l'azione dell'anidride carbonica che distrugge completamente il film protettivo delle barre provocando corrosione diffusa (Figura 8) dall'azione dei cloruri che provocano una corrosione localizzata (Figura 20). Il contenuto critico dello ione cloruro all'interfaccia calcestruzzo-barra – affinché si creino le condizioni per l'attacco corrosivo – è dell'ordine dello 0,5% sul peso del cemento.

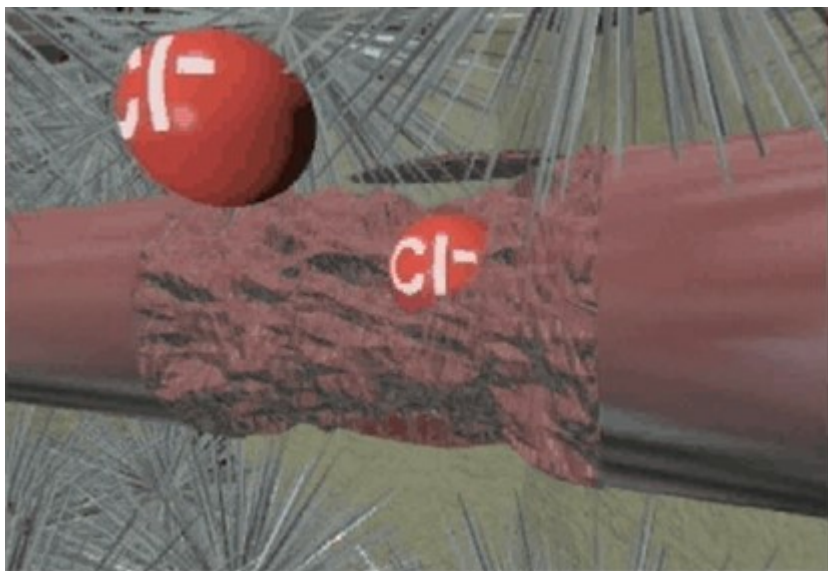


Figura 19 Attacco localizzato del film di ossido protettivo (Mapei-M. Collepari, modificata)

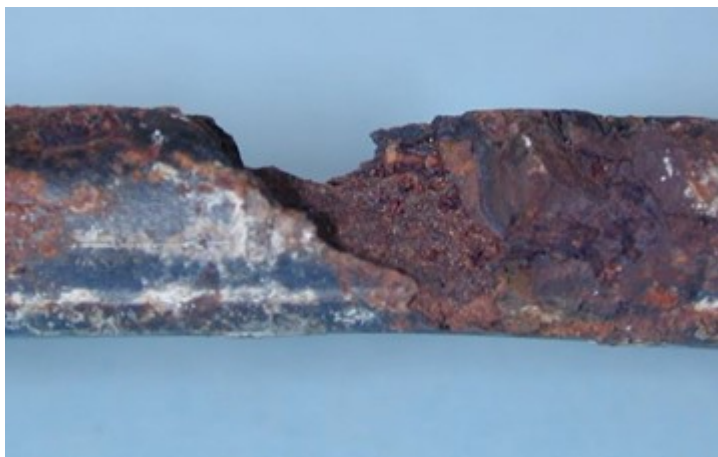


Figura 20 Corrosione localizzata (pitting) promossa dai cloruri (P. Pedferri)

Negli ultimi anni è diventata tristemente nota la problematica del degrado localizzato in corrispondenza delle selle Gerber dei viadotti autostradali, alcuni collassati di recente in Italia. Essa è legata alla corrosione delle armature per effetto dei cloruri contenuti nei sali disgelanti, veicolati attraverso l'acqua mal convogliata nei discendenti. Al danno per esposizione, alcune volte, si aggiungono scelte progettuali sfavorevoli: mensole

“tozze” non armate adeguatamente, le quali, fessurandosi per effetto delle tensioni principali di trazione, aprono la strada agli agenti aggressivi (Figura 21).



Figura 21 Collasso ponte Annone per cedimento sella Gerber (D. Masera-R. Asso-G.C. Marano, Strade & Autostrade, 2021)

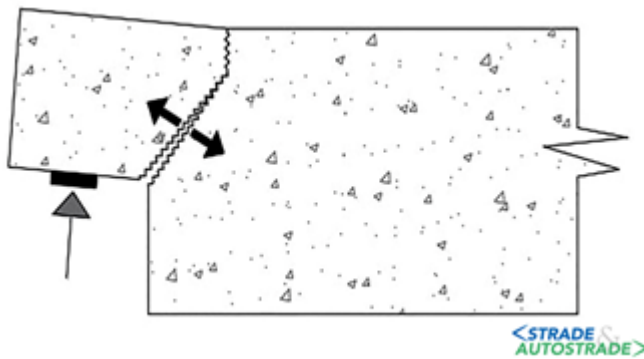


Figura 22 Un modello cinematico di una sella Gerber (D. Masera-R. Asso-G.C. Marano, Strade & Autostrade, 2021)

Quando l'acqua ristagna nei pori, i cloruri si muovono lungo la direzione  $x$  – ortogonale alla superficie di contatto e sotto la spinta di un gradiente di concentrazione  $\partial c / \partial x$  - in accordo alla seconda legge di Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial C}{\partial x^2}$$

dove  $D$  è il coefficiente di diffusione il cui valore dipende dal rapporto  $a/c$ , dal tempo di stagionatura e dal tipo di cemento.

Il modello sviluppato ha lo scopo di studiare l'evoluzione del degrado della struttura nel tempo. Si può studiare il periodo di innesco della corrosione attraverso le leggi che regolano la diffusione delle specie aggressive attraverso il copriferro: una volta che la corrosione è iniziata, si potrà stimare la velocità con cui si sviluppa il degrado delle barre di armatura.

Secondo l'approccio previsto nel Codice Modello per la vita di servizio, il processo diffusivo monodimensionale viene studiato secondo l'equazione modificata per considerare la presenza di uno strato  $\Delta x$  in cui la diffusione non segue la legge di Fick, nel modo seguente:

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

Dove:

**$C(x=a, t)$**  è il contenuto di cloruri al livello dell'armatura al tempo  $t$  (% in peso/cemento);

**$a$**  è lo spessore di copriferro (mm);

**$C_{s,\Delta x}$**  è il contenuto di cloruri alla profondità  $\Delta x$  dopo un tempo  $t$ ;

**$C_0$**  è il contenuto iniziale di cloruri nel calcestruzzo (% in peso/cemento);

**$D_{app,c}(t)$**  è il coefficiente di diffusione apparente dei cloruri attraverso il calcestruzzo ( $\text{mm}^2/\text{a}$ );

**$t$**  è il tempo in anni.

La funzione di errore erf(z) si può esprimere come:

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta$$

Il coefficiente di diffusione apparente  $D_{app,c}(t)$  viene valutato come:

$$D_{app,c}(t) = k_s \cdot D_{RCM,O} \cdot k_t \cdot A(t)$$

La funzione  $A(t)$  è legata all'invecchiamento del calcestruzzo:

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$$

Dove:

**a** è caratterizzato da un valore medio di 0.3 per il cemento Portland;

**t<sub>0</sub>** = 28 gg = 0.0767 anni;

**k<sub>e</sub>** e **k<sub>t</sub>** possono essere posti pari ad 1.

il coefficiente **D<sub>RCM,O</sub>** si può porre pari a  $10 \cdot 10^{-12}$  (m<sup>2</sup>/s).

La concentrazione critica considerata dal Codice Modello ha un valore medio di 0.6%, mentre in (Gjrv, 2009) si raccomanda di utilizzare il valore di 0.4%. Solitamente assumiamo lo 0,5%.

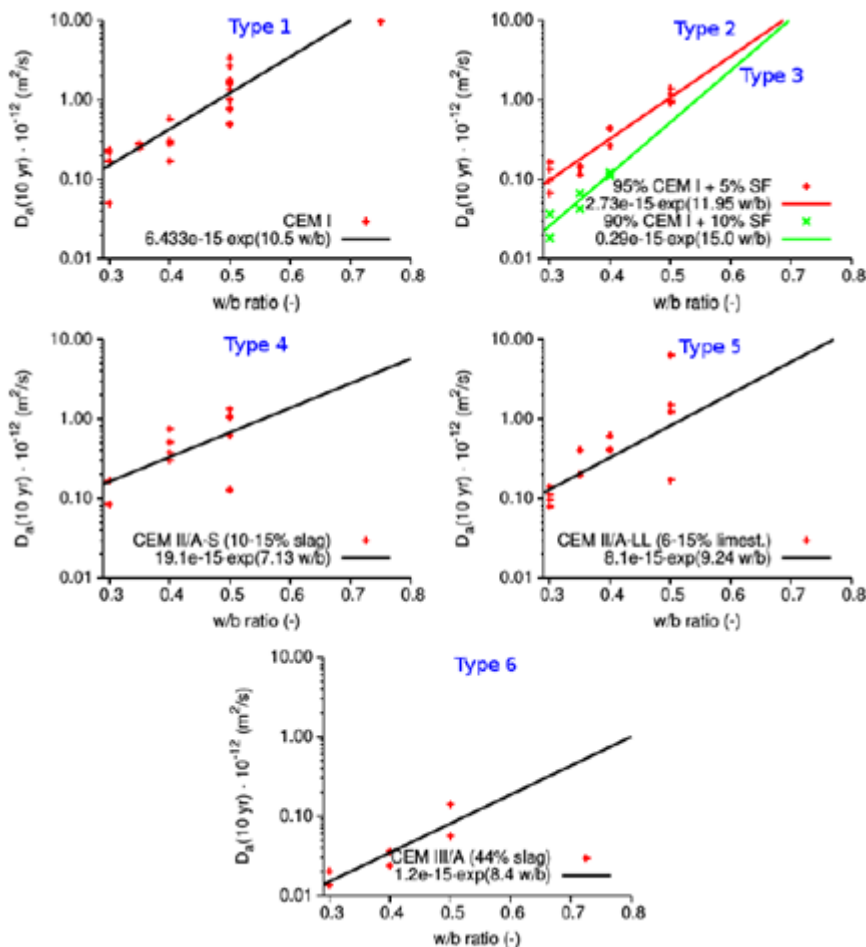


Figura 23 Variazione del coefficiente di diffusione apparente in funzione del rapp. a/c e del tipo di cemento (UNI EN 197-1) dopo 10 anni di esposizione ai cloruri (Luping, Tang et al. 2007)

Per strutture esistenti la velocità di corrosione  $V_{corr}$  (µm/anno) viene stimata con la legge di Faraday a partire da misure di intensità di corrente  $i_{corr}$  (mA/m<sup>2</sup>):

$$V_{corr} = 1.16 \cdot i_{corr}$$

Per sviluppare un esempio, si assume  $C_0=0$ ,  $C_{s,\Delta x}=1.5\%$ , indicato come valore medio per una struttura esposta in ambiente marino (Gjrv, 2009). Si assume  $\Delta x = 0$  mm.

La sezione è quella rappresentata in Figura 24: per le armature si assume un copriferro pari a quello minimo secondo EC2 per la classe di esposizione XS3, pari a 45 mm (vita utile di progetto di 50 anni).

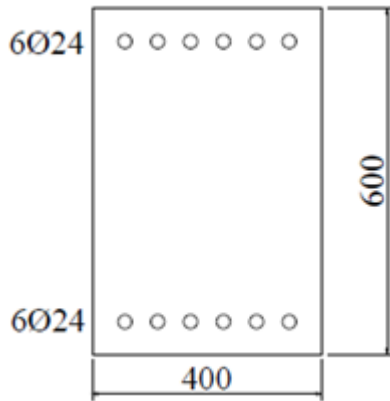


Figura 24 Sezione in c.a. studiata nell'esempio

Considerando la presenza dei cloruri solamente sulla superficie inferiore della trave, si può calcolare il tempo necessario ai cloruri per raggiungere una concentrazione critica in corrispondenza delle armature. A quel punto avrà inizio il processo corrosivo per pitting, con velocità (in termini di intensità di corrente) che può essere calcolata in funzione del contenuto di cloruri e del tempo.

Il parametro che definisce il danneggiamento  $\delta=x/D_0$  si può correlare alla velocità di corrosione nel modo seguente, sfruttando l'equazione seguente:

$$\delta(\Delta t) = \frac{x(\Delta t)}{D_0} = \frac{v \cdot \Delta t}{D_0} = \frac{0.00116 \cdot i_{corr}(C(x=a,t)) \cdot \Delta t}{D_0}$$

Indicando  $\Delta t$  con l'intervallo di tempo tra l'istante considerato e quello in cui la corrosione ha avuto inizio ( $i_{corr}$  è espressa in mA/m<sup>2</sup>; x e D<sub>0</sub> sono espressi in mm).

Una formulazione che tiene conto di diversi fattori è quella proposta da Liu e Weyers (da Chen et al., 2008), in cui la velocità di corrosione ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) in calcestruzzo contaminato da cloruri è espressa come:

$$i_{corr} = 0.926 \exp \left[ 7.98 + 0.7771 \ln(1.69C_t) - \frac{3006}{T} - 0.000116R_c + 2.24t^{-0.215} \right]$$

in cui  $C_t$  è il contenuto totale di cloruri (kg/m<sup>3</sup> di calcestruzzo), T è la temperatura (°K),  $R_c$  è la resistenza [ $\Omega$ ], t è il tempo in anni.  $R_c$  viene correlata al contenuto di cloruri nel modo seguente:

$$R_c = \exp[8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69C_t)]$$

Applicando le formule seguenti possiamo tracciare i seguenti grafici:

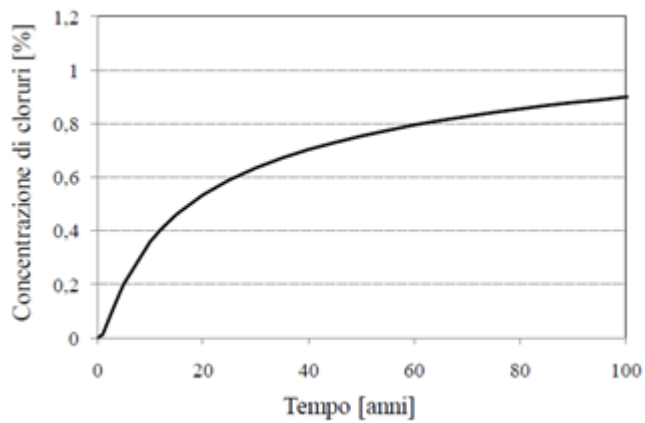


Figura 25 Concentrazione di cloruri al livello della barra di armatura nel tempo

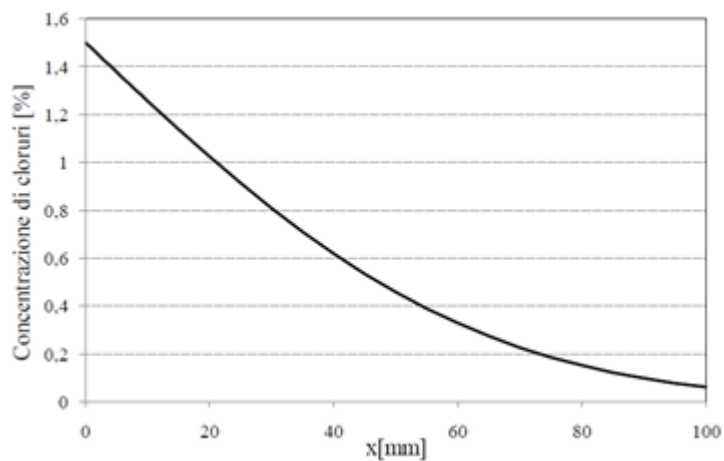


Figura 26 Profilo di penetrazione dei cloruri dopo 20 anni

La corrosione avrà quindi una velocità media dipendente dal tempo, variabile con la concentrazione dei cloruri.

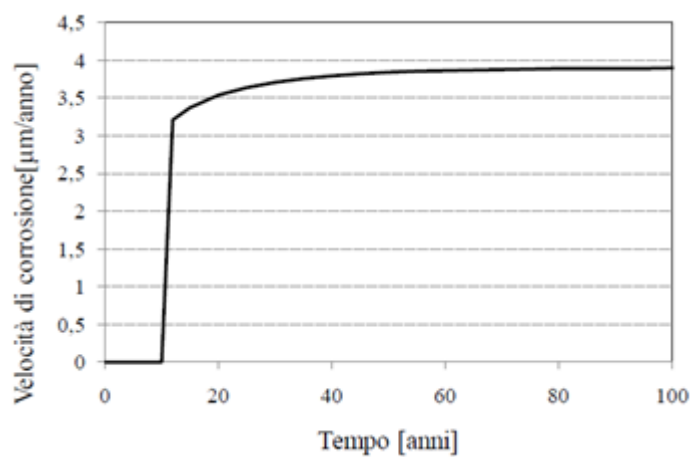


Figura 27 Variazione della velocità di corrosione nel tempo

Considerando  $\delta = x/D_0$  il diametro delle barre di armatura pari a 24 mm, è possibile calcolare il parametro di danneggiamento usando la formula sopra riportata.

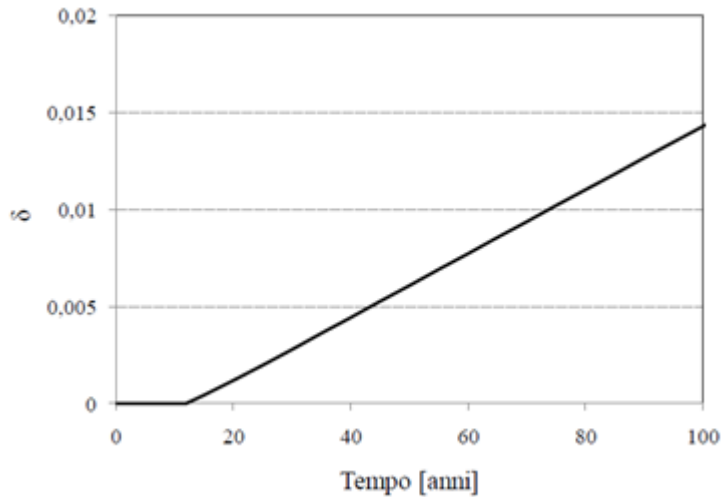


Figura 28 Variazione del livello di degrado delle armature nel tempo

Il valore apparentemente basso del livello di danno raggiunto, non tiene conto della penetrazione massima che l'attacco può raggiungere a causa del pitting in presenza di cloruri.

### 3.6 La diffusione dei cloruri in un calcestruzzo fessurato

Nel caso di calcestruzzo fessurato da sollecitazioni non riconducibili alla corrosione ma già presenti, rappresentate dai parametri  $w$ ,  $s_m$  e  $D_{cr}$ , che sono rispettivamente l'ampiezza media delle fessure [m], la distanza tra le fessure [m] e il coefficiente di diffusione all'interno delle fessure [m<sup>2</sup>/s], il valore del coefficiente di diffusione medio  $D_{av}$  da utilizzare è pari a quello apparente – discusso precedentemente - più una parte relativa alla fessurazione.

$$D_{av} = D_{app,C}(t) + \frac{w}{s_m} \cdot D_{cr}$$

I valori assunti dai parametri sono generalmente:

**$D_{cr}$**  =  $5 \cdot 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) ritenuto pressoché costante;  
 **$w$ ,  $s_m$**  devono essere inputati lato per lato della sezione.

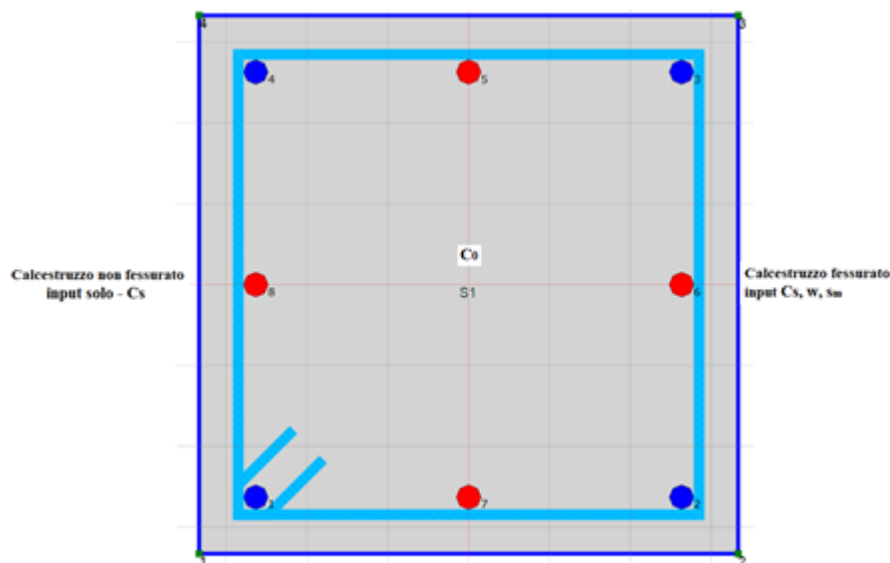


Figura 29 Sezione in c.a.: a sinistra parametri per la zona non fessurata e a destra parametri per la zona fessurata



## 3.7 Modelli di degrado

### 3.7.1 Introduzione

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

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

Il modello deve essere impostato in modo tale che la corrosione possa essere attivata solamente in alcuni elementi della struttura e, anche a livello di sezione, alle diverse barre può essere imposto un diverso valore di corrosione (questo è necessario per come è stato definito il parametro di danno globale ma è utile anche, ad esempio, per tenere conto di un diverso fattore di pitting).

Il degrado del calcestruzzo viene anch'esso a dipendere ovviamente dal livello di corrosione raggiunto dalle barre, poiché è direttamente legato alla quantità dei prodotti di ossidazione. In questo modello si vogliono mettere in evidenza esclusivamente gli effetti dei danni prodotti dalla corrosione delle armature, quindi il danneggiamento del calcestruzzo inizierà solamente quando la corrosione ha avuto inizio.

Si sfrutta la discretizzazione della sezione in elementi finiti (mesh di sezione) per definire la distribuzione spaziale (a livello sezionale) del danno, considerando il fatto che la propagazione delle fessure indotte dalla corrosione è limitata alla zona adiacente alle barre di armatura.

Si studierà quindi come varia la risposta sezionale in funzione del livello di danno raggiunto, mettendo poi in luce come le analisi eseguite possano essere rapportate ad una scala temporale semplicemente determinando la velocità con cui avviene il processo corrosivo

### 3.7.2 Degrado delle barre di armatura

Le modalità con cui la corrosione può avvenire sono sostanzialmente diverse in presenza di carbonatazione o in presenza di cloruri: nel primo caso si potrà ipotizzare una riduzione uniforme della sezione in funzione della profondità raggiunta, nel secondo caso la corrosione sarà di tipo localizzato e la profondità massima raggiunta sarà diverse volte maggiore di quella media.

Poiché la crisi avverrà quasi certamente nella sezione più ridotta della barra, si dovrà considerare un modello diverso da quello valido per la corrosione uniforme.

#### 3.7.2.1 Diminuzione della sezione resistente

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

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

in cui:

$A_{s0}$  ) è l'area iniziale della barra di armatura;

$\delta_{A_s}$  è l'indice di danno relativo all'area di armatura, variabile tra 0 e 1 (perdita completa della sezione resistente).

##### 3.7.2.1.1 Corrosione uniforme

Per la corrosione uniforme, ipotizzando che si verifichi da entrambi i lati della barra (Figura 30), si può definire l'indice  $\delta(A_s, u)$  a partire dalla seguente equazione:



$$\delta_{A_{s,u}}(\delta) = \begin{cases} 4 \cdot \delta \cdot (1 - \delta) & \text{se } 0 \leq \delta \leq 0.5 \\ 1 & \text{se } \delta > 0.5 \end{cases}$$

In cui

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

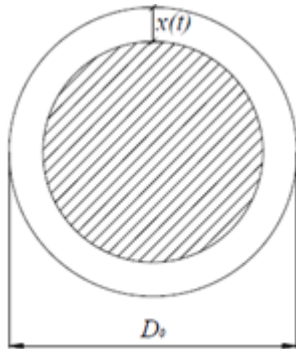


Figura 30 Riduzione della sezione di acciaio per corrosione uniforme (Vergani et.al 2010)

### 3.7.2.1.2 Corrosione localizzata

Nel caso di corrosione localizzata si tiene conto del fattore di pitting **R** e si possono distinguere i seguenti modelli:

#### Modello di Rodriguez (2008)

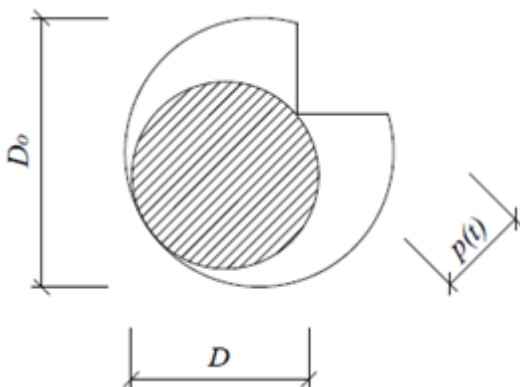


Figura 31 Riduzione della sezione a causa del pitting secondo il modello di Rodriguez (Vergani et.al 2010)

Secondo il modello di Rodriguez per il pitting, si utilizza l'equazione della corrosione uniforme considerando **non il  $\delta$  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:

$$\delta_{A_{s,pR}}(\delta R) = \begin{cases} (2\delta R - (\delta R)^2) & \text{se } 0 \leq \delta R \leq 1 \\ 1 & \text{se } \delta R > 1 \end{cases}$$

In cui

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

#### Modello di 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 nel modo seguente (da Stewart, 2008). Con riferimento

alla Figura 32, 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  $R$  in cui  $p(t) = x(t)_{medio} \cdot R$ .

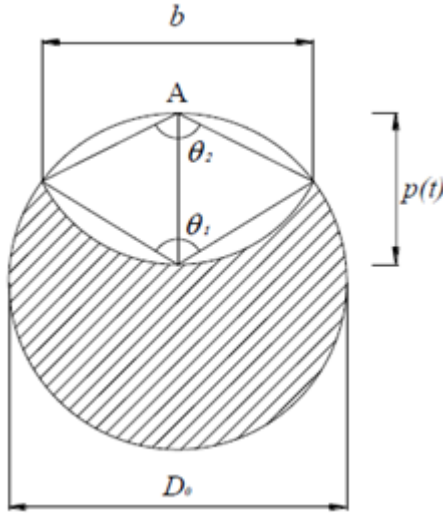


Figura 32 Riduzione della sezione a causa del pitting secondo il modello di Val – Melchers (da Vergani et.al 2010)

Le altre equazioni che definiscono il modello sono (con riferimento alla Figura 32):

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

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

L'area interessata dal pitting può essere calcolata come:

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

in cui:

$$A_1 = 0.5 \cdot \left[ \theta_1 \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - b \left| \frac{D_0}{2} - \frac{p(t)^2}{D_0} \right| \right]$$

$$A_2 = 0.5 \cdot \left[ \theta_2 p(t)^2 - b \frac{p(t)^2}{D_0} \right]$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$$

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

$$\alpha_{pit} = \frac{A_{pit}}{A_0}$$

In questo modello  $\alpha_{pit}$  è analogo al  $\delta A_{s,u}$  e  $\delta A_{s,pR}$  della corrosione uniforme e quella localizzata con il modello di Rodriguez.

#### Osservazioni

Il modello di Rodriguez potrebbe essere adeguato per studiare un caso di corrosione uniforme in cui siano presenti alcune localizzazioni più accentuate della riduzione di sezione. Questo modello inoltre si è rivelato

adeguato per simulare la corrosione durante le prove di corrosione accelerata. Il modello di Val-Melchers può essere invece adatto a situazioni in cui i pit sono molto profondi per l'elevata presenza di cloruri, quindi con fattori di pitting anche elevati ( $R = 6-9$ ), oppure nel caso di corrosione localizzata in cavi ad alta resistenza e presollecitati. Con fattori di pitting bassi questo modello risulta meno severo rispetto a quello basato sull'ipotesi di corrosione uniforme.

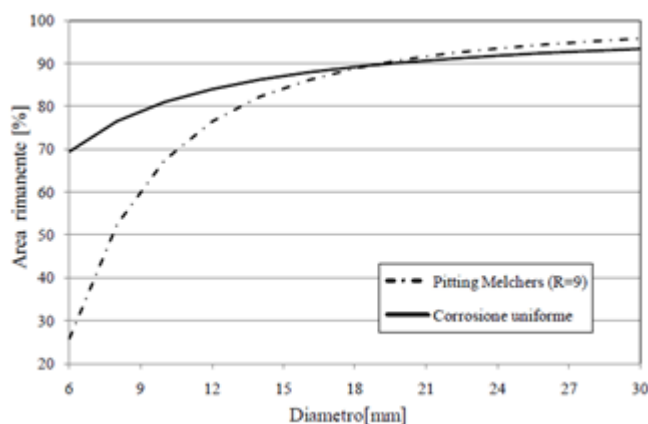


Figura 35 Area rimanente in funzione del diametro della barra, a parità di profondità raggiunta dall'attacco corrosivo ( $x=0.5$  mm) (da Vergani et.al 2010)

Dalla Figura 35 si vede, inoltre, come i modelli, a parità di penetrazione media raggiunta dall'attacco, forniscano una riduzione dell'area significativamente diversa in funzione del diametro della barra: con un fattore di pitting pari a 9, se la barra è di piccolo diametro l'area è quasi completamente consumata secondo il modello di Val-Melchers, mentre se la barra è di grande diametro la riduzione causata dal pitting è circa uguale a quella causata dalla corrosione uniforme. Se si ritiene il modello di Val-Melchers valido per descrivere una situazione reale di corrosione da cloruri, si capisce come le barre di piccolo diametro (tipicamente i diametri utilizzati per le staffe) siano maggiormente danneggiate dalla corrosione per pitting.

### 3.7.2.2 Variazione delle proprietà meccaniche delle armature

#### 3.7.2.2.1 Resistenza dell'acciaio

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 e, come si vedrà nel seguito, al danneggiamento del calcestruzzo.

##### Corrosione uniforme

Si definiscono quindi due parametri di danno per le proprietà dell'acciaio ( $\delta_{fsy}$  e  $\delta_{fsu}$ ) tali che:

$$f_{sy} = f_{sy0} (1 - \delta_{fsy})$$

$$f_{su} = f_{su0} (1 - \delta_{fsu})$$

in cui  $f_{sy0}$  e  $f_{syu}$  sono la tensione di snervamento e la tensione ultima iniziali.

Per esprimere gli indici di danno, si fa riferimento all'equazione;

$$\delta_{f_{sy}} = \delta_{f_{su}} = \beta \cdot \delta_{A_{s,u}}(\delta)$$

in cui  $\beta$  viene posto pari a 0.5, è  $\delta_{A_{s,u}}$  definito dalla relazione precedente sulla diminuzione della sezione resistente ossia:

$$\delta_{A_{s,u}}(\delta) = \begin{cases} 4 \cdot \delta \cdot (1 - \delta) & \text{se } 0 \leq \delta \leq 0.5 \\ 1 & \text{se } \delta > 0.5 \end{cases}$$

La formula è chiaramente di natura empirica. Mantenere  $\beta=0.5$  significa imporre una riduzione delle proprietà meccaniche proporzionale alla metà dell'area di acciaio consumata.

#### 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 effettuata tramite la relazione lineare proposta dagli autori, valida sia per  $f_u$  che per  $f_y$  ottenuta dall'interpretazione dei dati sperimentali di Figura 36:

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

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

$$\alpha_{pit} = \frac{A_{pit}}{A_0}$$

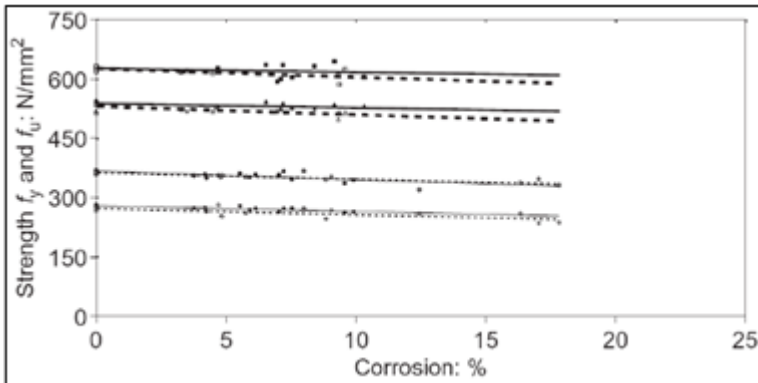


Figura 36 Resistenza residua di barre di armatura corrose (da Du et al.,2005,Vergani et.al 2010)

#### 3.7.2.2.2 Duttività dell'acciaio

##### Corrosione uniforme

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 dalla curva di Figura 37. Si definisce l'indice di danno della deformazione ultima  $\delta_{\epsilon_{su}}$  tale che:

$$\epsilon_{su} = \epsilon_{su0}(1 - \delta_{\epsilon_{su}})$$

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

$$\begin{cases} \delta_{\epsilon_{su}} = 0 & \text{se } \delta_{A_s} \leq 0.016 \\ \delta_{\epsilon_{su}} = 1 - 0.1521 \cdot \delta_{A_s}^{(-0.4583)} & \text{se } \delta_{A_s} > 0.016 \end{cases}$$

In cui  $\delta A_s$  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.

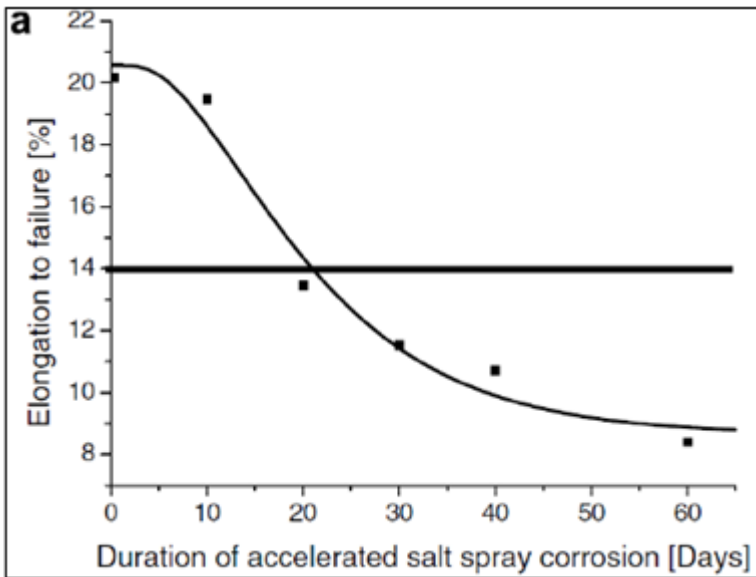


Figura 37 Effetto della corrosione sull'allungamento a rottura delle barre di armatura (da Apostolopoulos e Papadakis, 2008)

#### 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, 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  $\varepsilon_{su}' = \varepsilon_{su}$  per il materiale vergine fino a  $\varepsilon_{su}' = \varepsilon_{sy}$  per la completa perdita di duttilità:

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

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

$$\alpha_{pit} = \frac{A_{pit}}{A_0}$$

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

#### 3.7.2.3 Degrado del calcestruzzo

Il degrado del calcestruzzo viene modellato in modo tale da riuscire a cogliere in modo abbastanza 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. Innanzitutto vengono individuati in modo automatico 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 da implementare prevede che solo gli elementi compresi in un intorno della barra di raggio pari al copriferro (misurato dal centro della barra) siano soggetti al degrado (Figure 38 e 39).

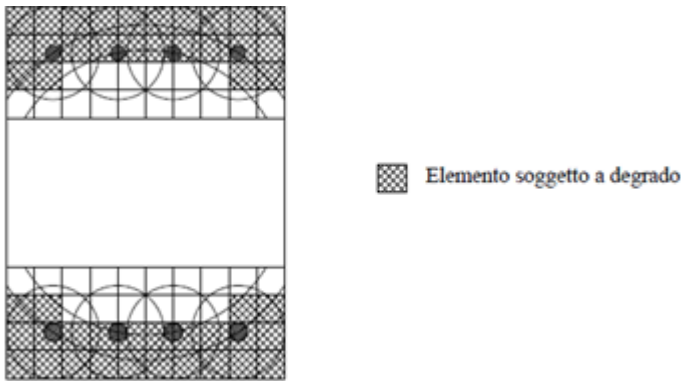


Figura 38 Individuazione degli elementi di calcestruzzo che subiscono danneggiamento in seguito alla corrosione delle armature - ravvicinate (Vergani et.al 2010)

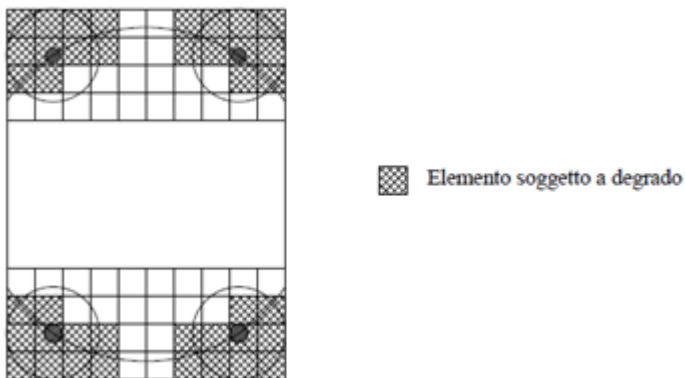


Figura 39 Individuazione degli elementi di calcestruzzo che subiscono danneggiamento in seguito alla corrosione delle armature - distanziate (Vergani et.al 2010)

Pur essendo un modello molto semplice, si può vedere come in questo modo si riesca a considerare il diverso meccanismo di danneggiamento dipendente dalla disposizione delle barre: se le barre sono molto vicine tra loro (Figura 38), il copriferro tenderà a distaccarsi secondo un piano (delaminazione), mentre invece se le barre sono lontane oppure sono poste negli angoli (Figura 39), il danneggiamento sarà limitato alla parte vicina alla barra, con piani di frattura inclinati. Per gli elementi individuati in questo modo, viene definito un parametro di danneggiamento  $\delta_{fc}$  da applicare alla resistenza a compressione del calcestruzzo, tale che:

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

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

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

in cui:

**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);

**fc** è il valore di picco della tensione di compressione, cui corrisponde la deformazione  $\varepsilon_{c0}$ ; Esprimendo **fc**=**fc**+8 in MPa, la deformazione  $\varepsilon_{c0}$  si può calcolare come:

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

**εt** rappresenta la deformazione trasversale di rigonfiamento della sezione e si può calcolare come:

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

in cui **bi** è la larghezza della parte di sezione considerata e **w** l'apertura media di fessura per ogni barra ed

**nbarre** il numero di barre presenti in bi.

#### Calcolo di w secondo il 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:

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

in cui

**w0**=0.05 mm rappresenta l'apertura di una fessurazione intrinseca da splitting iniziale;

**β** è un parametro costante assunto pari a 0,009 mm/μm;

**x** è la profondità della corrosione;

**x0** 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, D0 è il diametro della barra più grande nel gruppo considerato, i parametri  $a_1 = 74.4 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 7.3 \mu\text{m}$ ,  $a_3 = -17.4 \mu\text{m} \cdot \text{N/mm}^2$  sono ottenuti per via sperimentale;  $f_{c,sp}$  è la resistenza caratteristica di trazione allo splitting, valutabile come:

$$f_{c,sp} = \frac{f_{ct,095}}{0.9}$$

Dove:

$$f_{ct,095} = 1.3 \cdot 0.3 \cdot (f_c)^{2/3}$$

In (Vidal et al.,2004) viene mostrato come sia più aderente ai dati sperimentali la formula:

$$x_0 = a + b \frac{c}{d} \text{ in cui } a = 7.53; b = 9.32$$

rispetto alla precedente, che considera la dipendenza da  $f_{c,sp}$ . Viene quindi proposta una relazione lineare tra l'apertura delle fessure e la riduzione della sezione:

$$w = K \cdot (\Delta A_s - \Delta A_{s0})$$

in cui:

**w** è l'ampiezza della fessura (mm);

**K** = 0.0575 ( $r^2=0.82$  da regressione lineare sui risultati sperimentali di Figura 4.3);

**ΔAs** è la perdita di sezione di acciaio (mm<sup>2</sup>) calcolata secondo la seguente formula:

$$\Delta A_s = \frac{\pi}{4} (2 \cdot p(t) \cdot D_0 - p(t)^2)$$

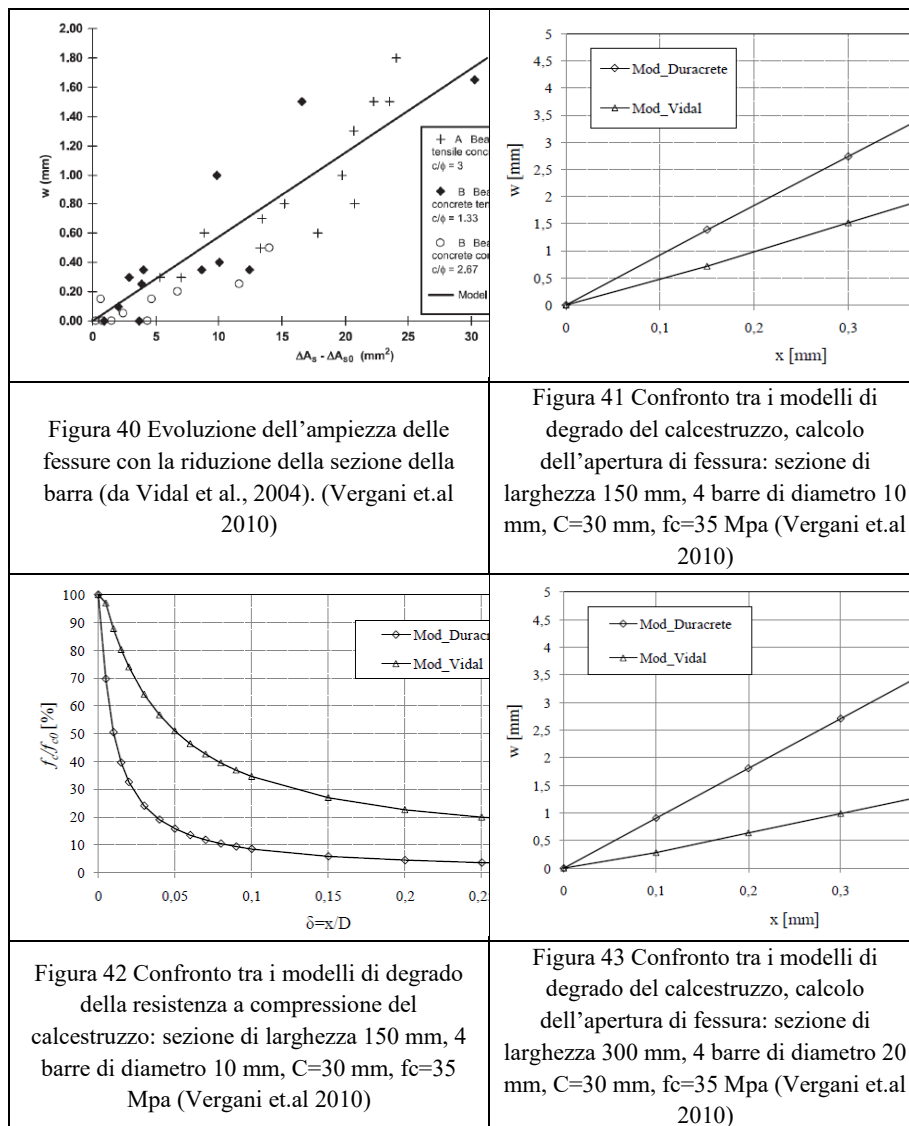
**ΔAs0** si può calcolare usando la relazione per **x0** come:

$$\Delta A_{s0} = A_s \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{R}{D_0} \left( 7.53 + 9.32 \frac{c}{D_0} \right) 10^{-3} \right]^2 \right]$$

in cui **R** è il fattore di pitting, c il copriferro, **D0** il diametro iniziale della barra.

La differenza fondamentale tra i due modelli, Duracrete e quello proposto da Vidal et al. (2004) entrambi basati su relazioni empiriche, è che il primo considera la fessurazione dipendente esclusivamente dalla

profondità raggiunta dall'attacco corrosivo (quindi indipendente dal diametro della barra), mentre nel secondo l'apertura di fessura è calcolata in base alla riduzione dell'area.



Questa differenza risulta evidente nel calcolo dell'apertura di fessura e si riflette quindi sulla riduzione della resistenza a compressione. Si può notare tuttavia come per barre di diametro maggiore la differenza tra i due modelli tenda a diminuire poiché l'area di acciaio consumata, a parità di profondità di penetrazione dell'attacco, è chiaramente maggiore per le barre più grandi.

Entrambi i modelli portano alla stessa riduzione della resistenza di calcestruzzo compresso fessurato, ciò è dovuto all'applicazione della formula **DuraCrete** (1998) che non tiene conto del fenomeno di Pitting. Una formulazione più aderente alla corrosione localizzata è quella proposta in (Vidal et al., 2004).



## 4 Verifiche

---

Questa sezione del presente manuale descrive, con riferimenti teorici e normativi, gli algoritmi di progettazione delle armature, di verifica delle sezioni in legno, in acciaio. Rispetto ad ogni tipologia costruttiva si analizzeranno nei dettagli le formulazioni utilizzate e i criteri di progettazione dei particolari esecutivi.

Tutte le verifiche sono effettuate sugli involuppi delle caratteristiche di sollecitazione.

### 4.1 Elementi in C.A.

#### 4.1.1 Sezioni in C.A.

Per le aste in calcestruzzo armato sono state effettuate le seguenti verifiche:

##### Pilastri

- Stabilità;
- **SLU**
  - Flessione composta deviata;
  - Taglio;
  - Torsione;
- **SLV**
  - Compressione;
  - Duttilità (Dettagli costruttivi);
  - Flessione composta deviata;
  - Taglio;
  - Torsione;
- **SLD**
  - Spostamenti relativi;
- **SLE**
  - Fessurazione;

##### Travi di Elevazione

- **SLU**
  - Flessione composta;
  - Taglio;
  - Torsione;
- **SLV**
  - Flessione composta;
  - Taglio;
  - Torsione;
- **SLE**
  - Deformabilità;
  - Fessurazione;
  - Tensioni di esercizio;

##### 4.1.1.1 Flessione composta deviata

Le sollecitazioni che vengono considerate in tale verifica sono: Sforzo Normale, Momento Flettente X-Z, Momento Flettente X-Y.

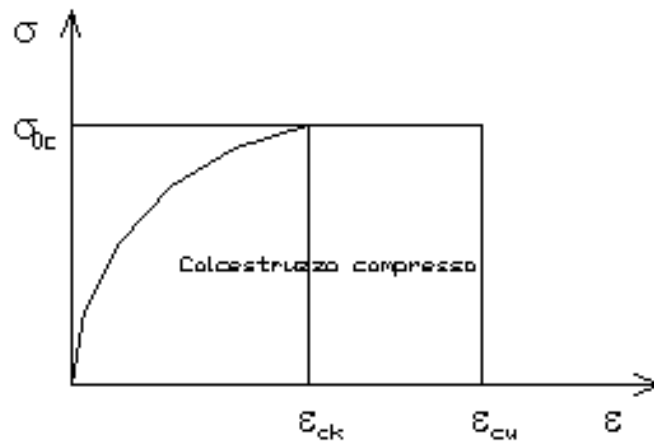
La verifica di resistenza è soddisfatta se la sollecitazione determinata dalla condizione considerata cade all'interno del dominio di sicurezza determinato, attraverso la conoscenza:

- del comportamento meccanico della sezione in esame;
- delle caratteristiche dei materiali di cui è composta la sezione;
- dei coefficienti di sicurezza forniti dalla normativa seguita.

Il calcolo è condotto nelle ipotesi che:

1. Le sezioni rimangano piane fino a rottura;
2. Ci sia perfetta aderenza fra acciaio e calcestruzzo;
3. Il calcestruzzo non abbia alcuna capacità di resistenza a trazione.

Il diagramma tensioni-deformazioni assunto per il calcestruzzo è di tipo parabola-rettangolo come indicato nella seguente figura:



dove:

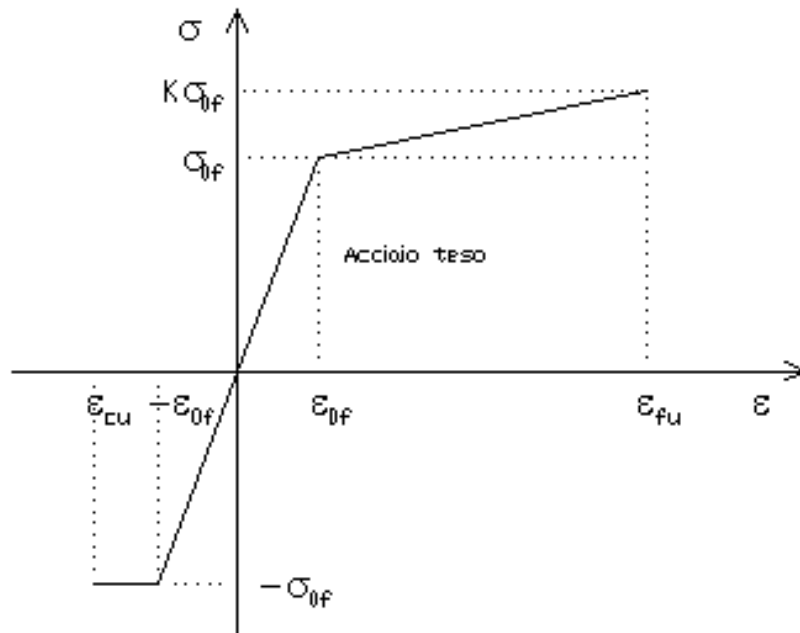
- $\epsilon_{ck}$  = deformazione caratteristica;
- $\epsilon_{cu}$  = deformazione ultima del calcestruzzo;
- $\sigma_{0c}$  = resistenza di calcolo del calcestruzzo;

Le equazioni che descrivono il diagramma sono:

$$\epsilon < \epsilon_{ck} : \sigma(\epsilon) = 1000 \sigma_{0c} \epsilon (1 - 250 \epsilon)$$

$$\epsilon_{ck} < \epsilon < \epsilon_{cu} : \sigma(\epsilon) = \sigma_{0c}$$

Il diagramma tensioni-deformazioni assunto per l'acciaio è indicato nella seguente figura:



dove:

$$\varepsilon_{0f} = \sigma_{0f} / E$$

$E$  : modulo di elasticità dell'acciaio;

$\sigma_{0f}$  : resistenza di calcolo dell'acciaio;

$k$  : rapporto di sovrarresistenza (se è pari ad 1 il comportamento è bilineare elastico-perfettamente plastico);

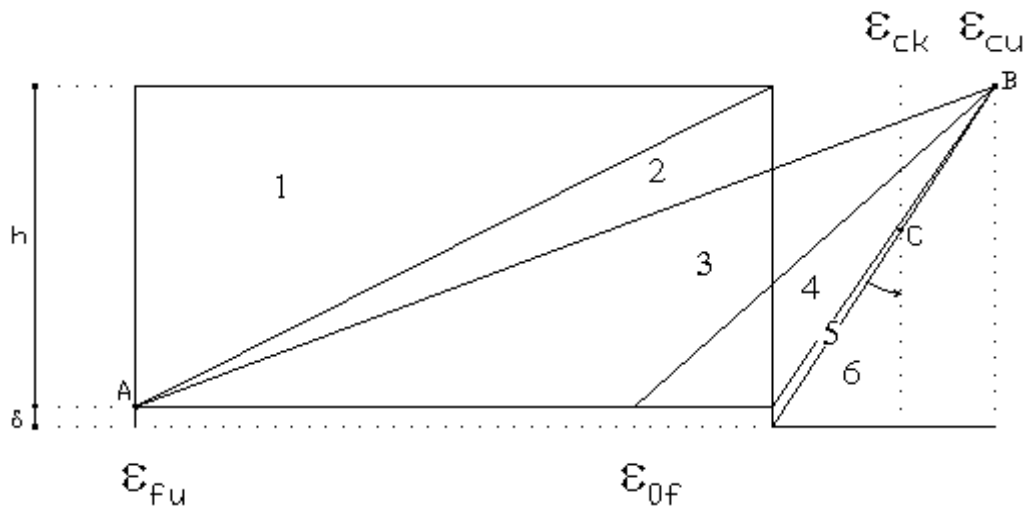
$f_{yk}$  : resistenza caratteristica dell'acciaio

$\gamma_m$  : coefficiente di sicurezza dell'acciaio;

$\varepsilon_{fu}$  : deformazione ultima dell'acciaio;

$\varepsilon_{cu}$  : deformazione ultima del calcestruzzo;

Le limitazioni delle deformazioni unitarie per il conglomerato e per l'acciaio conducono a definire sei diversi campi (o regioni) nei quali potrà trovarsi la retta di deformazione specifica. Tali campi sono descritti nel seguente modo:



**Campo 1 :** è caratterizzato dall'allungamento massimo tollerabile per l'acciaio pari a  $\varepsilon_{fu}$ . Il diagramma delle deformazioni specifiche appartiene ad un fascio di rette passanti per il punto (A) mentre la distanza dall'asse neutro potrà variare da  $-\infty$  a 0. È il caso di trazione semplice o con piccola eccentricità; la sezione risulta interamente tesa. La crisi si ha per cedimento dell'acciaio teso.

**Campo 2 :** è caratterizzato dall'allungamento massimo tollerabile per l'acciaio pari a  $\varepsilon_{fu}$  e dalla rotazione del diagramma attorno al punto (A). La deformazione specifica del calcestruzzo varia da 0 al valore massimo del

calcestruzzo compresso ( $\varepsilon_{cu}$ ) mentre la distanza dell'asse neutro dal lembo compresso può variare da 0 a  $0.259h$ . La sezione risulterà in parte tesa ed in parte compressa e quindi sarà sollecitata a flessione semplice o composta.

**Campo 3 :** è caratterizzato dall'accorciamento massimo del conglomerato pari a  $\varepsilon_{cu}$ . Le rette di deformazione appartengono ad un fascio passante per (B). La massima tensione del calcestruzzo in questa regione è pari a quella di rottura di calcolo mentre l'armatura è ancora deformata in campo plastico. La sezione risulterà in parte tesa ed in parte compressa e quindi sarà sollecitata a flessione semplice o composta.

**Campo 4 :** è caratterizzato dall'accorciamento massimo del conglomerato pari a  $\varepsilon_{cu}$ . Le rette di deformazione appartengono ad un fascio passante per (B). La massima tensione del calcestruzzo in questa regione è pari a quella di rottura di calcolo mentre l'armatura è sollecitata con tensioni inferiori allo snervamento e può risultare anche scarica. La sezione risulterà in parte tesa ed in parte compressa e quindi sarà sollecitata a flessione semplice o composta.

**Campo 5 :** è caratterizzato dall'accorciamento massimo del conglomerato pari a  $\varepsilon_{cu}$ . Le rette di deformazione appartengono ad un fascio passante per (B) mentre la distanza dell'asse neutro varia da  $h$  ad  $h + d$ . L'armatura in tale regione è sollecitata a compressione e pertanto tutta la sezione è compressa; è questo il caso della flessione composta.

**Campo 6 :** è caratterizzato dall'accorciamento massimo del conglomerato compresso che varia fra  $\varepsilon_{cu}$  e  $\varepsilon_{ck}$ . Le rette di deformazione specifiche appartengono ad un fascio passante per (C) e la distanza dell'asse neutro varia fra 0 e  $-\infty$ . La distanza di (C) dal lembo superiore vale  $3h/7$ . La sezione risulta sollecitata a compressione semplice o composta.

#### 4.1.1.2 Taglio

Il calcolo del taglio viene eseguito secondo il metodo di Ritter-Morsch. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono: le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i seguenti limiti:

$$1 \leq \text{ctg } \theta \leq 2,5$$

Per gli elementi in cui è richiesta la verifica a taglio, deve risultare:

$$V_{sd} \leq \min\{V_{Rsd}, V_{Rcd}\}$$

dove  $V_{sd}$  è il valore di progetto dello sforzo di taglio agente.

Con riferimento all'armatura trasversale, la resistenza di progetto a "taglio trazione" si calcola con:

$$V_{Rsd} = 0.9 d (A_{sw}/s) f_{yd} (\text{ctg } \alpha + \text{ctg } \theta) \sin \alpha$$

Con riferimento al calcestruzzo d'anima, la resistenza di progetto a "taglio compressione" si calcola con:

$$V_{Rcd} = 0.9 d b_w \alpha_c f'_{cd} (\text{ctg } \alpha + \text{ctg } \theta) / (1 + \text{ctg}^2 \theta)$$

dove:

- $V_{sd}$  : taglio sollecitante il calcolo;
- $d$  : altezza utile della sezione;
- $A_{sw}$  : area dell'armatura trasversale;
- $s$  : passo dell'armatura trasversale;
- $f_{yd}$  : resistenza a snervamento dell'acciaio;
- $b_w$  : larghezza minima della sezione lungo l'altezza efficace;
- $\alpha_c$  : coefficiente di compressione della sezione;
- $f'_{cd}$  : resistenza a compressione ridotta del calcestruzzo;
- $\alpha$  : angolo di inclinazione delle armature a taglio;

$\theta$  : angolo di inclinazione delle bielle compresse.

Il contributo delle armature a taglio è somma del contributo delle staffe e degli eventuali sagomati. In ogni caso l'aliquota massima che può essere affidata ai sagomati è il 50% dello sforzo di taglio massimo.

#### 4.1.1.3 Taglio ciclico (C8.7.2.3.5)

Come previsto dalla Circolare n.7/2019, per le azioni sismiche, occorre considerare la riduzione di resistenza a taglio in condizioni cicliche in funzione della domanda di duttilità sull'elemento, per il livello di azione considerato.

La resistenza a taglio  $V_R$  in condizioni cicliche, quali quelle sismiche, può essere valutata sulla base dei tre contributi dovuti all'entità dello sforzo normale  $N$ , al calcestruzzo e all'acciaio, nonché dell'interazione con la rotazione flessionale dell'elemento in funzione della parte plastica della domanda di duttilità,  $\mu_{\Delta,pl}$ .

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

dove:

- $\gamma_{el}$  : 1,15 per gli elementi primari ed 1,0 per gli elementi secondari (come definiti al § 7.2.3 delle NTC);
- $h$  : è l'altezza totale della sezione;
- $x$  : è l'altezza della zona compressa della sezione (profondità dell'asse neutro);
- $N$  : è lo sforzo normale di compressione (assunto paria a zero se di trazione);
- $L_V$  : è luce di taglio;
- $A_c$  : è l'area della sezione;
- $f_c$  : è la resistenza a compressione del calcestruzzo;
- $\rho_{tot}$  : è la percentuale geometrica totale di armatura longitudinale;
- $V_W$  : è il contributo dell'armatura trasversale per la resistenza a taglio;

Dunque, la verifica a taglio in condizione cicliche risulta soddisfatta se:

$$V_{Sd} \leq V_R$$

dove  $V_{Sd}$  è il valore di progetto dello sforzo di taglio agente.

#### 4.1.1.4 Torsione

Il calcolo a torsione viene effettuato seguendo le prescrizioni dell'EC2 oppure delle NTC-2018 a seconda della Normativa scelta dall'utente.

Come previsto dall'EC2, la resistenza a torsione della sezione è calcolata sulla base di una sezione chiusa a pareti sottili. Le sezioni piene sono sostituite da sezioni equivalenti a pareti sottili. Le sezioni di forma complessa, come quella a "T", sono suddivise in una serie di sottosezioni, ciascuna delle quali è modellata come una sezione equivalente a parete sottile. La resistenza torsionale totale della sezione si ottiene sommando i contributi delle singole sottosezioni.

L'armatura a torsione è costituita da staffe chiuse combinate con una serie di barre longitudinali uniformemente distribuite su tutto il perimetro della sezione. Barre longitudinali devono essere sempre

disposte a tutti gli angoli della sezione.

Il momento torcente di calcolo deve, di regola, soddisfare le due condizioni seguenti:

$$T_{Sd} \leq T_{Rd1}$$

$$T_{Sd} \leq T_{Rd2}$$

dove:

$T_{Sd}$  è il momento torcente sollecitante di calcolo;

$T_{Rd1}$  è il massimo momento torcente che può essere sopportato dalle bielle di calcestruzzo compresse;

$T_{Rd2}$  è il massimo momento torcente che può essere sopportato dall'armatura.

Il momento resistente torcente  $T_{Rd1}$  è dato da:

$$T_{Rd1} = \frac{2 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot t \cdot A_k}{\cot \theta + \tan \theta}$$

dove:

$t = A/u$  è lo spessore effettivo della parete. Nel caso di una sezione piena  $t$  rappresenta lo spessore equivalente della parete. Non è permesso uno spessore minore a due volte il copriferro  $c$  delle barre longitudinali;

$u$  è il perimetro esterno;

$A$  è l'area totale della sezione retta racchiusa nel perimetro esterno, comprese le aree delle aree interne;

$f_{cd}$  è la resistenza cilindrica di calcolo del calcestruzzo;

$A_k$  è l'area compresa all'interno della linea media della sezione trasversale a pareti sottili, comprese le aree delle cavità interne;

$$v = 0,7 \left( 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \right) \geq 0,35;$$

$\theta$  è l'angolo tra le bielle di calcestruzzo e l'asse longitudinale della trave, di regola scelto in modo che sia:

$$0,4 \leq \cot \theta \leq 2,5$$

Il momento resistente torcente  $T_{Rd2}$  è dato da:

$$T_{Rd2} = 2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot \cot \theta$$

e l'area aggiuntiva di acciaio longitudinale per torsione è data dall'equazione:

$$A_{sl} \cdot f_{yld} = \frac{T_{Rd2} \cdot u_k}{2 \cdot A_k} \cot \theta$$

dove:

$u_k$  è il perimetro dell'area  $A_k$ ;

$s$  è il passo delle staffe;

$f_{ywd}$  è la tensione di snervamento di calcolo delle staffe;

$f_{yld}$  è la tensione di snervamento di calcolo dell'armatura longitudinale  $A_{sl}$ ;

$A_{sw}$  è l'area della sezione trasversale delle barre usate come staffe;

$A_{sl}$  è l'area aggiuntiva di acciaio longitudinale richiesta per la torsione.

Secondo quanto riportano le NTC-2018, la verifica di resistenza nei confronti di sollecitazioni torcenti consiste nel controllare che:

$$T_{Ed} \leq \min\{T_{Rcd}, T_{Rsd}, T_{Rld}\}$$

dove  $T_{Ed}$  è il valore di progetto del momento torcente agente.

Per elementi prismatici sottoposti a torsione semplice o combinata con altre sollecitazioni, che abbiano sezione piena o cava, lo schema resistente è costituito da un traliccio periferico in cui gli sforzi di trazione sono affidati alla armature longitudinali e trasversali ivi contenute e gli sforzi di compressione sono affidati alle bielle di calcestruzzo.

Con riferimento al calcestruzzo la resistenza di progetto si calcola tramite la seguente relazione:

$$T_{Rcd} = 2 \cdot A \cdot t \cdot f'_{cd} \cdot \cot \theta / (1 + \cot^2 \theta)$$

dove  $t$  è lo spessore della sezione cava; per sezioni piene  $t = A_c/u$  dove  $A_c$  è l'area della sezione ed  $u$  è il suo perimetro;  $t$  deve essere assunta comunque maggiore o uguale a 2 volte la distanza fra il bordo e il centro dell'armatura longitudinale.

Le armature longitudinali e trasversali del traliccio resistente devono essere poste entro lo spessore  $t$  del profilo periferico. Le barre longitudinali possono essere distribuite lungo detto profilo, ma comunque una barra deve essere presente su tutti i suoi spigoli.

Con riferimento alle staffe trasversali la resistenza di progetto si calcola tramite la seguente relazione:

$$T_{Rsd} = 2 \cdot A \cdot \frac{A_s}{s} \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta$$

Con riferimento all'armatura longitudinale la resistenza di progetto si calcola con:

$$T_{Rld} = 2 \cdot A \cdot \frac{\sum A_l}{u_m} \cdot f_{yd} / \cot \theta$$

dove:

$A$  è l'area racchiusa dalla fibra media del profilo periferico;

$A_s$  è l'area della staffe;

$u_m$  è il perimetro medio del nucleo resistente;

$s$  è il passo delle staffe;

$\sum A_l$  è l'area complessiva delle barre longitudinali.

L'inclinazione  $\theta$  delle bielle compresse di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare i limiti seguenti:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$$

#### 4.1.1.5 Compressione massima

Per le combinazioni sismiche è stata effettuata la verifica del carico assiale massimo di compressione controllando che, in funzione della classe di duttilità, sia inferiore al valore limite definito dalla normativa applicata.

$$N_{sd} \leq N_{lim}$$

Il valore limite della resistenza assiale vale:

$$N_{lim} = f_{cd} A_{cls} coeff$$

dove:

$f_{cd}$  : resistenza a compressione del calcestruzzo;

$A_{cls}$  : area della sezione in calcestruzzo;

$coeff$  : coefficiente del valore limite.

Il coefficiente del valore limite è in funzione della classe di duttilità della struttura:

Classe di duttilità	Pareti	Pilastr
H / A	0.35	0.55
M / B	0.40	0.65

#### 4.1.1.6 Stabilità

Le verifiche di stabilità degli elementi snelli in c.a. devono essere condotte attraverso un'analisi del secondo ordine che tenga conto degli effetti flessionali delle azioni assiali sulla configurazione deformata degli elementi stessi.

Si sono assunti legami fra le azioni interne e le deformazioni che mettono in conto il comportamento non lineare dei materiali e si è trascurato il contributo del calcestruzzo teso. È stato utilizzato il "criterio della snellezza per elementi isolati" descritto nell'Eurocodice 2.

In via approssimata gli effetti del secondo ordine in un elemento isolato possono essere trascurati se la snellezza non supera il corrispondente valore limite:

$$\lambda_{lim} = \frac{20 A B C}{\sqrt{n}}$$

dove:

$n = N_{ed} / (A_c f_{cd})$  è l'azione assiale adimensionalizzata;

$A = 0.7$ ;

$B = 1.1$ ;

$C = 0.7$ ;

La snellezza della colonna da confrontare con  $\lambda_{lim}$  è pari a:

$$\lambda = \lambda_0 / i$$

dove  $\lambda_0$  è la lunghezza libera d'inflessione definita in base ai vincoli di estremità (o calcolata con metodi numerici) ed  $i$  è il raggio d'inerzia della sezione in calcestruzzo non fessurato.

Nel caso in cui sia necessaria l'amplificazione dei momenti flettenti, la stessa è stata effettuata mediante il "metodo della stima della curvatura nominale". Il momento totale di progetto dovuto agli effetti del I e del II ordine viene calcolato con la seguente relazione:

$$M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2$$

Il valore  $M_{0Ed}$ , rappresenta il momento del primo ordine equivalente di estremità calcolato come:

$$M_{0Ed} = 0.6 M_{02} + 0.4 M_{01} \geq 0.4 M_{02}$$

in cui  $M_{01}$  e  $M_{02}$  rappresentano i momenti di estremità del primo ordine.

Il momento nominale del secondo ordine  $M_2$  viene calcolato mediante la seguente relazione:



$$M_2 = N_{Ed} e_2$$

Il parametro  $e_2$  è l'inflessione calcolata come:

$$e_2 = \left(\frac{1}{r}\right) \frac{l_0^2}{c}$$

in cui il valore di  $c$  può essere posto pari a 10.

La curvatura  $1/r$  viene calcolata mediante:

$$\frac{1}{r} = K_r K_\varphi \frac{1}{r_0}$$

dove:

$$K_r = (1 + \omega - n)/(1 + \omega - 0.4) \leq 1;$$

$$K_\varphi = 1 + \beta \varphi_{ef} \geq 1;$$

$\omega$  : percentuale meccanica di armatura totale;

$n$  : forza assiale adimensionalizzata;

$$\beta = 0.35 + f_{ck}/200 - \lambda/150;$$

Con riferimento al punto 4.1.2.3.9.3 delle NTC 2018 in aggiunta al momento sollecitante esterno viene sommata un'aliquota dovuta ad un'eccentricità dello sforzo normale pari a 1/300 dell'altezza della colonna (difetto di rettilineità).

#### 4.1.1.7 Stato tensionale

Tensioni di compressione elevate nel calcestruzzo in presenza di carichi di esercizio possono favorire la formazione di fessure longitudinali e determinare o microfessurazioni nel calcestruzzo o livelli di viscosità maggiori di quelli previsti. Elevate tensioni nell'acciaio possono condurre a fessure ampie e permanentemente aperte. Tali fenomeni possono ridurre la durabilità delle opere.

Tale verifica rientra nell'ambito della verifica di esercizio. Il calcolo delle tensioni si ottiene sfruttando le ipotesi tradizionali per il calcolo del cemento armato ordinario, e cioè:

1. assunzione dei materiali elastico lineari;
2. conservazione delle sezioni piane al crescere dei carichi;
3. perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
4. resistenza nulla a trazione del calcestruzzo;

Inoltre può essere stabilito un coefficiente di omogeneizzazione diverso dal valore ordinario.

Le tensioni di esercizio si possono calcolare considerando le combinazioni di carico caratteristica, frequente e quasi permanente.

La verifica consiste nel confrontare le tensioni di calcolo con quelle limite dei materiali.

La massima tensione di compressione del calcestruzzo  $\sigma_{c,max}$ , deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_{c,max} \leq 0,60 f_{ck} \text{ per combinazione caratteristica;}$$

$$\sigma_{c,max} \leq 0,45 f_{ck} \text{ per combinazione quasi permanente;}$$

La tensione massima dell'acciaio,  $\sigma_{s,max}$ , per effetto delle azioni dovute alla combinazione caratteristica deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_{c,max} \leq 0,80 f_{yk}$$

#### 4.1.1.8 Fessurazione

In accordo con l'EC2 il calcolo delle ampiezze delle fessure si effettua considerando anche la parte di calcestruzzo reagente a trazione utilizzando la seguente espressione:

$$W_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

dove:

- $W_k$  : ampiezza di calcolo delle fessure;
- $s_{r,max}$  : distanza massima tra le fessure;
- $\varepsilon_{sm}$  : deformazione media dell'armatura che tiene conto, nella combinazione di carico considerata, anche degli effetti "tension stiffening";
- $\varepsilon_{cm}$  : deformazione media del calcestruzzo.

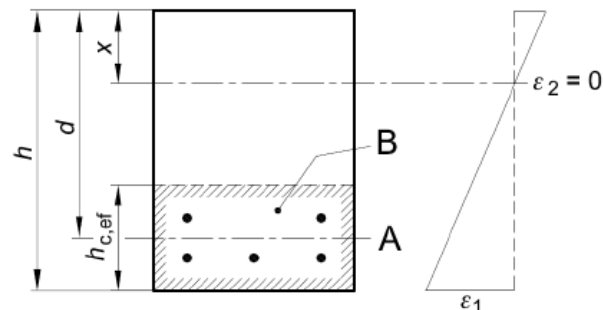
La quantità  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  si ottiene dalla seguente espressione:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - 0.4 \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} (1 + \alpha_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

dove:

- $\sigma_s$  : tensione nell'armatura tesa valutata considerando la sezione fessurata;
- $E_s$  : modulo elastico dell'acciaio;
- $\alpha_e$  : rapporto  $E_s/E_{cm}$ ;
- $\rho_{eff} = A_s/A_{c,eff}$  : percentuale di armatura efficace;
- $A_{c,eff}$  : area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura, di altezza  $h_{c,eff}$ , dove  $h_{c,eff}$  è il valore minimo tra  $2.5(h - d)$ ,  $(h - x)/3$  e  $h/2$ , come riportato nella figura di seguito riportata:

- A Livello del baricentro dell'acciaio
- B Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$



La quantità  $s_{r,max}$  si ottiene dalla seguente espressione:

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 (\phi / \rho_{eff})$$

dove:

- $c$  : copriferro delle armature;

- $k_1$  : coefficiente di aderenza delle barre. Assume valore 1,6 per barre lisce e 0,8 per barre ad aderenza migliorata;
- $k_2$  : coefficiente che tiene conto della forma del diagramma delle deformazioni. Assume valore 0,5 per flessione e 1 per trazione pura;
- $k_3$  : coefficiente pari a 3,4;
- $k_4$  : coefficiente pari a 0,425;
- $\phi$  : diametro delle barre in mm. Se si utilizzano più diametri si utilizza il diametro medio.

Il valore caratteristico di apertura delle fessure  $W_k$  non deve superare i valori nominali  $w_1 = 0,2$ ,  $w_2 = 0,3$ ,  $w_3 = 0,4$  secondo quanto riportato nella seguente tabella (Tab. 4.1.IV delle NTC 2018):

Gruppi di Esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Sensibile Stato limite	Armatura	
				$w_k$	Poco sensibile Stato limite $w_k$
A	Ordinarie	frequente	apertura fessure	$\leq w_2$	apertura fessure $\leq w_3$
		quasi permanente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure $\leq w_2$
B	Aggressive	frequente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure $\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure $\leq w_1$
C	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	apertura fessure $\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure $\leq w_1$

Come si evince dalla precedente tabella lo stato limite di fessurazione deve essere fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione come descritto nel § 4.1.2.2.4 delle NTC 2018.

#### 4.1.1.9 Deformabilità

Per il calcolo della deformabilità di elementi inflessi si utilizza il metodo che pesa le curvature nelle due situazioni caratteristiche degli elementi in c.a. ("I" sezione integra; "II" sezione fessurata). A tale riguardo la curvatura in una generica sezione può essere valutata con la seguente relazione:

$$\theta = (1 - \zeta)\theta_I + \zeta \theta_{II}$$

dove  $\zeta$  rappresenta l'effetto irrigidente del calcestruzzo tra due fessure consecutive (tension stiffening):

$$\zeta = 1 - c (M_{cr}/M)^2$$

dove:

- $c$  : pari a 1 per carichi permanenti;
- $M_{cr}$  : momento di prima fessurazione;
- $M$  : momento sollecitante.

Per calcolare la freccia di un elemento, si divide in "n" conci uguali e si calcola la curvatura di ogni concio riferita alla coordinata  $x_i$ . La freccia relativa alla sezione  $x_j$  è pari a:

$$\delta_j = \varphi_A x_j - \sum (x_j - x_i) \theta_i \Delta x$$

dove:

- $\varphi_A$  : rotazione dell'estremo iniziale dell'elemento;
- $l$  : lunghezza dell'elemento;
- $\Delta x$  : lunghezza del concio;

$\theta_i$  : curvatura relativa al concio.

#### 4.1.1.10 Spostamenti relativi (RIG)

La condizione in termini di rigidità sulla struttura si ritiene soddisfatta qualora la conseguente deformazione degli elementi strutturali non produca sugli elementi non strutturali danni tali da rendere la costruzione temporaneamente inagibile.

Nel caso delle costruzioni civili e industriali, qualora la temporanea inagibilità sia dovuta a spostamenti di interpiano eccessivi, questa condizione si può ritenere soddisfatta quando gli spostamenti di interpiano ottenuti dall'analisi in presenza dell'azione sismica di progetto corrispondente allo Stato Limite e alla Classe d'Uso considerati siano inferiori ai limiti indicati nel seguito.

Per le Classi d'Uso I e II ci si riferisce allo SLD e deve essere:

- a) per tamponature collegate rigidamente alla struttura, che interferiscono con la deformabilità della stessa:

$$qd_r = 0,0050 \cdot h \quad \text{per tamponature fragili}$$

$$qd_r = 0,0075 \cdot h \quad \text{per tamponature duttili}$$

- b) per tamponature progettate in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano  $d_{rp}$ , per effetto della loro deformabilità intrinseca oppure dei collegamenti alla struttura:

$$qd_r \leq d_{rp} \leq 0,0100 \cdot h$$

- c) per costruzioni con struttura portante di muratura ordinaria:

$$qd_r \leq 0,0020 \cdot h$$

- d) per costruzioni con struttura portante di muratura armata:

$$qd_r \leq 0,0030 \cdot h$$

- e) per costruzioni con struttura portante di muratura confinata:

$$qd_r \leq 0,0025 \cdot h$$

dove:

$d_r$  è lo spostamento di interpiano, cioè la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio inferiore, calcolati sul modello di calcolo non comprensivo delle tamponature;

$h$  è l'altezza del piano.

Per le Classi d'Uso III e IV ci si riferisce allo SLO e gli spostamenti d'interpiano devono essere inferiori ai 2/3 dei limiti precedentemente indicati.

In caso di coesistenza di diversi tipi di tamponamento o struttura portante nel medesimo piano della costruzione, deve essere assunto il limite di spostamento più restrittivo.

#### 4.1.1.11 Duttilità

Nel caso di comportamento strutturale dissipativo il comportamento sismico della struttura è largamente dipendente dal comportamento delle sue zone dissipative. Esse devono formarsi ove previsto e mantenere, in presenza di azioni cicliche, la capacità di trasmettere le necessarie sollecitazioni e di dissipare energia, garantendo la capacità in duttilità relativa alla classe di duttilità scelta.

I dettagli costruttivi delle zone dissipative e delle connessioni tra queste zone e le restanti parti della struttura, nonché dei diversi elementi strutturali tra loro, sono fondamentali per un corretto comportamento sismico e devono essere esaurientemente specificati negli elaborati di progetto.

Nel §7.3.6.1 delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” del D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) la verifica della duttilità viene prescritta solo per le sezioni allo spiccato dalle fondazioni degli elementi strutturali verticali primari, indipendentemente dai particolari costruttivi adottati.

Come descritto in tale paragrafo, si deve verificare che i singoli elementi strutturali e la struttura nel suo insieme possiedono una capacità in duttilità:

- nel caso di analisi lineare, coerente con il fattore di comportamento  $q$  adottato e i relativi spostamenti, quali definiti nel §7.3.3.3;
- nel caso di analisi non lineari, sufficiente a soddisfare la domanda in duttilità evidenziata dall'analisi.

Nel caso di analisi lineare la verifica di duttilità si può ritenere soddisfatta, rispettando per tutti gli elementi strutturali, sia primari sia secondari, le regole specifiche per i dettagli costruttivi precisate dalle norme per le diverse tipologie costruttive.

Per le strutture a comportamento dissipativo, qualora non siano rispettate le regole specifiche dei dettagli costruttivi, occorrerà procedere a verifica di duttilità.

Per le sezioni allo spiccato dalle fondazioni degli elementi strutturali verticali primari la verifica di duttilità, indipendentemente dai particolari costruttivi adottati, è stata effettuata accertando che la capacità in duttilità della costruzione sia almeno pari:

- a 1,2 volte la domanda in duttilità locale, valutata in corrispondenza dello SLV, nel caso si utilizzino modelli lineari;
- alla domanda in duttilità locale e globale allo SLC, nel caso si utilizzino modelli non lineari.

Dunque, le NTC 2018 danno la possibilità di scegliere come soddisfare la domanda per analisi lineari attraverso tre strade alternative:

- effettuando le verifiche di duttilità;
- in alternativa alle verifiche di duttilità, mediante l'applicazione di armature di confinamento dimensionate nel rispetto della formula [7.4.29];
- utilizzando per la progettazione un fattore di comportamento  $q \leq 1,5$  in modo da evitare le verifiche di duttilità.

Le verifiche di duttilità si eseguono, nei casi richiesti al §7.4 delle Norme Tecniche, confrontando la capacità espressa in termini di duttilità con la corrispondente domanda, secondo la relazione [4.1.18b):

$$\mu_{\Phi} = \mu_{\Phi}(N_{Ed}) \geq \mu_{Ed}$$

dove:

$\mu_{\Phi}$  è il valore di progetto della duttilità di curvatura corrispondente a  $N_{Ed}$ ;

$\mu_{Ed}$  è la domanda in termini di duttilità di curvatura.

La **capacità** in termini di fattore di duttilità in curvatura  $\mu_{\Phi}$  può essere calcolata, separatamente per le due direzioni principali di verifica, come rapporto tra la curvatura cui corrisponde una riduzione del 15% della massima resistenza a flessione – oppure il raggiungimento della deformazione ultima del calcestruzzo e/o dell'acciaio – e la curvatura convenzionale di prima plasticizzazione  $\phi_{yd}$  espressa dalla relazione seguente:

$$\phi_{yd} = \phi'_{yd} \cdot \frac{M_{Rd}}{M'_{yd}}$$

dove:

$\phi'_{yd}$  è la minore tra la curvatura calcolata in corrispondenza dello snervamento dell'armatura tesa e la curvatura calcolata in corrispondenza della deformazione di picco del calcestruzzo compresso ( $\epsilon_{c2}$  se si usa il modello parabola-rettangolo oppure  $\epsilon_{c3}$  se si usa il modello triangolo-rettangolo);

$M_{Rd}$  è il momento resistente della sezione allo SLU;

$M'_{yd}$  è il momento corrispondente a  $\phi'_{yd}$  e può essere assunto come momento resistente massimo della sezione in campo sostanzialmente elastico.

In definitiva, il **fattore di duttilità** in curvatura di una sezione  $\mu_\phi$  viene definito dalla seguente relazione:

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_{yd}}$$

La curvatura ultima  $\phi_u$  è quella in cui per prima si raggiunge la deformazione ultima del calcestruzzo o dell'acciaio o si ha una riduzione del momento maggiore del 15% del momento resistente massimo.

La **domanda in duttilità** di curvatura allo SLC nelle zone dissipative, espressa mediante il fattore di duttilità in curvatura  $\mu_\phi$ , può essere valutata in via approssimata tramite la seguente relazione secondo quanto riportato al §7.4.4.1.2 delle NTC 2018:

$$\begin{aligned} \mu_\phi &= 1.2 \cdot (2 \cdot q_0 - 1) && \text{per } T_1 \geq T_c \\ \mu_\phi &= 1.2 \cdot (1 + 2 \cdot (q_0 - 1) \cdot T_c / T_1) && \text{per } T_1 < T_c \end{aligned}$$

Le Norme Tecniche al §7.4.6.2.2 danno la possibilità di non effettuare la verifica di duttilità per pilastri a condizione che si dispongano, in alternativa, delle staffe che rispettano le prescrizioni riportate nella formula [7.4.29]. Queste formule sono state ricavate limitando al valore massimo la deformazione del calcestruzzo confinato e pertanto si perviene a staffature molto simili a quelle progettate rispettando la verifica di duttilità.

$$\alpha \cdot \omega_{wd} \geq 30 \mu_\phi \cdot v_d \cdot \varepsilon_{sy,d} \cdot \frac{b_c}{b_0} - 0,035$$

$$\omega_{wd} = \frac{\text{volume delle staffe di confinamento}}{\text{volume del nucleo di calcestruzzo}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

dove:

$\omega_{wd}$  è il rapporto meccanico dell'armatura trasversale di confinamento all'interno della zona dissipativa (il nucleo di calcestruzzo è individuato con riferimento alla linea media delle staffe) che deve essere non minore di 0,12 in CD"A".

$\mu_\phi$  è la domanda in duttilità di curvatura allo SLC;

$v_d$  è la forza assiale adimensionalizzata di progetto relativa alla combinazione sismica SLV ( $v_d = N_{Ed} / A_c \cdot f_{cd}$ );

$\varepsilon_{sy,d}$  è la deformazione di snervamento dell'acciaio;

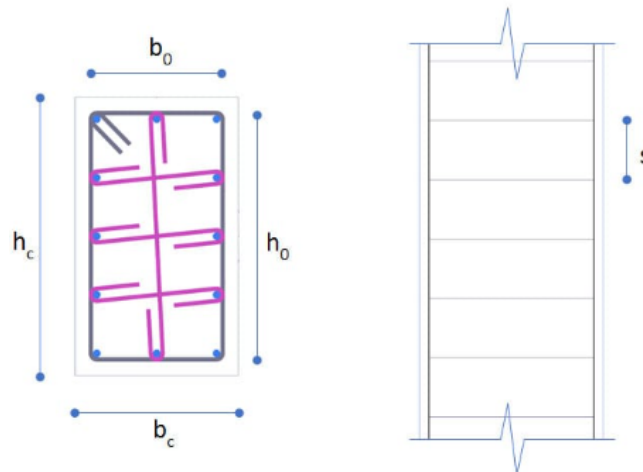
$h_c$  è la profondità della sezione trasversale lorda;

$h_0$  è la profondità del nucleo confinato (con riferimento alla linea media delle staffe);

$b_c$  è la larghezza minima della sezione trasversale lorda;

$b_0$  è la larghezza del nucleo confinato corrispondente a  $b_c$  (con riferimento alla linea media delle staffe);

$\alpha$  è il coefficiente di efficacia del confinamento, uguale a  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$  dove i parametri  $\alpha_n$  e  $\alpha_s$  differiscono a seconda che la sezione trasversale sia rettangolare oppure circolare e sono definiti al §7.4.6.2.2 delle NTC 2018.

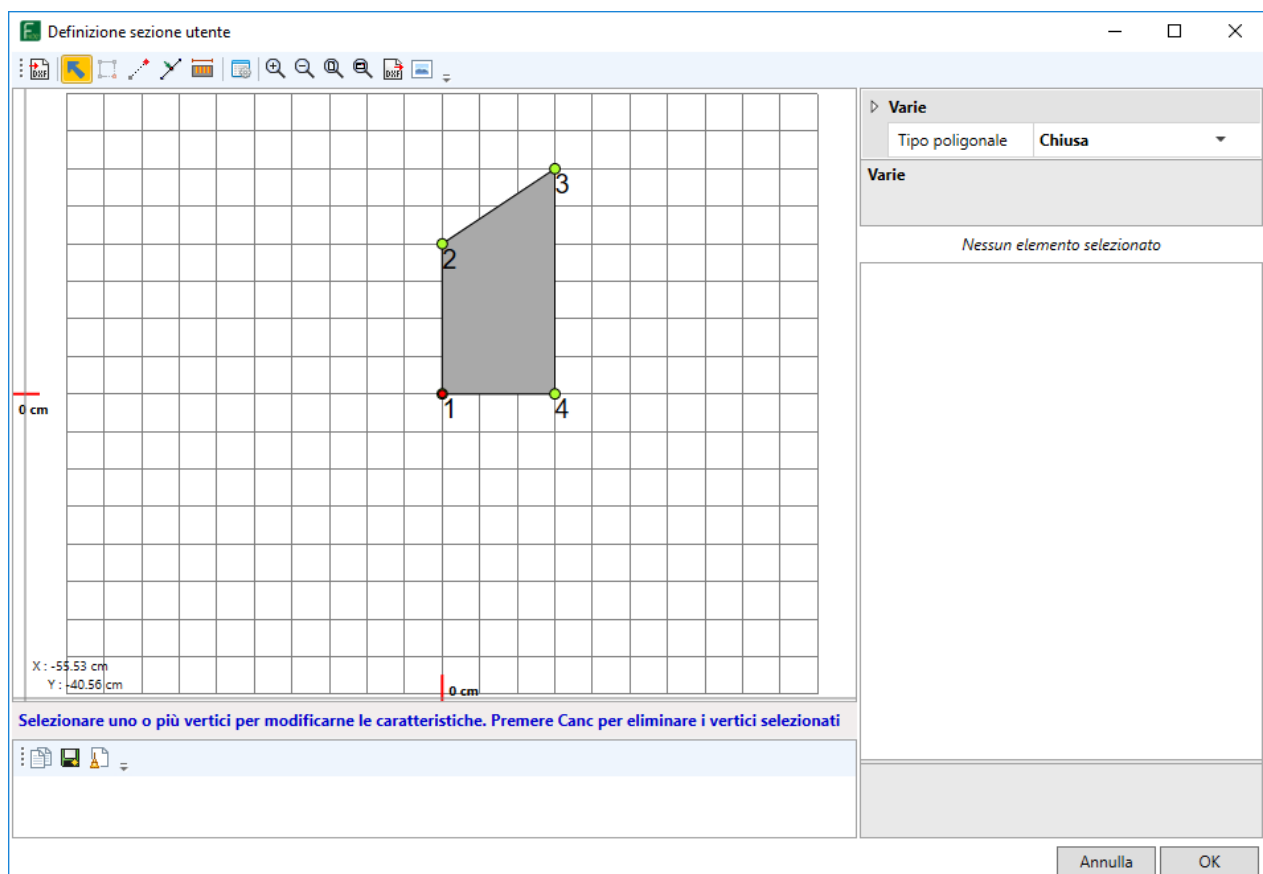


## 5 Come fare per (FAQ)


### 5.1 Creare una sezione di forma poligonale

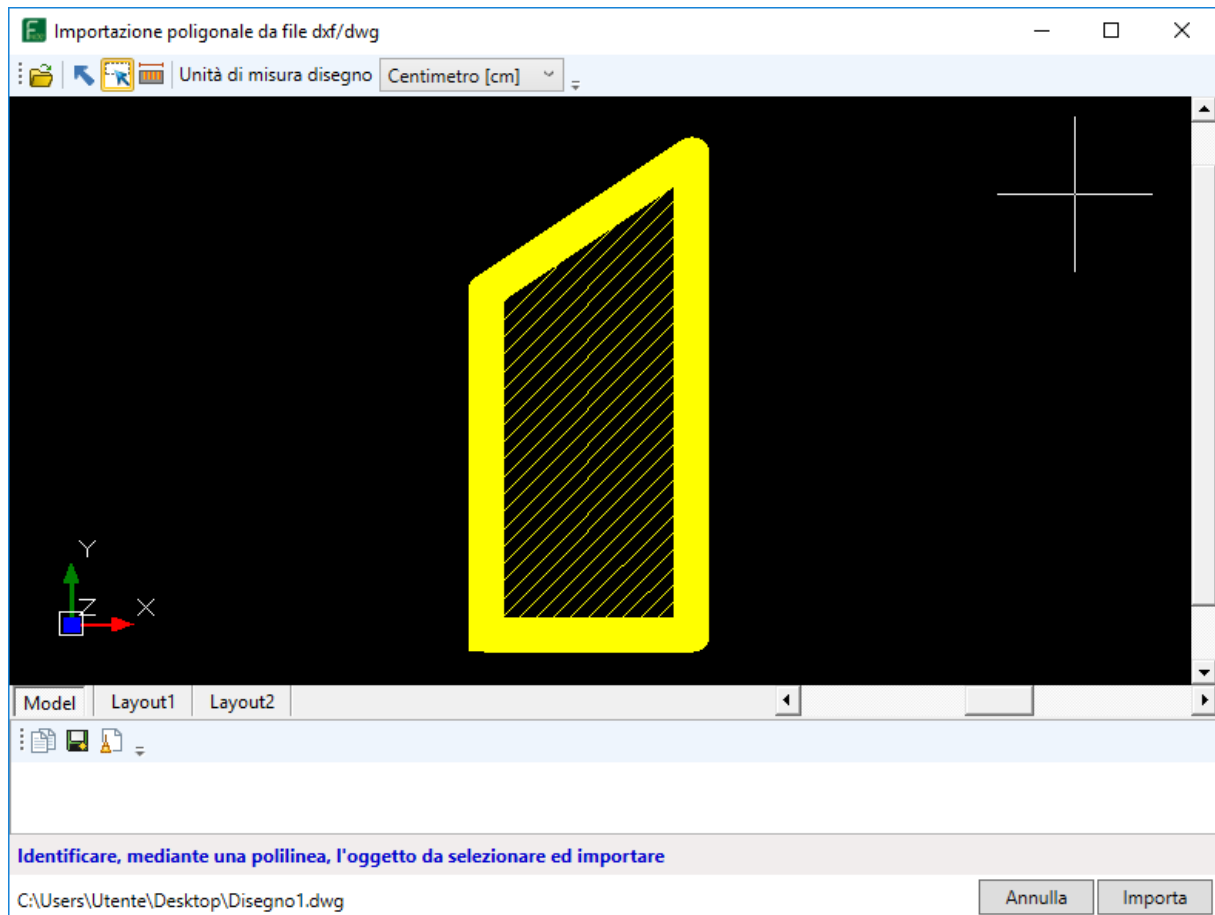
Per creare sezioni di forma poligonale qualsiasi, il tipo che può essere utilizzato è la "sezione utente".

Scegliendo la sezione "Utente" si apre la finestra per la creazione della sezione utente tramite poligono:







Sulla parte superiore di questo ambiente sono presenti i seguenti pulsanti:







- **Importa poligonale da file dxf/dwg**  Consente di importare un file dxf/dwg contenente il poligono della sezione utente. Alla pressione del corrispondente pulsante si apre la seguente finestra:



Sulla parte superiore di questo ambiente sono presenti i seguenti pulsanti:

- **Apri file dxf/dwg** . Consente di scegliere il file da importare;
- **Seleziona** . Selezionare un oggetto, tra quelli evidenziati, da importare;
- **Seleziona polilinea** . Identifica, mediante una polilinea, l'oggetto da selezionare e importare;
- **Calcola la distanza tra due punti** . Consente di misurare la distanza tra due punti sul disegno.

Selezionata la polilinea dell'oggetto da importare si completa cliccando sul pulsante "Importa".

- **Seleziona** . Permette di selezionare uno o più vertici per modificarne le caratteristiche. Premere "Canc" per eliminare i vertici selezionati.
- **Attiva/disattiva input grafico poligonale** . Consente di definire la poligonale per ottenere la sezione compatta chiusa. Premere il tasto destro del mouse per completare l'operazione.
- **Sosta punto** . Consente di spostare un punto della poligonale.
- **Spezza poligonale** . Consente di spezzare la poligonale della sezione.
- **Calcola la distanza tra due punti** . Consente di misurare la distanza tra due punti sul disegno.
- **Opzioni griglia** . Consente di modificare la griglia per l'introduzione delle coordinate dei vertici della



sezione.

Griglia	
Attiva griglia	<input checked="" type="checkbox"/>
Passo X [cm]	5.00
Passo Y [cm]	5.00
Nx	15
Ny	11
Origine	
X [cm]	-35.00
Y [cm]	-25.00

Annulla OK

Una volta definito il poligono della sezione, cliccando sul tasto "OK" si apre la seguente finestra:

**Tipologie asta**

Cerca [ ] Nuovo Elimina Duplica Converti Pulisci Annulla OK

**Utente (1)**  
Utente

Generalmente Caratteristiche elastiche


**Tipologia**

Nome tipologia	Utente (1)
Sezione utente	
Nome sezione	Sezione utente (1)
Passo mesh [cm]	5.00
Materiale	Calcestruzzo (1)
Punti grip a ingombro	<input type="checkbox"/>

Sezione utente  
Sezioni.

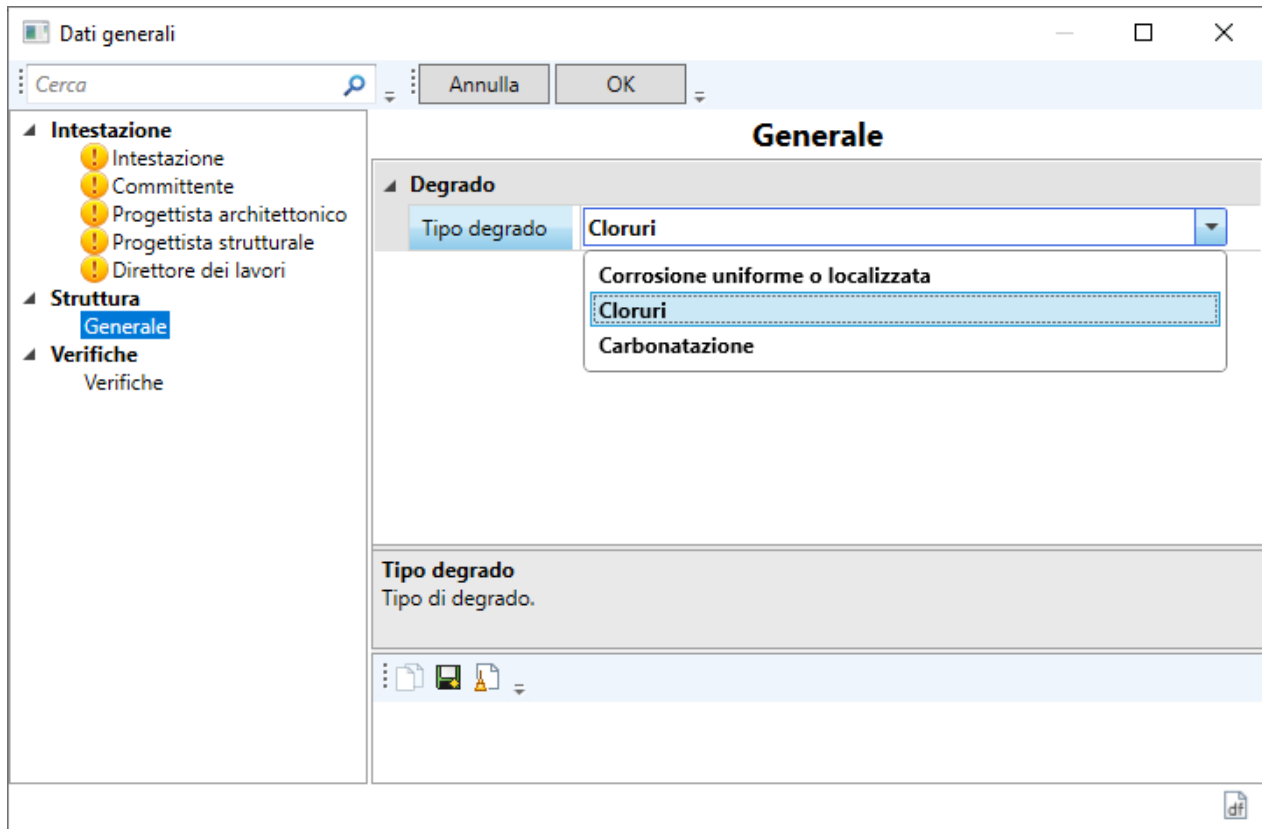
Per ciascuna tipologia di sezione sono presenti i seguenti campi:

- **Nome tipologia.** Nome da assegnare alla tipologia della sezione;
  - **Suggerimento nome** [ ]
- **Nome sezione.**
- **Passo mesh.** Passo mesh della sezione;

- **Materiale.** Materiale della sezione;
  - **Apri Editor** . Permette di andare all' editor delle tipologie materiali.
- **Punti grip a ingombro.** Permette di attribuire i punti del grip all'ingombro massimo della sezione.

## 5.2 Cambiare il tipo di degrado

Il tipo di degrado da analizzare viene scelto nella schermata "Dati Generali" contenuta nella barra "Home":



## 5.3 Cambiare le unità di misura


Per cambiare le unità di misura bisogna cliccare sul comando **"Unità di misura applicazione"** (in alto a destra della schermata principale):



Si apre la finestra **"Grandezze"**, si clicca sulla grandezza che si vuole modificare l'unità di misura in uso e si sceglie quella voluta:

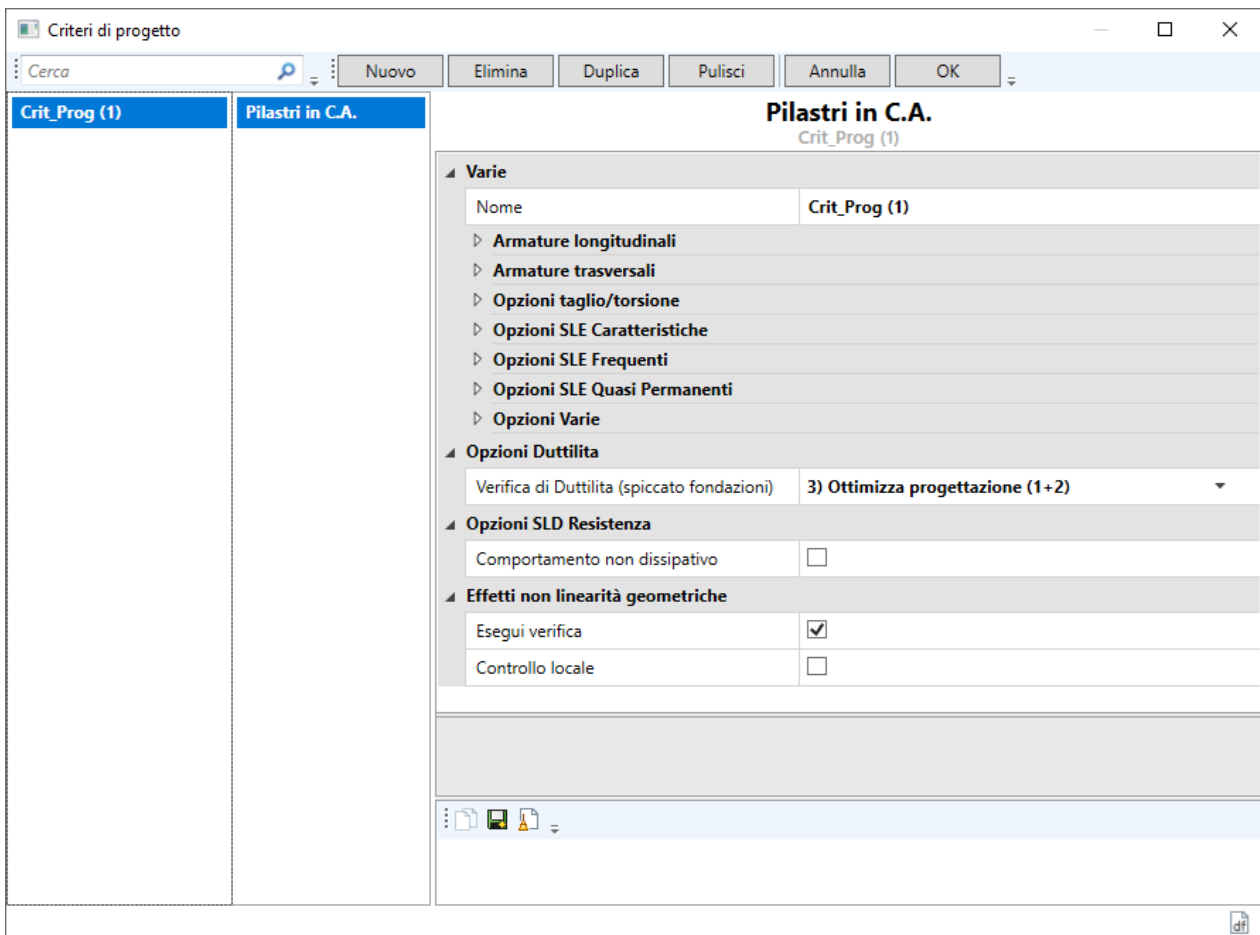
Unità di misura applicazione	
Grandezze	Unità di misura
Grandezze	Unità di misura in uso
Accelerazioni	Accelerazione di gravità (g)
Angoli	Sessagesimali (°)
Calore specifico	Joule/Kilogrammi per gradi celsius (J/Kg°C)
Calore specifico volumetrico	KiloJoule/metro cubo Kelvin (kJ/m³K)
Conducibilità termica	Watt/metro per grado celsius (W/m°C)
Densità	Kilogrammo/metro cubo (Kg/m³)
Dilatazione termica	1/Grado celsius (1/°C)
Frequenze	Hertz (Hz)
<b>Forze</b>	<b>KiloNewton (kN)</b>
Forze per unità di lunghezza	Newton (N)
Forze per unità di superficie	DecaNewton (daN)
Forze per unità di volume	KiloNewton (kN)
	MegaNewton (MN)
Inerzie	Millimetro alla quarta (mm⁴)
Inerzie massa	Kilogrammo per metro al quadrato (Kg/m²)
Inverso velocità	Secondi al millimetro (sec/mm)
Lunghezze	Centimetro (cm)
Lunghezze Acciaio	Millimetro (mm)
Lunghezze per unità di lunghezza	Centimetro su metro (cm/m)
Masse	Kilogrammo (Kg)
Momenti	KiloNewton per metro (kNm)

## 5.4 Gestire le preferenze verifiche

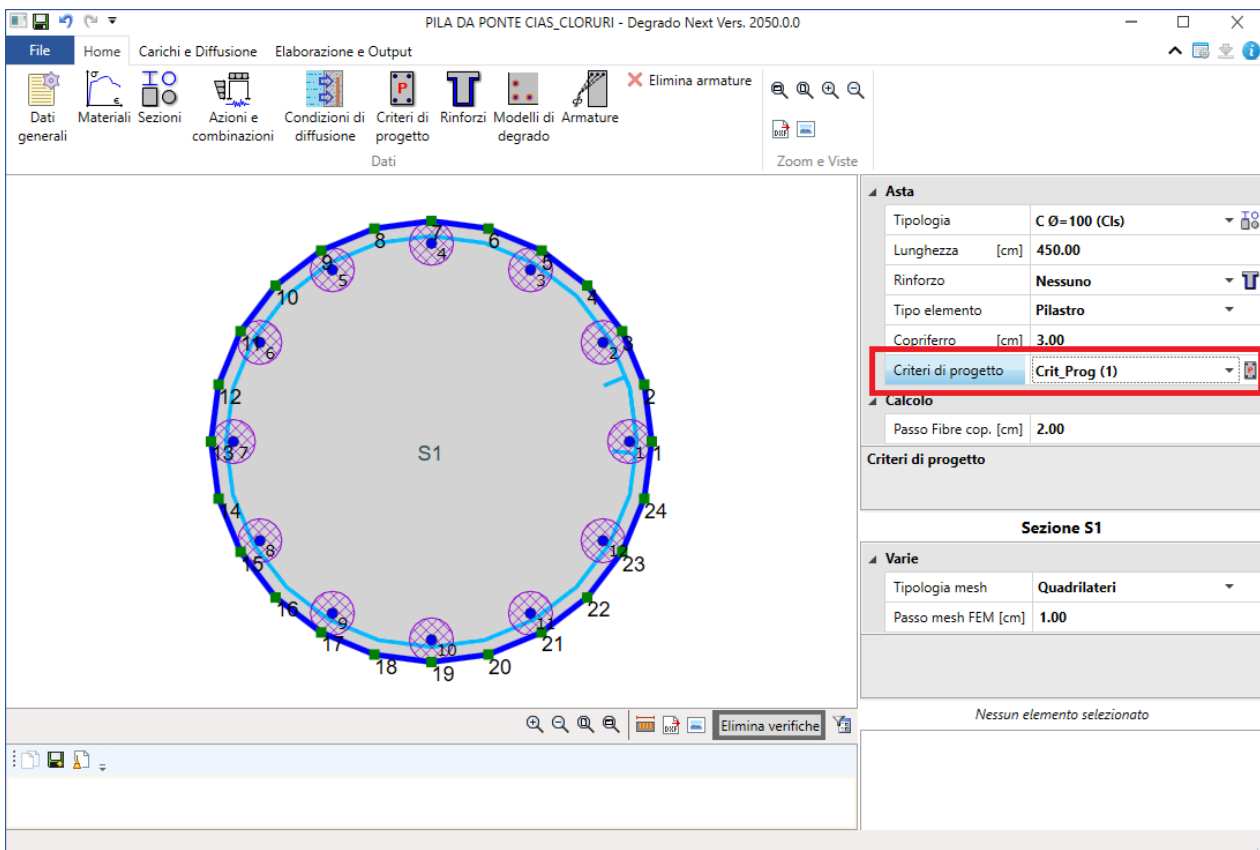
Per impostare le preferenze delle verifiche bisogna andare nella sezione "Dati" e cliccare su **"Criteri di progetto"** :



Si apre la seguente finestra tramite la quale è possibile creare nuovi "Criteri di progetto" per poi assegnarli agli elementi strutturali. Se ad esempio si vuole creare un nuovo criterio di progetto da assegnare agli elementi strutturali del secondo livello ed in particolare cambiare l'armatura dei pilastri si procede come segue. All'apertura della finestra si clicca sul pulsante "Nuovo", si definisce il nome (ad es. Criterio Secondo Livello), si sceglie la tipologia di elemento voluto (Pilastri in C.A.) e si settano i relativi parametri:



Creato il nuovo criterio di progetto, si assegna alla sezione corrente:



## 6 Requisiti di sistema

---

Per il corretto funzionamento del software vanno rispettati i seguenti requisiti minimi di sistema:

- Sistema Operativo : Windows 7 (Service Pack 1) o superiore.

## 7 Copyright

---



Tutto il materiale contenuto nella confezione (CD contenente i file dei software, chiave di protezione, altri supporti di consultazione) è protetto dalle leggi e dai trattati sul copyright, nonché dalle leggi e trattati sulle proprietà intellettuali.

E' vietata la cessione o la sub-licenziazione del software a terzi.

E' altresì vietata la riproduzione del presente manuale in qualsiasi forma e con qualsiasi mezzo senza la preventiva autorizzazione scritta del produttore.

Informazioni e permessi sui prodotti o parti di essi possono essere richiesti a:



**Stacec s.r.l.**

Corso Umberto I, 358  
89034 – Bovalino (RC)

Tel. 0964/67211 - Fax. 0964/61708

[www.stacec.it](http://www.stacec.it)  
[stacec@stacec.com](mailto:stacec@stacec.com)



*Revisione documento: 1.2022 - venerdì 15 aprile 2022*