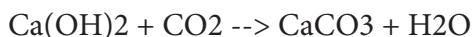


LA RESISTENZA ALLA CORROSIONE

L'acciaio al carbonio impiegato nelle barre di rinforzo è normalmente protetto dalla corrosione in quanto il calcestruzzo è un ambiente ad elevata basicità (pH 12-13); in tali condizioni il ferro, elemento base negli acciai al carbonio è in condizioni di passività.

Tuttavia per effetto delle condizioni di esercizio non sempre è possibile garantire l'integrità fisica e strutturale del calcestruzzo. In presenza di fenomeni di carbonatazione (aggressione chimica dell'anidride carbonica dell'atmosfera verso il calcestruzzo ed in particolare la calce del conglomerato), si assiste ad una diminuzione del livello di pH a seguito della nota reazione



La diminuzione di alcalinità del calcestruzzo permette l'innesco e la propagazione di estesi fenomeni corrosivi sulle barre di rinforzo in acciaio al carbonio, con formazione di ossidi e/o idrossidi di ferro (la tipica ruggine).



Se a questo, poi, si aggiunge il fatto che, in alcune applicazioni il calcestruzzo subisce contaminazioni più o meno rilevanti da parte di soluzioni saline (ovvero si assiste ad una penetrazione di cloruri nel calcestruzzo) il problema lamentato può diventare assai rilevante nei confronti della resistenza della struttura.

In alcuni esempi mostrati in fig. 1 è evidente come i fenomeni corrosivi siano spesso associati alla formazione di ruggine che, avendo un volume specifico fino a 6-8 volte maggiore rispetto al ferro delle barre, provoca la fessurazione, la disgregazione ed in taluni casi il distacco del copriferro dal calcestruzzo (fenomeno detto "spalling").



Fig. 1

Negli acciai inossidabili la presenza di cromo in quantità rilevanti conferisce loro la capacità di "autopassivarsi" in modo spontaneo quando la superficie pulita entra in contatto con un ambiente esterno, corrosivo o ossidante (Fig.2).

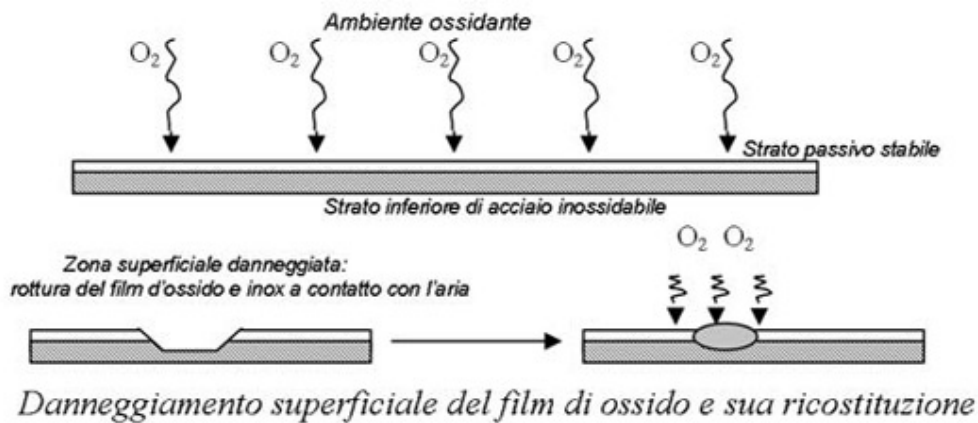


Fig. 2 - Schema esemplificativo del meccanismo di passivazione dell'acciaio inossidabile.

Oltre al cromo, gli elementi che contribuiscono ad aumentare la resistenza alla corrosione sono:

Molibdeno

Nichel

Azoto

Il carbonio agisce in funzione inversamente proporzionale: minore è il suo contenuto, maggiore è la resistenza alla corrosione .

In calcestruzzi con pH alcalino o anche neutro (dopo il processo di carbonatazione) gli acciai inossidabili non subiscono corrosione (Fig. 3).

Fenomeni di corrosione nelle barre di rinforzo in acciaio inossidabile si osservano solo in presenza di una concentrazione rilevante di cloruri penetrati attraverso il calcestruzzo reso poroso dalla carbonatazione stessa. Una volta che tale concentrazione supera una soglia critica allora si osserva una riduzione ed annullamento localizzato dello strato di ossido passivo e la corrosione, in quel punto, può iniziare, a patto che sia presente un'opportuna quantità di ossigeno. Il fenomeno è meglio conosciuto come pitting (o vaiolatura).

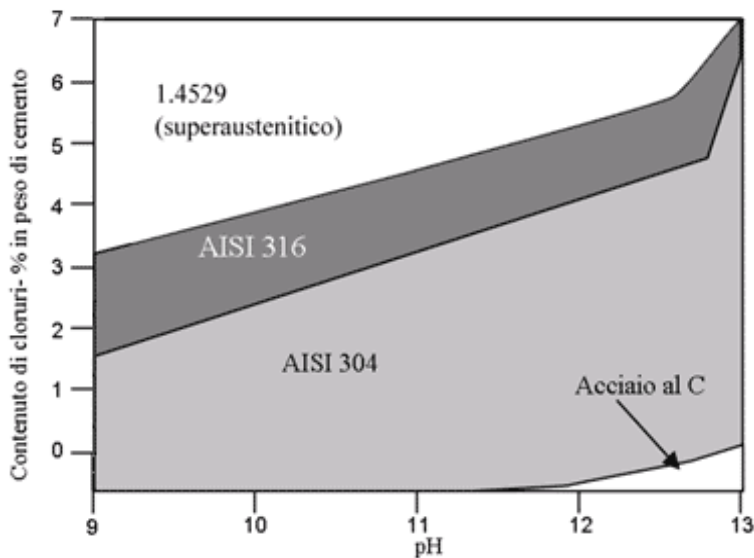


Fig. 3 - Condizioni di impiego in sicurezza dei diversi acciai in funzione della concentrazione dei cloruri e del pH

Un modo semplice per valutare la resistenza alla corrosione da pitting per gli acciai inossidabili è il cosiddetto coefficiente o indice PREN (Pitting Resistance Equivalence Number) dato dalle formule

$PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$ (per gli acciai austenitici)

$PREN = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N$ (per gli acciai duplex)

Sulla base delle sopracitate formule possiamo fare una classifica per gli acciai inossidabili di comune impiego come barre di rinforzo per calcestruzzo:

AISI	EN 10088-1	Marca Cogne	Indice PREN
304L - austenitico	1.4301	304HT	18
316L - austenitico	1.4436	316HT	25
329 - duplex	1.4462	329HT	35
---- superaustenitico	1.4529	354/1	45

Tab. 2 - Classifica degli acciai inossidabili impiegati nel calcestruzzo in funzione della loro resistenza al pitting

Classe	Tipo di calcestruzzo e condizioni ambientali	Livello di aggressività	Tipo di acciaio inossidabile raccomandato	
			Applicazioni comuni	Strutture ad elevata sicurezza
1	<ul style="list-style-type: none"> Calcestruzzo normalmente carbonatato Ambiente leggermente alcalino Assenza di cloruri 	Modesto	1.4301 (AISI 304L)	1.4301 (AISI 304L)
2	<ul style="list-style-type: none"> Calcestruzzo con normale livello di alcalinità e $Cl^- < 1\%$ Calcestruzzo leggermente carbonatato 	Discretamente aggressivo	1.4301 (AISI 304L) 1.4436 (AISI 316L)	1.4436 (AISI 316L)
3	<ul style="list-style-type: none"> Calcestruzzo carbonatato con $Cl^- > 1\%$ Calcestruzzo leggermente carbonatato in presenza di cloruri 	Molto aggressivo	1.4436 (AISI 316L)	1.4462 (AISI 329)
4	<ul style="list-style-type: none"> Calcestruzzo carbonatato in ambiente ad alta concentrazione di cloruri Strutture in c.a. senza possibilità di accesso per controlli Cerniere tra parti in c.a. esposte ad elevati Cl^- o ad ambienti molto aggressivi 	Estremamente aggressivo	1.4462 (AISI 329) 1.4529 (354/1)	1.4529 (354/1)

Tab.3 Indicazioni di impiego dell'acciaio inossidabile in relazione alle diverse condizioni ambientali (Euroinox)

LA DUTTILITA'

Data la loro natura duttile, gli acciai inossidabili austenitici ed austeno-ferritici presentano allungamenti percentuali a rottura, nonché rapporti f_t/f_y piuttosto elevati, sia allo stato ricotto che incrudito. La curva sforzi deformazioni è piuttosto differente da quella dell'acciaio al carbonio come rappresentato schematicamente in Fig. 5

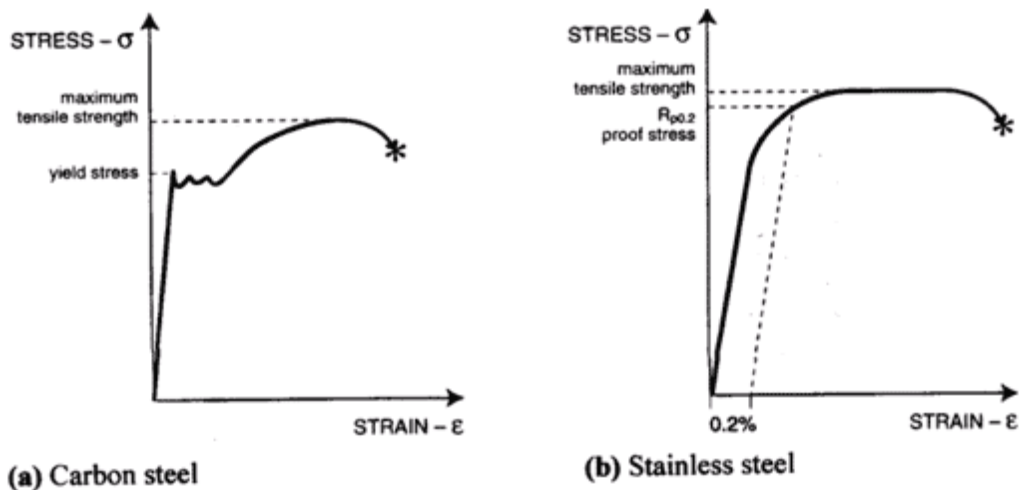


Fig. 5 - Confronto tra acciaio al carbonio e acciaio inossidabile nella curva sforzi-deformazioni

Ricordando che l'area sottesa dalle due curve è proporzionale all'energia meccanica assorbita nella prova di trazione, si capisce immediatamente la sostanziale differenza nella capacità di dissipare l'energia associata ad eventi che comportano deformazioni importanti.

Relativamente al tondino per cemento armato, è da sottolineare la notevole differenza dei due materiali in termini di allungamento percentuale a rottura (circa il 12% per l'acciaio al carbonio, circa il 20% per l'inossidabile) come evidenziato nella tabella

	Acciaio al carbonio	1.4301	1.4436	DM. 9.1.96
Struttura		Austenitica	Austenitica	FeB44k
$R_{p0,2}$ [N/mm²] (tensione caratteristica di snervamento f_{yk})	≥ 430	670 $\varnothing \leq 6 +12$ mm 540 $\varnothing > 12$ mm		≥ 430
R_m [N/mm²] (tensione caratteristica di rottura f_{tk})	≥ 540	810 $\varnothing \leq 6 +12$ mm 780 $\varnothing > 12$ mm		≥ 540
Allungamento $A_5\%$	≥ 12	20 $\varnothing \leq 6 +12$ mm 35 $\varnothing > 12$ mm		≥ 12
Rapporto $(f_t/f_y)_k$	≥ 1.13	1.20 $\varnothing \leq 6 +12$ mm 1.40 $\varnothing > 12$ mm		V. Tab 5a e 5b
Modulo elastico [kN/mm²]	190	200		

Tab. 4 - Caratteristiche meccaniche degli acciai impiegati per barre di rinforzo nel calcestruzzo armato.

Considerando l'acciaio inossidabile sotto l'aspetto della duttilità, intesa come capacità del materiale a subire elevate deformazioni con ridotte perdite di resistenza sia sotto l'azione di carichi monotonici che ciclici, risulta interessante la classificazione con riferimento alla deformazione ultima (in Fig. 5 indicata come "maximum tensile strength") ϵ_u ed al rapporto f_t/f_y . Il Model Code 90 definisce le tre classi B, A, S dotate di duttilità crescente e consiglia l'uso di acciaio tipo S in zona sismica con la limitazione che il rapporto tra la tensione a rottura e quella di snervamento non superi il valore di 1,3 (Tab. 5a)

L'Eurocodice 2 prevede, invece, due diverse categorie di acciaio da cemento armato denominate rispettivamente ad alta duttilità (HD) ed a normale duttilità (ND) (Tab. 5b).

Restrizioni maggiori sono invece previste dall'Eurocodice 8 per costruzioni in cemento armato in zona sismica (sempre in Tab. 5b).

CEB Model Code 90			
	Classe B	Classe A	Classe S
ϵ_u	$\geq 2.5\%$	$\geq 5\%$	$\geq 6\%$
f_t/f_y	≥ 1.05	≥ 1.08	≥ 1.15

Tab. 5a - Valori minimi di rapporti di resistenza e di deformazione ultima secondo Model Code 90

	Eurocodice 2		Eurocodice 8	
	ND	HD	DC-M	DC-H
ϵ_u	$\geq 2.5\%$	$\geq 5\%$	$\geq 6\%$	$\geq 9\%$
f_t/f_y	≥ 1.05	≥ 1.08	≥ 1.15	≥ 1.20

Tab. 5b - Valori minimi di rapporti di resistenza e di deformazione ultima secondo EC2 e EC8

Occorre tuttavia sottolineare che un'elevata duttilità del materiale non corrisponde sicuramente ad un'elevata duttilità della struttura, in quanto nel cemento armato intervengono altri fenomeni legati al comportamento della sezione o dall'elemento strutturale ed altri problemi specifici in grado di penalizzare la duttilità stessa. Su questo punto sono in corso studi atti a migliorare la qualità del calcestruzzo.

LA TENACITA'

E' la resistenza di un materiale alla frattura fragile: si determina con la prova di Charpy che misura l'energia richiesta per rompere ad urto un determinato campione

Gli acciai inossidabili austenitici (con una tipica struttura cubica a facce centrate, stabile a tutte le temperature) si distinguono dagli acciai al carbonio per il loro elevato livello di tenacità (in taluni casi si arriva a superare un livello doppio); gli acciai inossidabili austeno-ferritici, con una struttura mista di grani omogenei di austenite e di ferrite e con un rapporto tra le due strutture prossimo a 1, presentano valori di tenacità intermedi tra quelli degli acciai completamente austenitici e gli acciai comuni al C.

Vale la pena sottolineare due fattori interessanti:

la tenacità degli acciai inossidabili non varia sensibilmente al variare del livello di incrudimento; ciò è tanto più interessante in quanto le possibili diverse tecnologie di produzione (trafila a freddo o laminazione a caldo) non creano grandi differenze di resistenza a cicli di fatica, in grado di generare effetti di intaglio alle base delle nervature (qualora il raggio di raccordo sia minimo) (Vedi Resistenza a fatica);

la tenacità degli acciai inossidabili non è particolarmente influenzata dalla temperatura, ovvero non presenta un regime transitorio duttile-fragile intorno a 0-20°C così come avviene negli acciai al carbonio. Ciò significa che il comportamento meccanico di un acciaio inossidabile (in particolar modo a struttura austenitica) non cambia anche per temperature notevolmente basse (in genere fino a -196°C) (Vedi Resistenza alle alte e alle basse temperature).

IL COMPORTAMENTO ALLE ALTE E ALLE BASSE TEMPERATURE

L'acciaio inossidabile austenitico mantiene un'elevata resistenza alle alte temperature; oltre a 500°C la diminuzione del carico di snervamento è ancora trascurabile. Ciò è meno vero per gli acciai austeno-ferritici che oltre a 300°C riducono sensibilmente la propria tenacità.

Alcune prove condotte negli ultimi anni in ambito di programmi di ricerca europei, danno risultati assai interessanti, sintetizzati nelle Fig. 6.

Da un confronto tra i coefficienti di espansione termica riportata in Tab. 6 si evince come gli acciai inossidabili hanno valori debolmente superiori rispetto all'acciaio al carbonio mentre presentano una conducibilità termica di meno della metà.

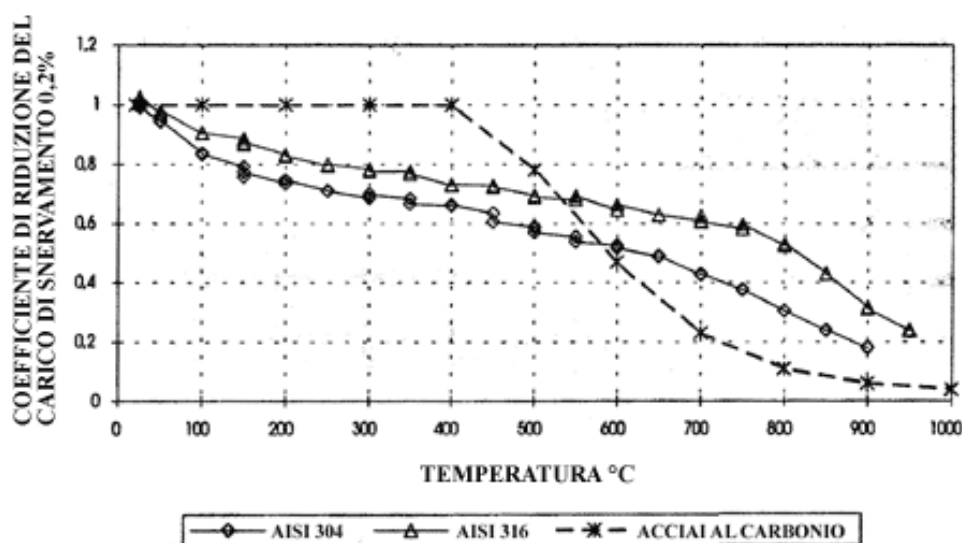


Fig. 6 - Riduzione del carico di snervamento per acciai inossidabili austenitici (304-316) confrontati con l'acciaio al carbonio secondo l'eurocodice 3 parte 1.2 (Fonte: VTT)

		1.4301 1.4401	1.4462
Struttura	Acciaio al carbonio	Acciai austenitici	Austeno-Ferritico
Coefficiente di espansione termica lineare tra 20 e 100 °C	10-12	16	13
Conducibilità termica a 20°C [W/m x°K]	40-50	15	18

Tab. 6 - Valori caratteristici di conducibilità ed espansione termica lineare per vari tipi di acciaio impiegati nelle barre per rinforzo del calcestruzzo armato.

Complessivamente il comportamento degli acciai inossidabili è migliorativo rispetto agli acciai al carbonio perchè collassa a temperature più elevate.

Il maggior coefficiente di espansione termica che gli acciai inossidabili presentano rispetto agli acciai al carbonio non dà effetto negativo sull'armatura in quanto tale effetto è compensato dalla minor conducibilità termica dell'acciaio inossidabile.

Non va dimenticato inoltre che anche alle alte temperature non si ha la formazione di ossidi sulla superficie dell'acciaio con conseguente distacco all'interfaccia con il calcestruzzo (spalling).

Altrettanto interessante è il comportamento dell'acciaio inossidabile alle basse temperature ove emerge una miglior tenacità dell'acciaio senza effetti di transizione duttile-fragile così come avviene per gli acciai al carbonio intorno ai 0°C (Vedi figura 7).

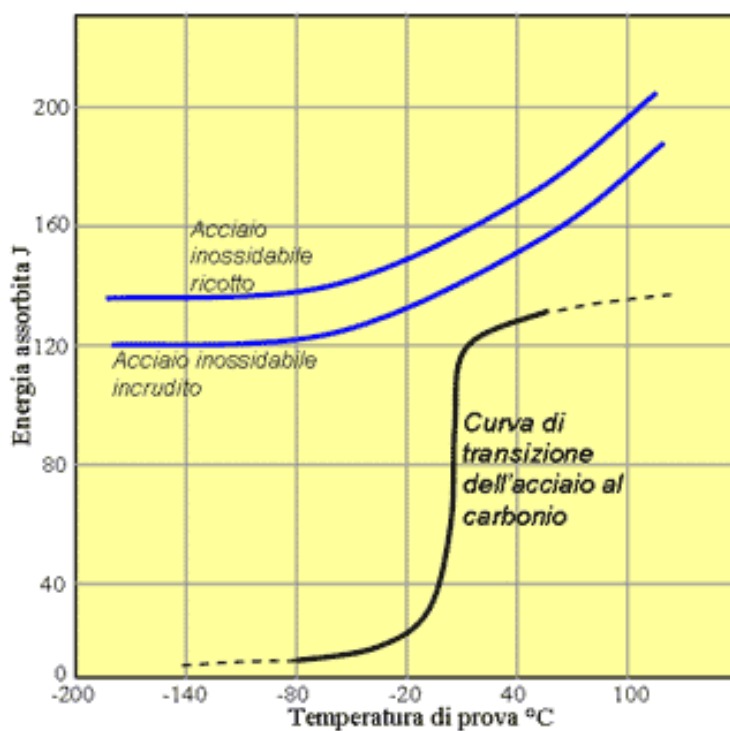


Fig. 7 - Confronto di resilienza alle varie temperature tra acciai inossidabili e acciai al carbonio

Gli acciai duplex (austeno-ferritici), a causa della presenza di fasi ferritiche, mostrano un collasso di caratteristiche intorno a -50°C.