



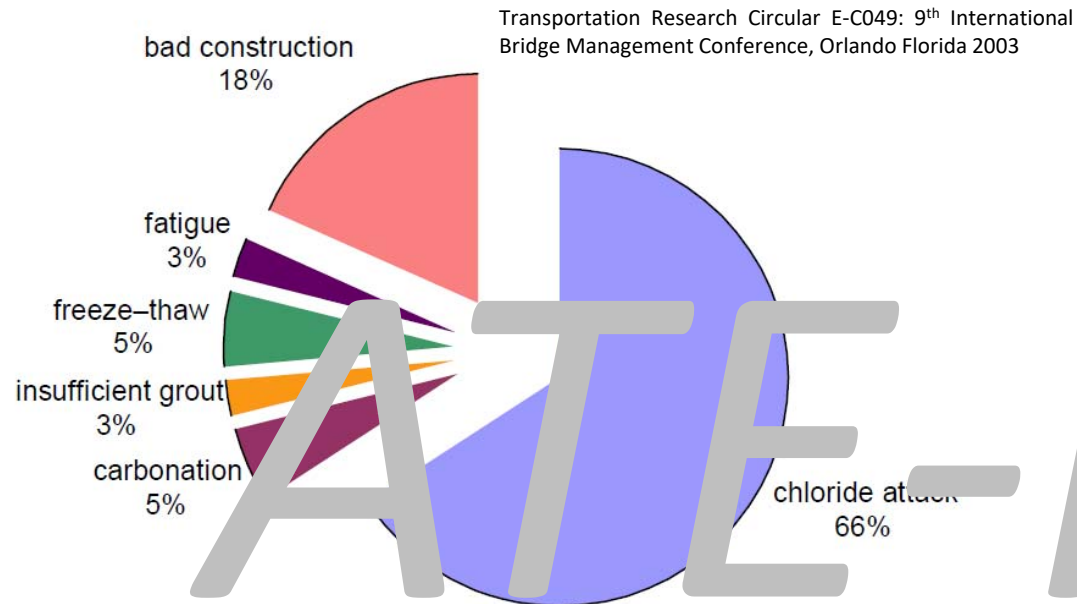
**POLITECNICO**  
MILANO 1863

**Corsi di Formazione ATE-mCD "La durabilità del calcestruzzo"**  
**PROGETTARE LA PREVENZIONE DELLA CORROSIONE: MIX DESIGN DEL CALCESTRUZZO,**  
**DETTAGLI COSTRUTTIVI, ASPETTI OPERATIVI**

**Prof. Maddalena Carsana**



# DEGRADO delle strutture in calcestruzzo armato



- PROGETTO
- REALIZZAZIONE
- ISPEZIONE, MONITORAGGIO e MANUTENZIONE PROGRAMMATA

## PREVENZIONE della corrosione

### REGOLA del 5 (De Sitter)

**1€** speso per ottenere una struttura progettata e realizzata correttamente

è efficace quanto spendere:

**5€** (quando la corrosione non è ancora attiva)

**25€** (quando la corrosione è iniziata in alcuni punti)

**125€** (quando la corrosione interessa un' ampia parte)

- PROGETTO
- REALIZZAZIONE
- ISPEZIONE, MONITORAGGIO e MANUTENZIONE PROGRAMMATA



# Durabilità delle strutture in calcestruzzo armato

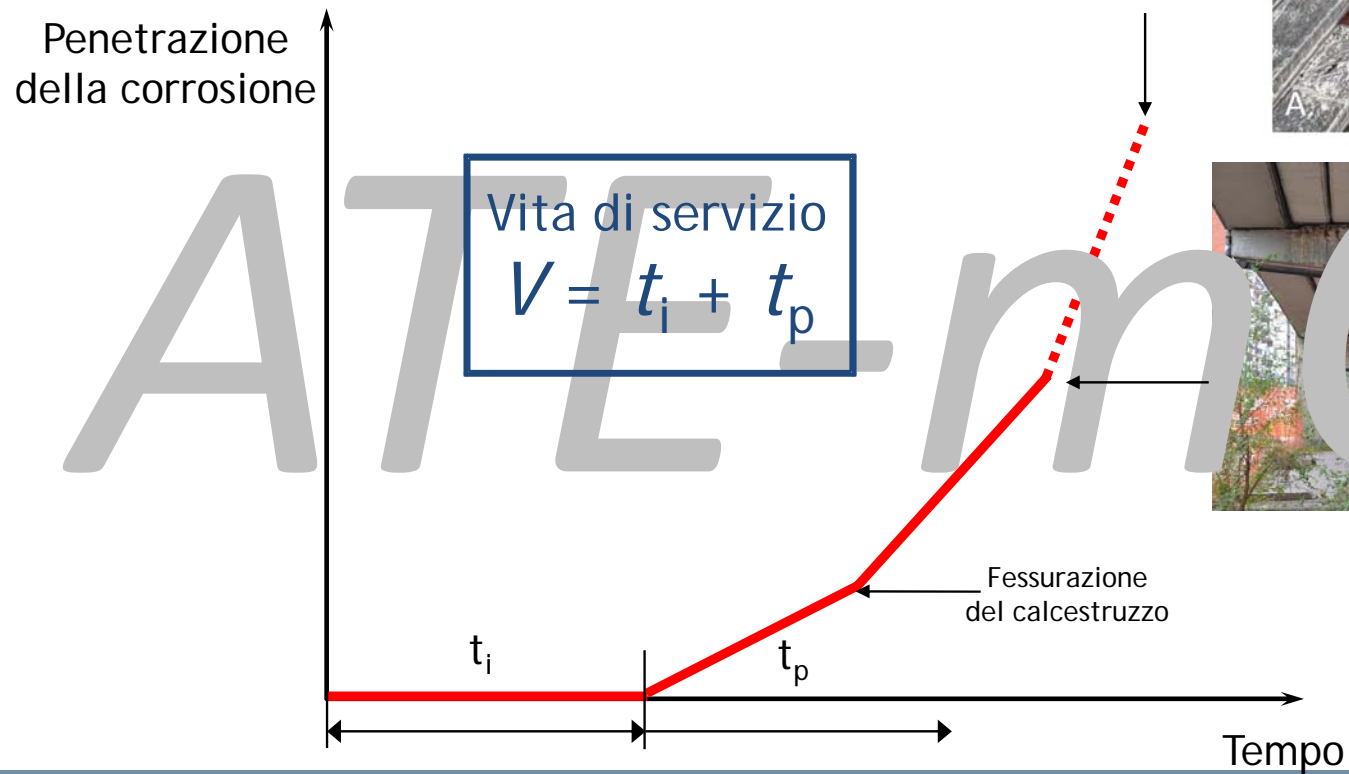
Carsana, M., Biondini, F., Redaelli, E., Valoti, D.O., 2021. On site-corrosion characterization of 50-year-old PC deck beams. EUROSTRUCT 2021



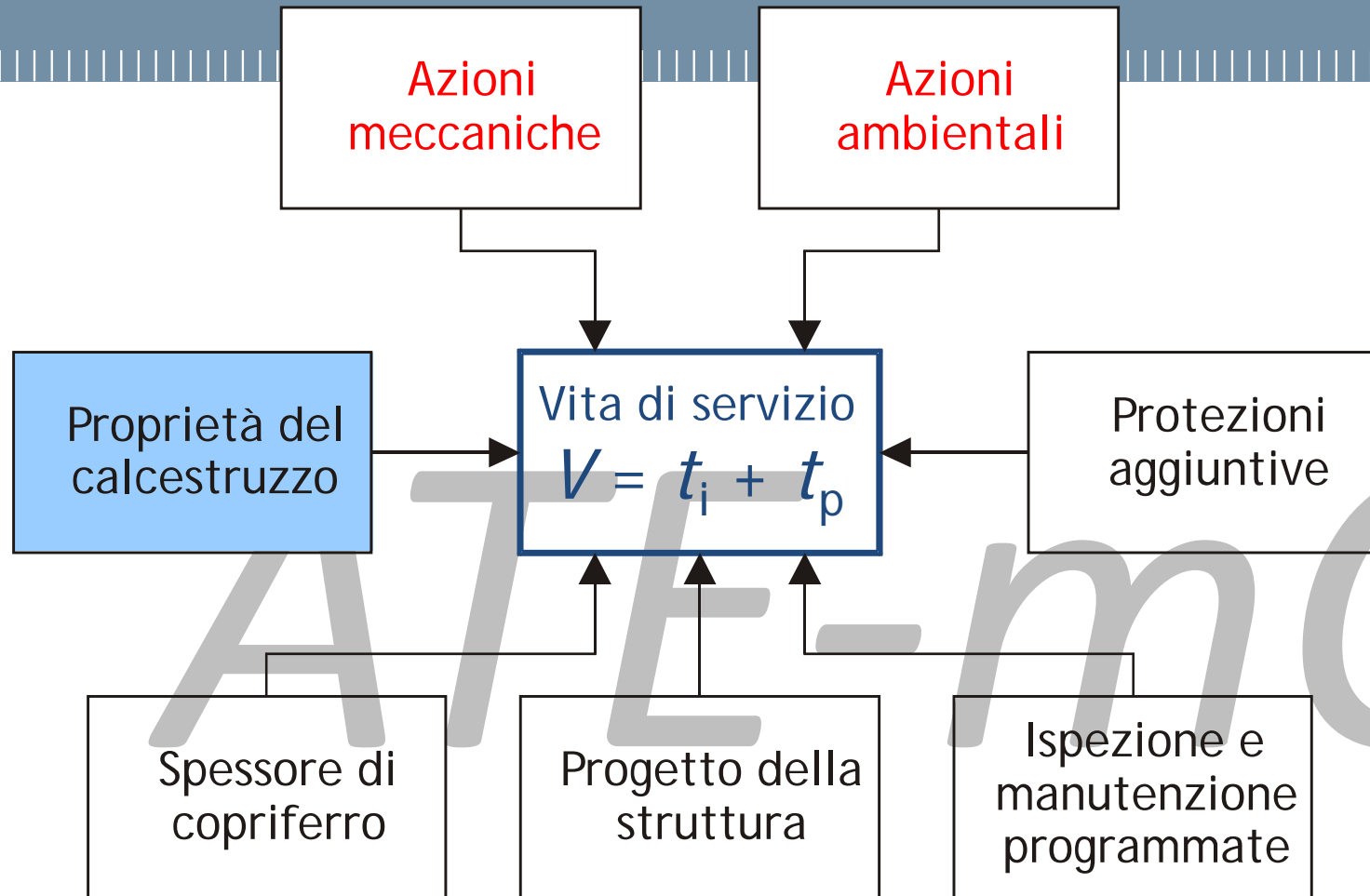
Collasso della struttura



Distacco del calcestruzzo



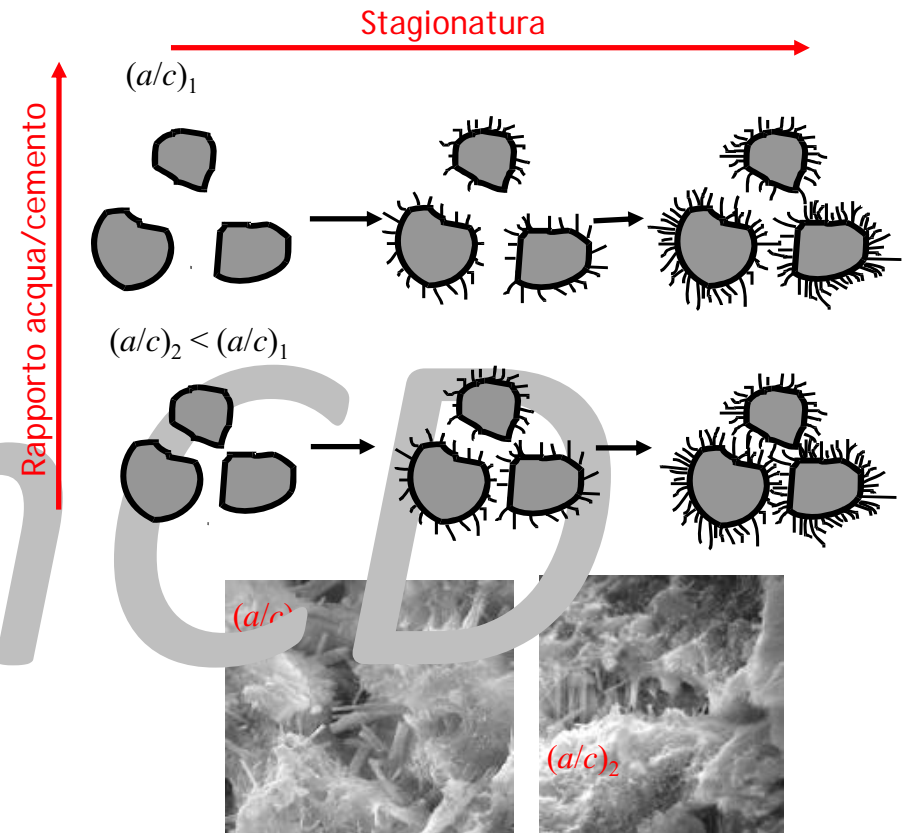
## Fattori di progetto della durabilità



# Fattori di progetto della durabilità – Proprietà del calcestruzzo

## Proprietà del calcestruzzo

- Rapporto a/c
- Stagionatura
- Tipo di cemento / aggiunte
- Contenuto di cemento
- Additivi
- Lavorabilità
- Posa in opera
- Resistenza a compressione
- Calcestruzzi speciali (SCC, HPC, ...)

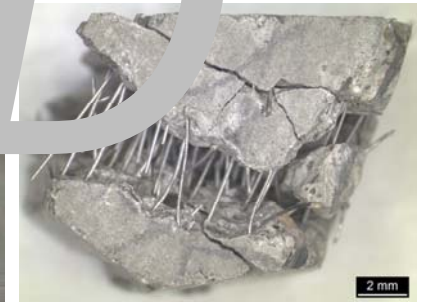
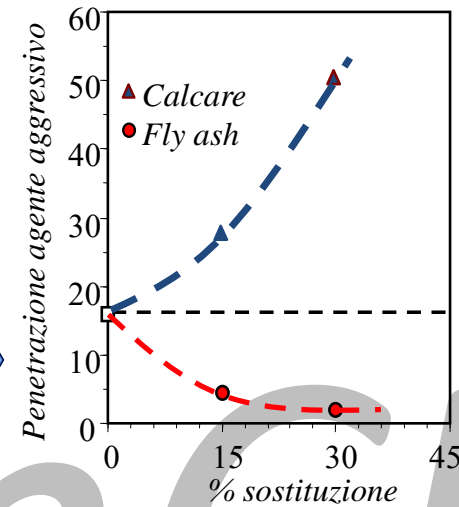


# Fattori di progetto della durabilità – Proprietà del calcestruzzo

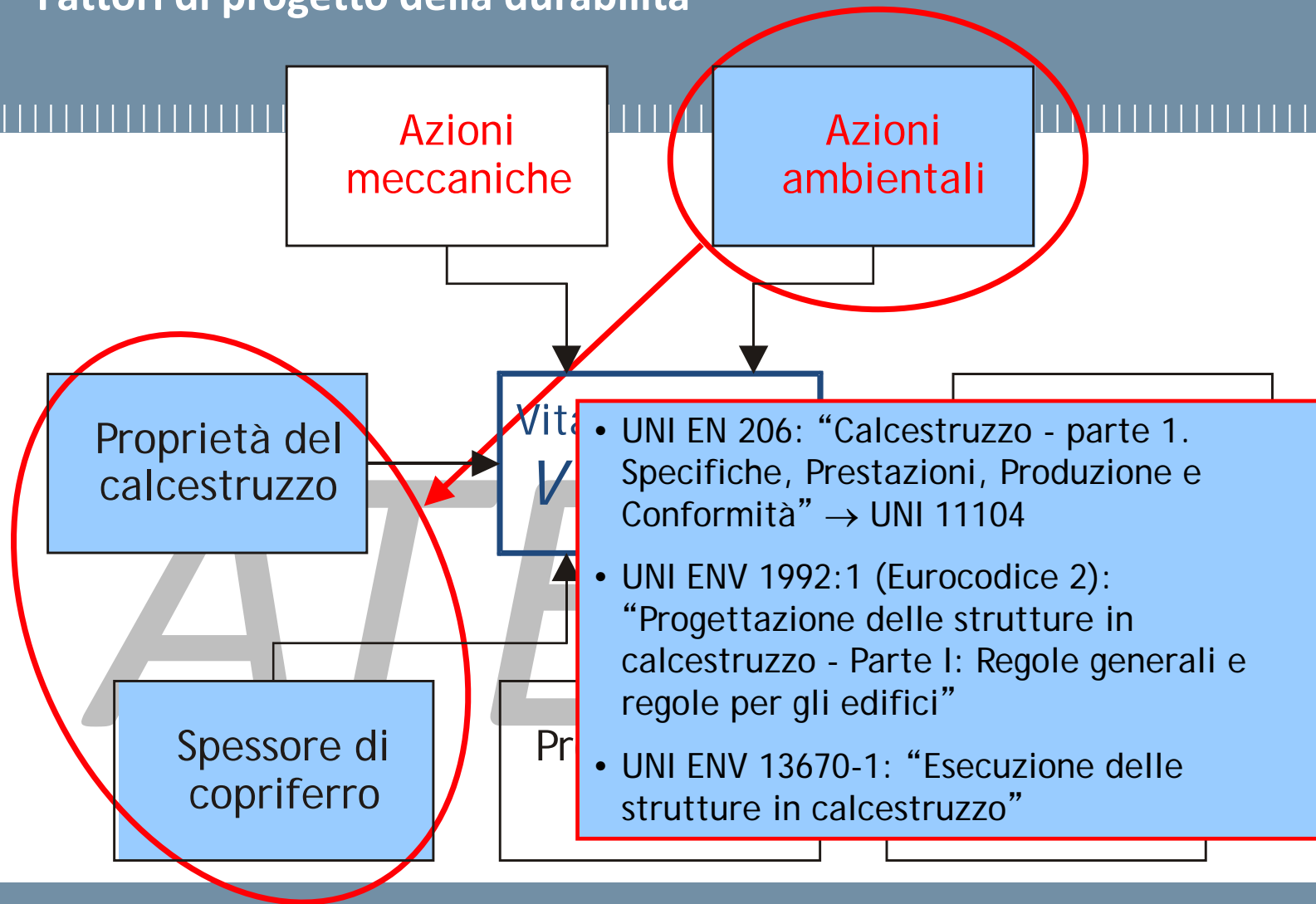
↓  
**CONTROLLI in OPERA del CALCESTRUZZO**

Proprietà del calcestruzzo

- Rapporto a/c
- Stagionatura
- Tipo di cemento / aggiunte
- Contenuto di cemento
- Additivi
- Lavorabilità
- Posa in opera
- Resistenza a compressione
- Calcestruzzi speciali (SCC, HPC, ...)

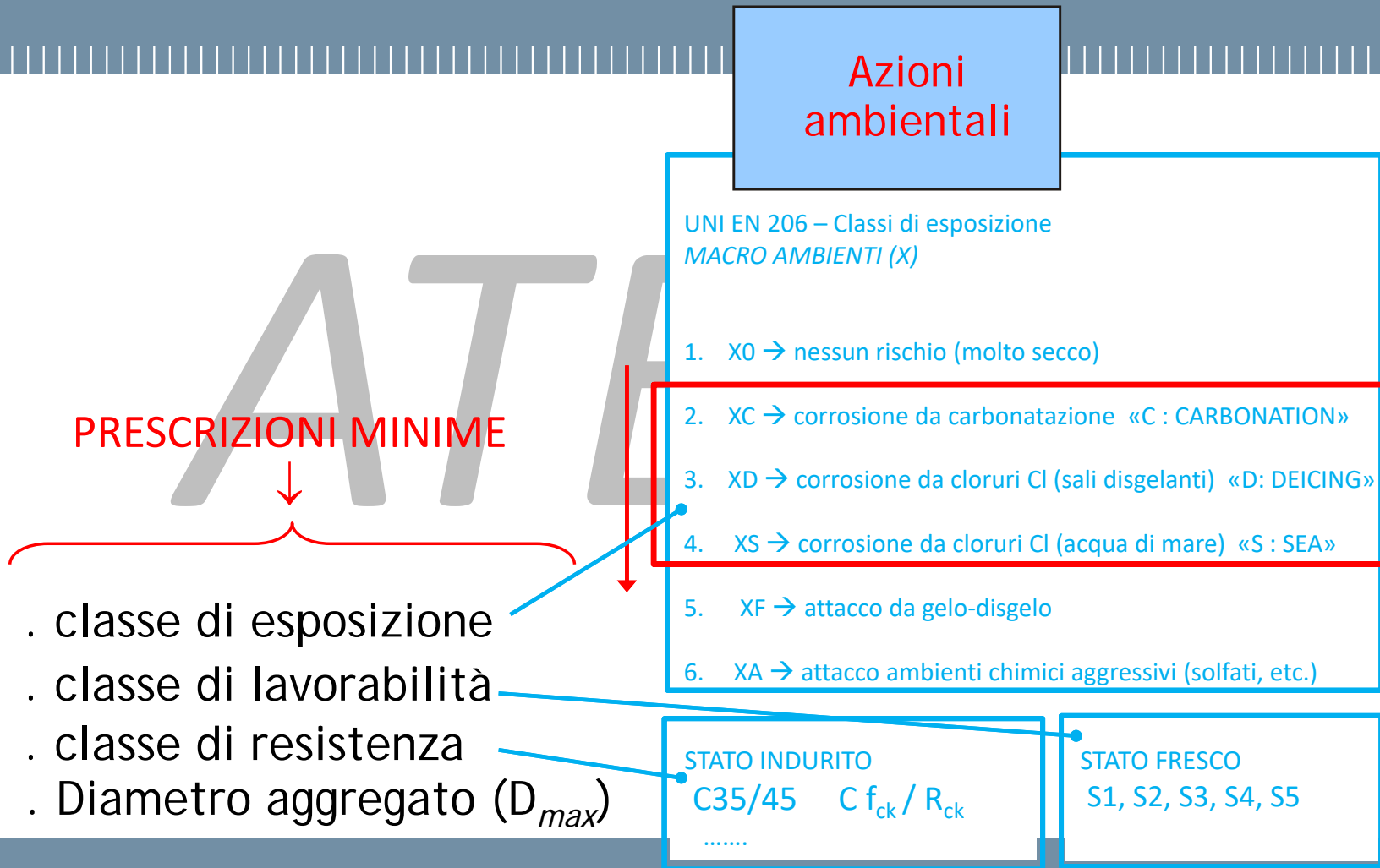


## Fattori di progetto della durabilità



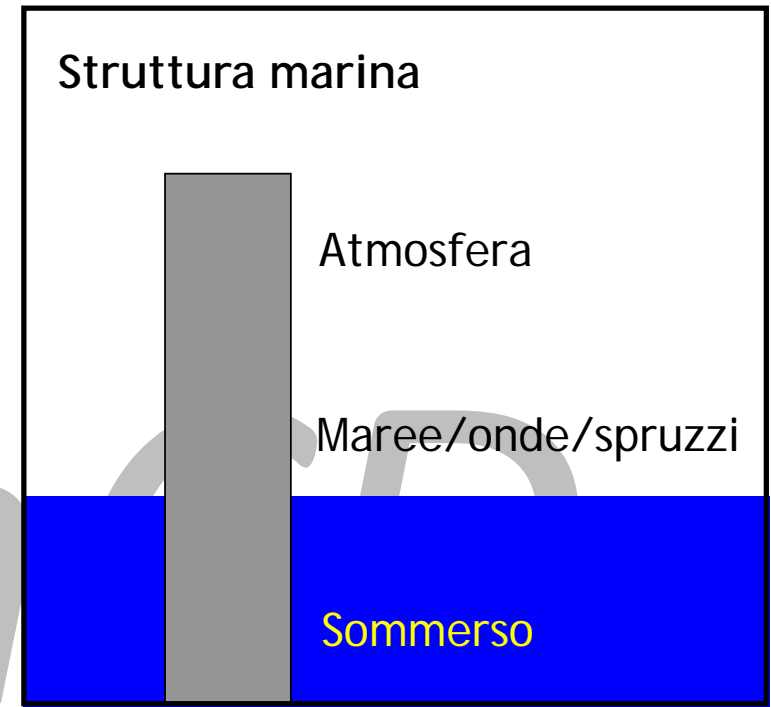


# Fattori di progetto della durabilità – Azioni ambientali



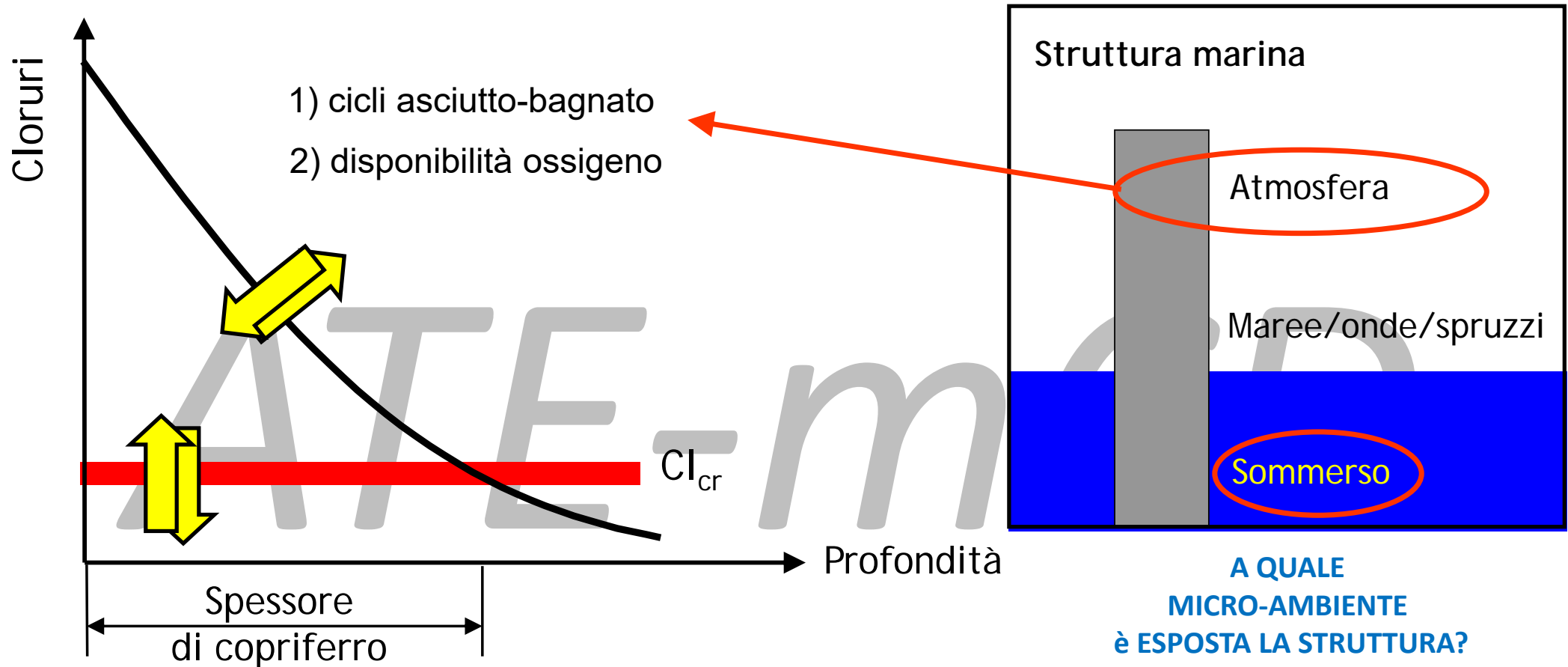
## Fattori di progetto della durabilità – Azioni ambientali

Classe di esposizione	
Nessun rischio	<i>X0</i>
Corrosione da carbonatazione	<i>XC1</i> (secco/saturo) <i>XC2</i> (sempre umido) <i>XC3</i> (mod. umido) <i>XC4</i> (cicli bagn.)
Corrosione da cloruri da acqua di mare	<i>XS1</i> (sulla costa) <i>XS2</i> (sommerso) <i>XS3</i> (spruzzi)
Corrosione da cloruri da altre fonti	<i>XD1</i> (mod. umido) <i>XD2</i> (umido) <i>XD3</i> (cicli bagn.)



**A QUALE  
MICRO-AMBIENTE  
È ESPOSTA LA STRUTTURA?**

## Fattori di progetto della durabilità – Azioni ambientali



## Fattori di progetto della durabilità – Azioni ambientali

Classe di esposizione		Max. a/c	Min. resist.	Min. cem. (kg/m <sup>3</sup> )
Nessun rischio	<i>X0</i>	-	C12/15	-
Corrosione da carbonatazione	<i>XC1</i> (secco o sat)	0,65	C20/25	260
	<i>XC2</i> (umido, raro sec)	0,60	C25/30	280
	<i>XC3</i> (mod. umido)	0,55	C30/37	280
	<i>XC4</i> (cicli asc/bagn.)	0,50	C30/37	300
Corrosione da cloruri da acqua di mare	<i>XS1</i> (sulla costa)	0,50	C30/37	300
	<i>XS2</i> (sommerso)	0,45	C35/45	320
	<i>XS3</i> (spruzzi)	0,45	C35/45	340
Corrosione da cloruri da altre fonti	<i>XD1</i> (mod. umido)	0,55	C30/37	300
	<i>XD2</i> (umido, raro sec)	0,55	C30/37	300
	<i>XD3</i> (cicli asc./bagn.)	0,45	C35/45	320

**vita utile di 50 anni**

CD

**Progettista**

**Preconfezionatore**

POLITECNICO MILANO 1863

## UNI ENV 13670-1 - Stagionatura

**Tempi minimi di stagionatura** (in giorni) secondo la norma UNI EN 13670 per la classe di stagionatura 3 (che prevede di raggiungere una resistenza sulla superficie del calcestruzzo pari al 50% della resistenza caratteristica).

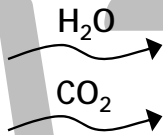
Temperatura della superficie del calcestruzzo ( $T$ ):	Sviluppo resistenza calcestruzzo: $r = R_{cm2}/R_{cm28}$		
	Rapido $r \geq 0.50$	Medio $0.30 > r \geq 0.50$	Lento $0.15 > r \geq 0.30$
$T \geq 25$	1.5	2.5	3.5
$25 > T \geq 15$	2.0	4	7
$15 > T \geq 10$	2.5	7	12
$10 > T \geq 5$	3.5	9	18

# Fattori di progetto della durabilità – Spessore di copriferro

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

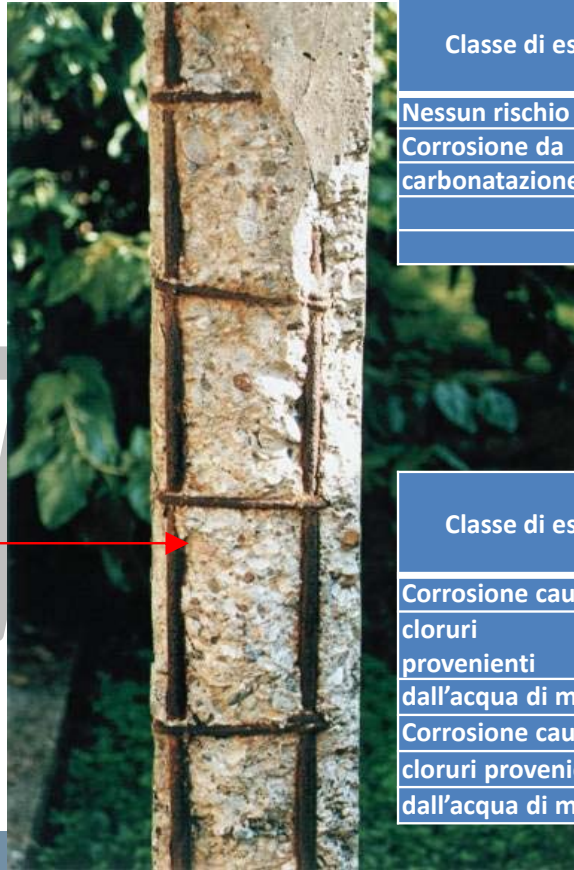
Tempo di innesco:

$$t_i = \left( \frac{c}{K} \right)^2$$



Spessore effettivo in opera

Spessore di copriferro



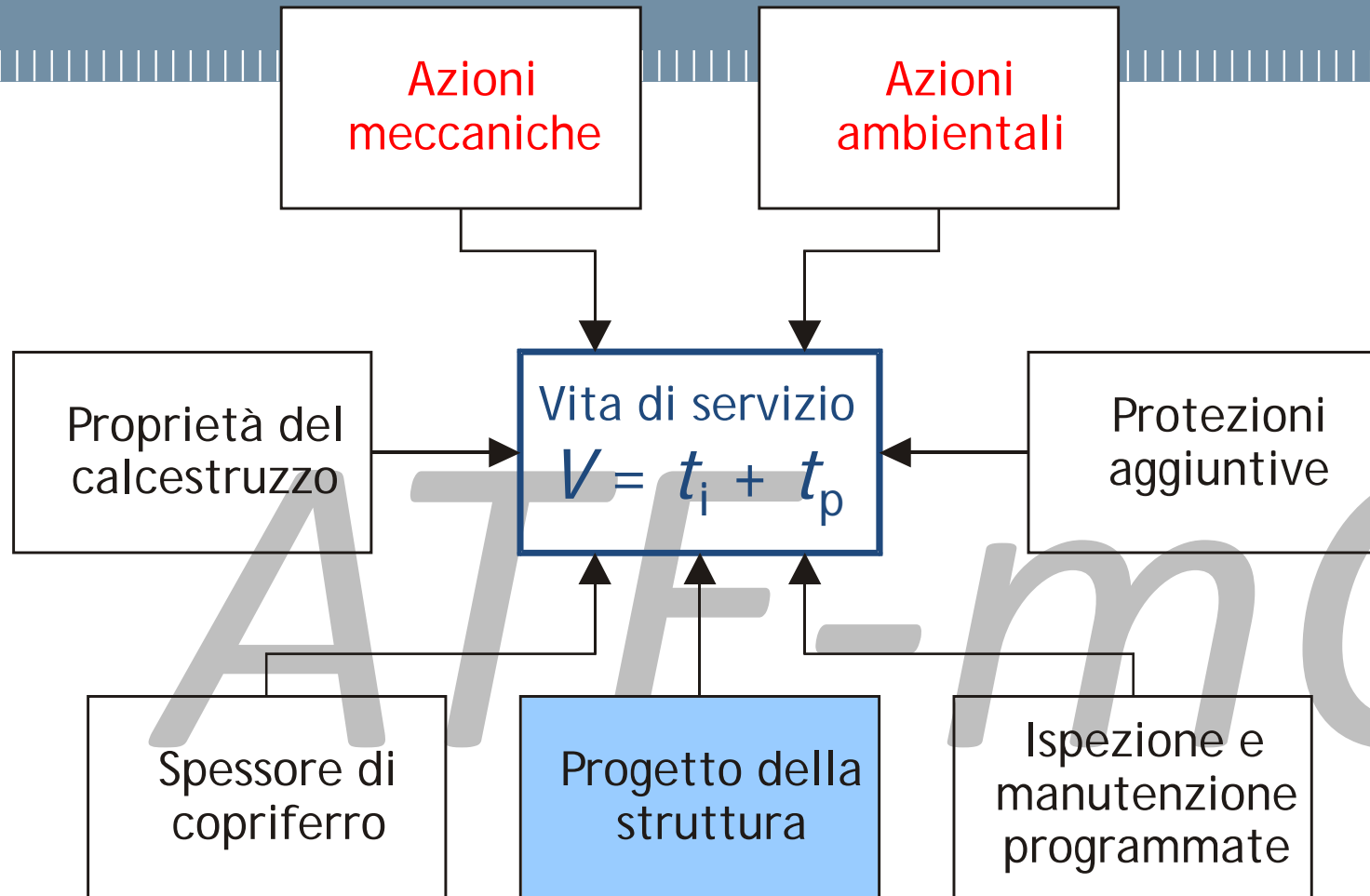
## Corrosione da carbonatazione

Classe di esposizione		Max. a/c	Min. classe	Min. cemento	Min. spessore copriferro (mm)	
			resistenza (MPa)	(kg/m <sup>3</sup> )	c.a.	c.a.p.
Nessun rischio	X0	-	C12/15	-	10	10
Corrosione da carbonatazione	XC1	0.65	C20/25	260	15	25
	XC2	0.60	C25/30	280	25	35
	XC3	0.55	C30/37	280	25	35
	XC4	0.50	C30/37	300	30	40

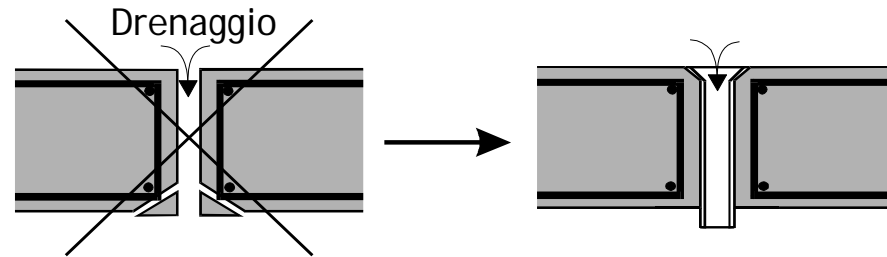
## Corrosione da cloruri

Classe di esposizione		Max. a/c	Min. classe	Min. cemento	Min. spessore copriferro (mm)	
			resistenza (MPa)	(kg/m <sup>3</sup> )	c.a.	c.a.p.
Corrosione causata da cloruri non provenienti dall'acqua di mare	XD1	0.55	C30/37	300	35	45
	XD2	0.55	C30/37	300	40	50
	XD3	0.45	C35/45	320	45	55
Corrosione causata da cloruri provenienti dall'acqua di mare	XS1	0.50	C30/37	300	35	45
	XS2	0.45	C35/45	320	40	50
	XS3	0.45	C35/45	340	45	55

## Fattori di progetto della durabilità – Progetto della struttura



## Fattori di progetto della durabilità – Progetto della struttura

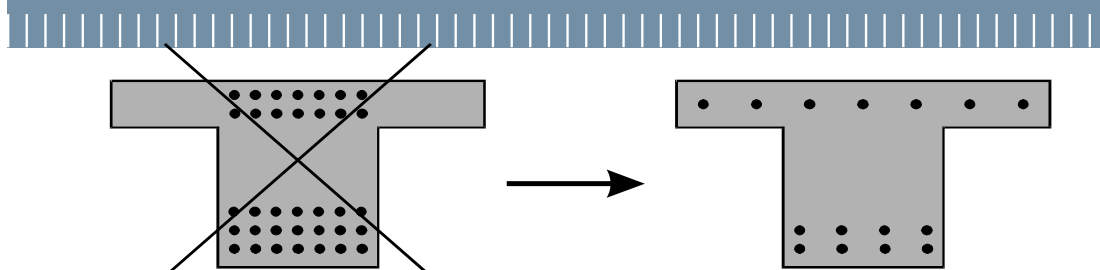
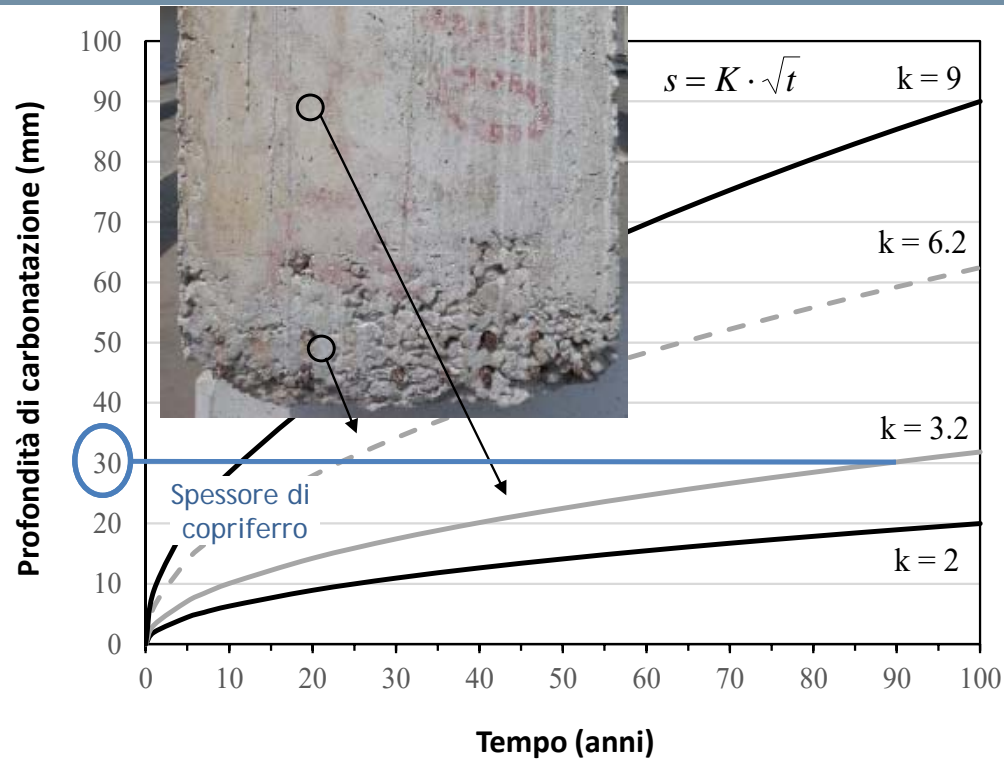


ATE-mCD

Progetto della  
struttura



# Fattori di progetto della durabilità – Progetto della struttura

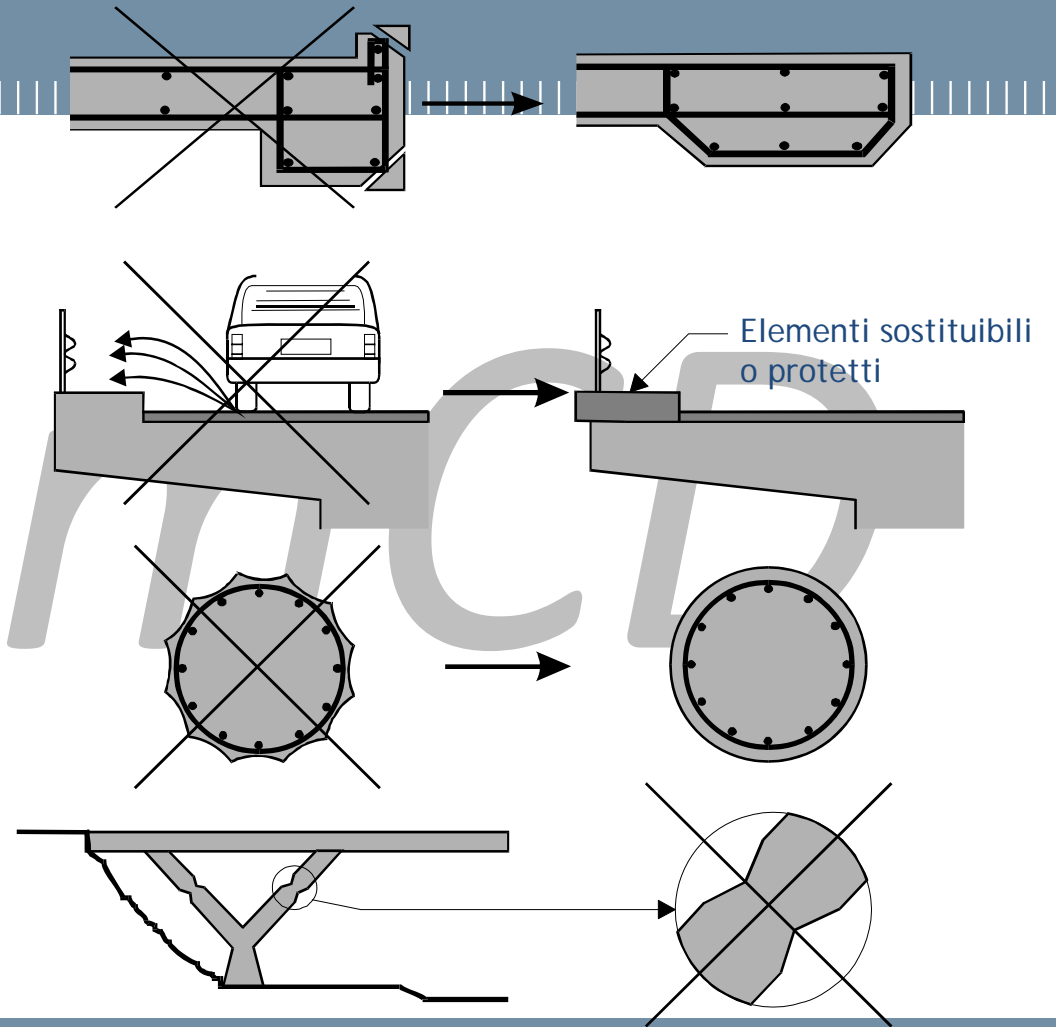


Progetto della struttura

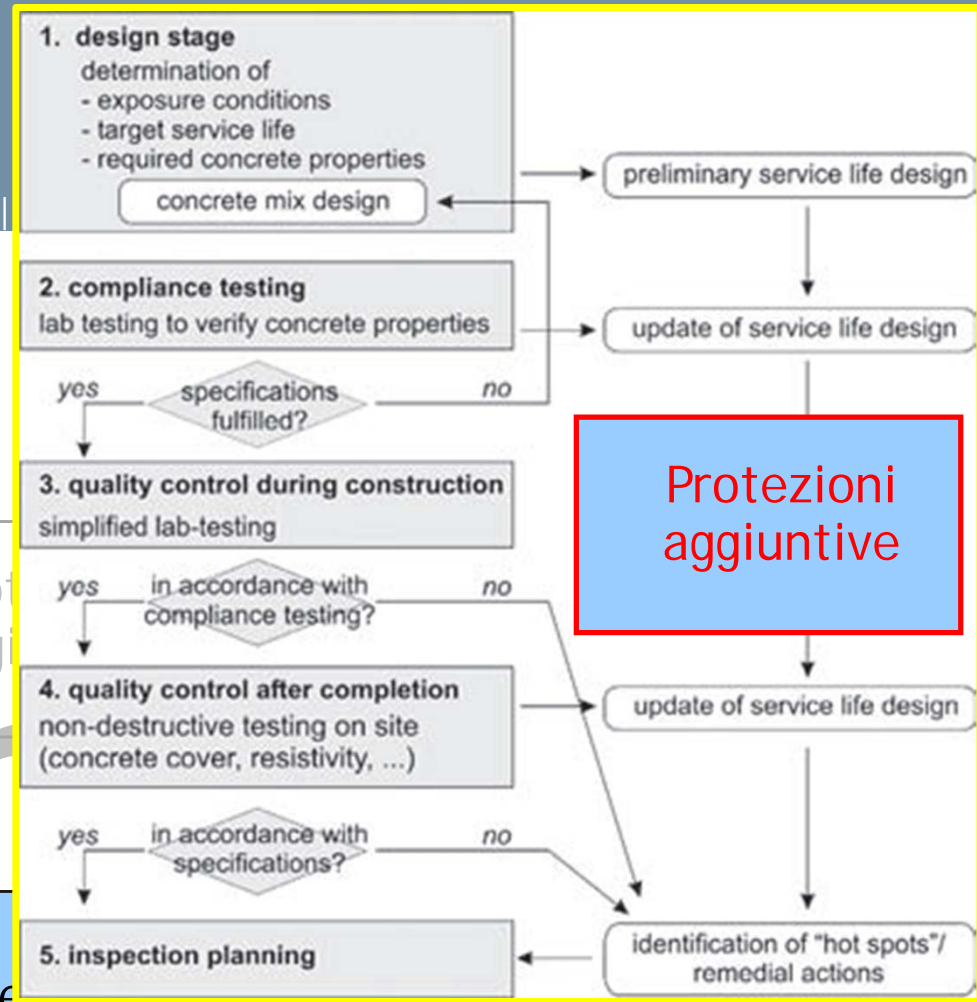
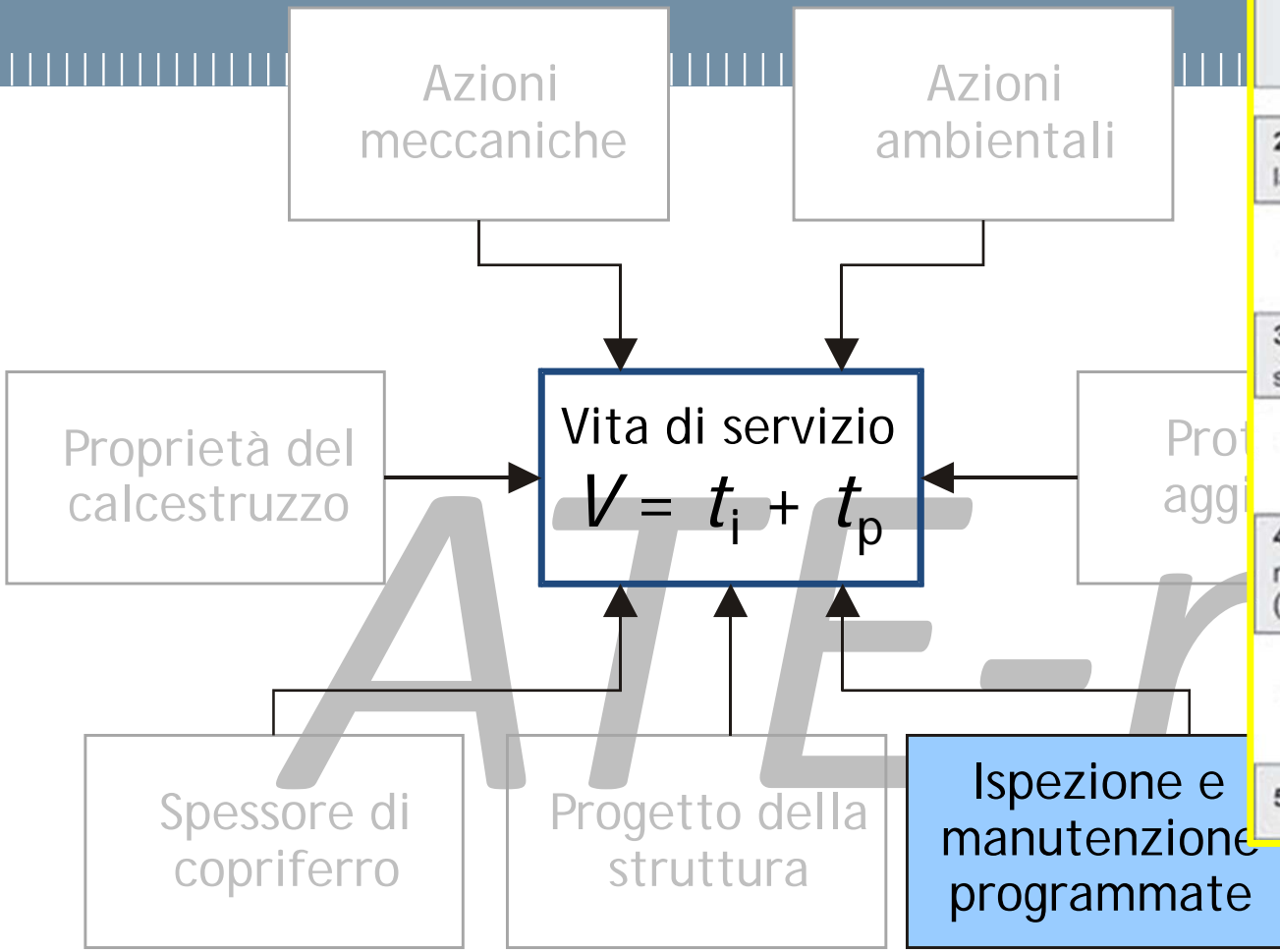
## Fattori di progetto della durabilità – Progetto della struttura

ATE-*ma*

Progetto della  
struttura



# Fattori di progetto della durabilità – Ispezione



"Birth certificate"

Corsi di formazione ATE-mCD:  
La durabilità del calcestruzzo

***Grazie dell'attenzione***

**I** CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE  
TECNOLOGI  
PER L'EDILIZIA



## Riferimenti

Bertolini, L., *Materiali da Costruzione, Degrado, Prevenzione, Diagnosi, Restauro, Volume II, Seconda Edizione*, CittàStudi Edizioni, 2012.

Gastaldi, M., *Prevenzione della corrosione delle armature. Approccio prescrittivo*. Structural, 184 – gennaio 2014, paper 01. ISSN 2282-3794.

Bertolini, L., *Prevenzione. Tecnologia del calcestruzzo. Messa in opera e controlli*. Structural, 188 – giugno 2014, paper 16. ISSN 2282-3794.

Transportation Research Circular E-C049: 9th International Bridge Management Conference, Orlando Florida 2003.