

Ambiti di competenza GRAVIS

Prove di fatica sull' acciaio d'armatura duplex (1.4062)

Ines Dällenbach
(Università di Lucerna)

L'acciaio d'armatura inossidabile è generalmente composto da oltre il 10,5% di cromo e spesso anche da nichel, molibdeno e azoto. Contengono inoltre basse concentrazioni di elementi leganti secondari quali carbonio, zolfo e fosforo. Lo scopo principale dell'acciaio d'armatura inossidabile è quello di ritardare l'insorgere della corrosione. Mentre l'acciaio d'armatura tradizionale è protetto da uno strato di ossido di ferro (passivazione) in un ambiente fortemente alcalino, gli acciai inossidabili formano uno

strato di ossido di cromo stabile che rimane efficace anche in caso di alcalinità ridotta ($\text{pH} < 10,5$) e tenori di cloruro più elevati.

Grazie alla sua elevata resistenza alla corrosione, viene sempre più utilizzato nelle nuove costruzioni e nei progetti di ristrutturazione. La scheda tecnica SIA 2029:2012 [1] raccomanda l'uso di acciaio inossidabile per l'acciaio d'armatura al fine di migliorare la durabilità o ridurre il copriferro dell'armatura in conformità con la norma SIA 262:2025 [2].

Nonostante il suo costo più elevato, l'acciaio d'armatura inossidabile è perfettamente adatto per elementi edili esposti all'acqua clorurata, la cui durata operativa deve essere lunga o sarebbero costosi e complessi i costi di riparazione. Nella costruzione di ponti, viene sempre più utilizzato per elementi soggetti a fatica, come le solette a sbalzo. La figura 1 mostra un possibile concetto di riabilitazione schematica: l'esempio illustra il rinforzo di una trave di ponte con uno strato aggiuntivo di calcestruzzo e l'uso di acciaio d'armatura inossidabile con un copriferro ridotto.

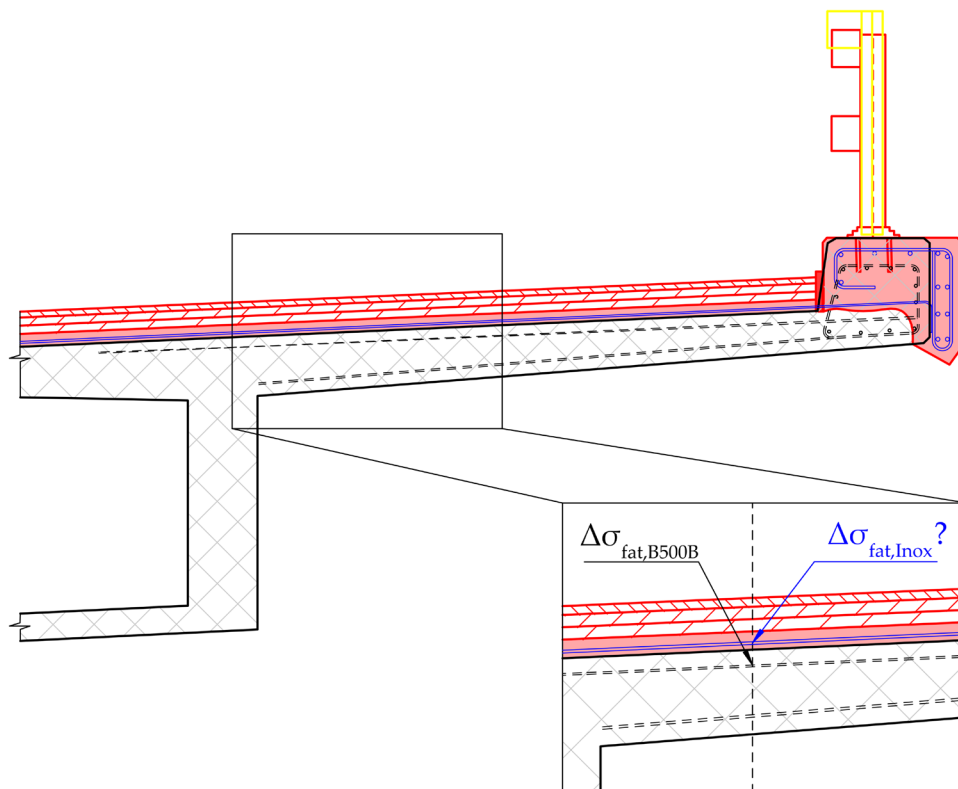


Figura 1: rappresentazione schematica di un possibile intervento di ripristino della soletta a sbalzo di un ponte autostradale esistente utilizzando l'acciaio d'armatura inossidabile.

La tabella 13 della norma SIA 262:2025 [2] indica le resistenze alla fatica dell'acciaio d'armatura «convenzionale»¹⁾ per diversi diametri e forme di flessione. Questi valori si basano sulla curva di Wöhler (figura 6 della norma SIA 262:2025 [2]), che si basa sulle prove di fatica effettuate da Tilly e al. (1982) [3] e Canteli et al. (1984) [4] e sono riportati nella documentazione SIA D0133:1997 [5]. Ad oggi non esiste una tabella esaustiva contenente dati aggiornati relativi alle proprietà di fatica delle barre di armatura comunemente utilizzate in Svizzera.

Né la norma SIA 262:2025 [2] né il capitolato tecnico SIA 209:2012 [1] forniscono valori specifici relativi alla resistenza alla fatica per il dimensionamento dell'acciaio d'armatura inossidabile. Nella pratica si utilizzano quindi gli stessi valori caratteristici di fatica previsti per l'acciaio d'armatura. Poiché attualmente non esistono praticamente prove di classificazione regolari con dell'acciaio inossidabile per cemento armato – né da parte dei produttori, né nella letteratura specializzata – non è possibile determinare se la resistenza alla fatica corrisponda effettivamente ai valori normativi. Nell'ambito di un progetto condotto durante i suoi studi di master alla HSLU, l'autrice ha effettuato prove di fatica su dell'acciaio d'armatura inossidabile in collaborazione con l'Empa (Laboratorio Federale di prova dei materiali e di ricerca).

L'obiettivo del progetto era lo studio sperimentale, la documentazione e la valutazione del comportamento alla fatica dell'acciaio duplex di tipo 1.4062. Una componente essenziale è la messa a disposizione dei dati di prova validi che possano servire da base per ulteriori studi scientifici.

Le prove sono state eseguite in conformità alla norma SN EN ISO 15630-1:2019 [6] presso l'Empa di Dübendorf. Sono stati effettuati nel campo della resistenza limitata sotto forma di prove di carico in un'unica fase, durante le quali l'ampiezza della sollecitazione ($\Delta\sigma$) è stata mantenuta costante e il numero di cicli fino alla rottura N_B è stato determinato in funzione di $\Delta\sigma$. Per ogni ampiezza di sollecitazione studiata sono state testate almeno cinque barre di acciaio per cemento armato dello stesso diametro. Al termine delle prove sono state documentate le superfici e gli aspetti di rottura.

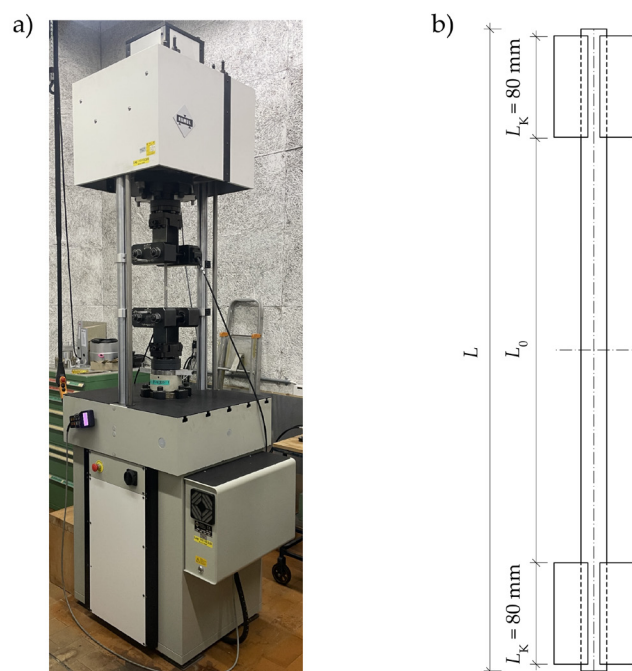


Figura 2: a) impianto di prova «RUMUL Testronic 8601 150 kN» e b) schema dell'impianto di prova, dove L rappresenta la lunghezza di prova, L_0 la lunghezza libera e L_k la lunghezza delle pinze.

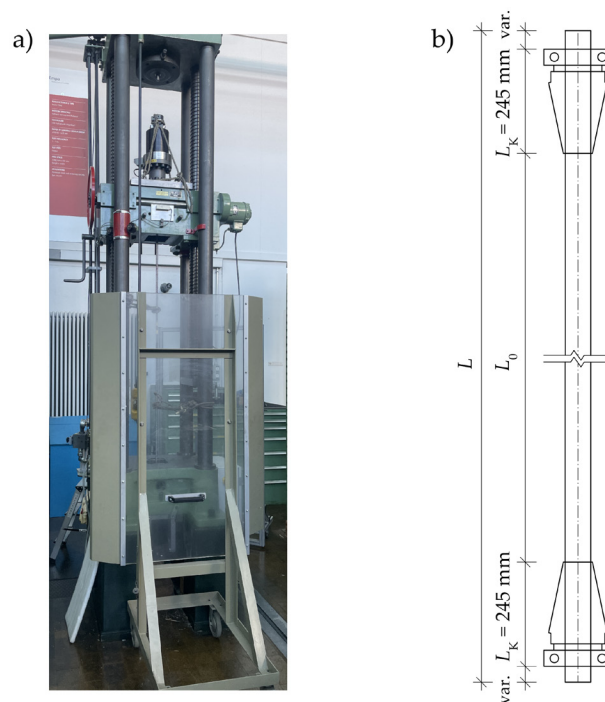


Figura 3: a) impianto di prova a fatica idraulica «Amsler P960 300 kN» e b) schema del dispositivo di prova, dove L rappresenta la lunghezza di prova, L_0 la lunghezza libera e L_k la lunghezza delle pinze.

¹⁾ In questo articolo, il termine "acciaio d'armatura" è utilizzato per indicare l'acciaio d'armatura "convenzionale" comunemente utilizzato nella pratica (come il B500B).

Per caratterizzare il comportamento alla fatica, sono state esaminate due diverse lunghezze di prova:

- dei campioni della lunghezza pari a 400 mm sono stati testati su una macchina di prova ad alta frequenza da 150 kN a 78 Hz; in totale, lo studio ha riguardato 82 campioni, di cui 42 provenienti da bobine ($\varnothing$ 14 mm) e 40 provenienti da barra ($\varnothing$ 16 mm) (vedi figura 2)
- sono state effettuate prove su campioni di 3000 mm di lunghezza su una macchina di prova a fatica idraulica da 300 kN a 7 Hz; in totale sono state testate 30 barre, di cui 15 provenienti da bobine ($\varnothing$ 14 mm) e 15 provenienti da barre ($\varnothing$ 16 mm) (vedi figura 3)

Inoltre, sono stati utilizzati i dati disponibili provenienti da prove di classificazione regolari in un'unica fase sull'acciaio d'armatura, al fine di poter confrontare e classificare i risultati delle nostre prove con quelli dell'acciaio d'armatura inossidabile. Sono stati presi in considerazione i risultati delle prove di classificazione regolari effettuate all'aria aperta, ovvero su campioni non cementati. I dati utilizzati provengono da Canteli e al. (1984) [4] e dalle prove effettuate da Fehlmann (2012) [7]. Le informazioni dettagliate relative alle barre di acciaio d'armatura utilizzate in questi studi non sono trattate in questa sede, ma sono disponibili nelle fonti originali corrispondenti.

Le figure 4 e 5 mostrano le viste e le superfici di rottura dei provini corti ($L = 400$ mm) e lunghi ($L = 3000$ mm) con diametri di 14 mm e 16 mm. I risultati mostrano l'ampiezza massima della sollecitazione studiata ($\Delta\sigma$).

La formazione di fessure nel materiale in bobina si è verificata principalmente nella zona della nervatura longitudinale, mentre quella nel materiale in barra alla

base delle nervature. I segni di laminazione non hanno dimostrato un'influenza significativa sulla formazione di fessure. Con l'aumento dell'ampiezza di sollecitazione, si sono formate superfici di rottura nettamente più pronunciate; in particolare nei provini lunghi del materiale in barra sono apparse strutture grossolane e distrutte, senza la forma a conchiglia caratteristica delle superfici di rottura per fatica. Inoltre, con l'aumento dell'ampiezza della sollecitazione, è apparso un numero maggiore di fessure nella barra rimanente..

Le immagini della rottura e la presenza di fessure differiscono dalle osservazioni note sull'acciaio d'armatura. Le cause di questi risultati potrebbero risiedere nella composizione dell'acciaio d'armatura duplex e nella specificità di queste leghe. Mentre l'acciaio d'armatura è composto esclusivamente da ferrite, l'acciaio d'armatura inossidabile duplex è composto da ferrite e austenite e contiene anche altri elementi di lega. Questa struttura bifasica e la diversa composizione chimica potrebbero influenzare la distribuzione locale delle sollecitazioni e il comportamento alla fessurazione, il che potrebbe fornire una possibile spiegazione per i diversi tipi di rottura.

I dati di Canteli e al. (1984) [4] e Fehlmann (2012) [7] sull'acciaio d'armatura sono confrontati con i risultati delle prove effettuate su barre di acciaio inossidabile con una lunghezza del campione di $L = 400$ mm. Per poter esprimere un giudizio sulla resistenza nominale alla fatica, è stata determinata una linea mediana (quantile 50%) nel diagramma di Wöhler (doppio logaritmico) mediante un'analisi di regressione. La pendenza della linea di regressione è stata fissata a $m = 4$, come specificato nella norma SIA 262:2025 [2] per l'acciaio d'armatura. La resistenza nominale alla fatica è stata determinata di conseguenza per $N = 2 \cdot 10^6$ cicli di carico.

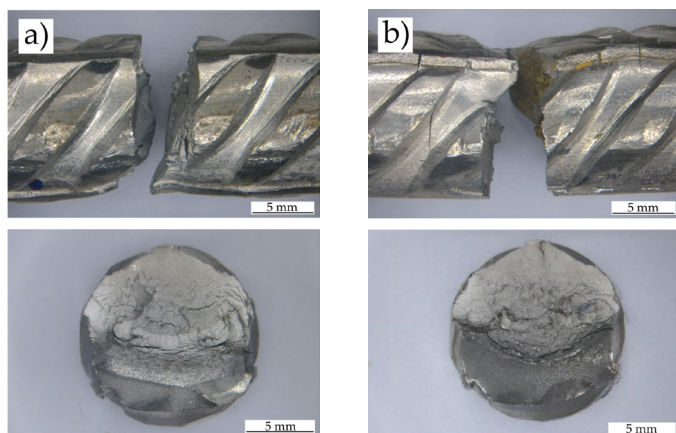


Figura 4: $\varnothing$ 14 mm, vista e superficie di rottura (a) $L = 400$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa e (b) $L = 3000$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa

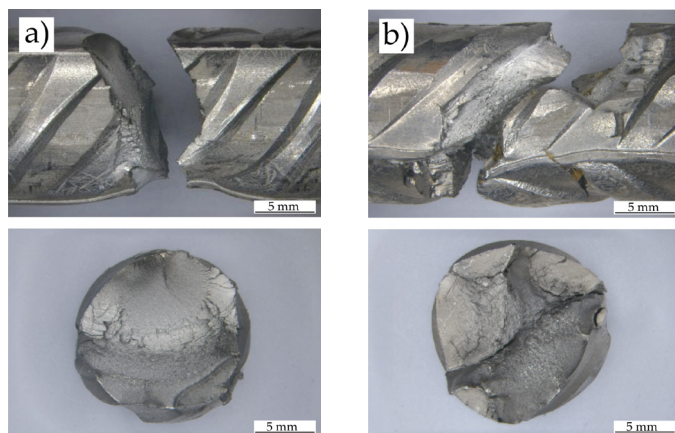


Figura 5: $\varnothing$ 16 mm, vista e superficie di rottura (a) $L = 400$ mm; $\Delta\sigma = 375$ MPa e (b) $L = 3000$ mm; $\Delta\sigma = 413$ MPa

La tabella 1 riporta le resistenze nominali medie alla fatica dell'acciaio per cemento armato convenzionale e inossidabile, mentre la figura 6 mostra tutti i punti di misurazione dei due gruppi e le relative curve mediane. La curva normalizzata SIA 262:2025 [2] rappresentata

nel grafico è puramente indicativa, non ha alcun valore statistico e non consente un confronto diretto con le curve mediane.

Tabella 1: resistenze nominali medie alla fatica dell'acciaio d'armatura (dati di Canteli e al. [4], Fehlmann [7]) e dell'acciaio d'armatura inossidabile duplex

	Acciaio d'armatura	Acciaio d'armatura duplex 1.4062 ¹⁾
$\sigma_{fat,nom} \pm s \{n\}$ ²⁾	207 ± 32 {116}	183 ± 15 {76}

¹⁾ Dati relativi alle barre di rinforzo duplex con lunghezza di prova (L=400 mm), Ø 14/16
²⁾ Resistenza nominale media alla fatica ± deviazione standard media [MPa] {numero di valori sperimentali}

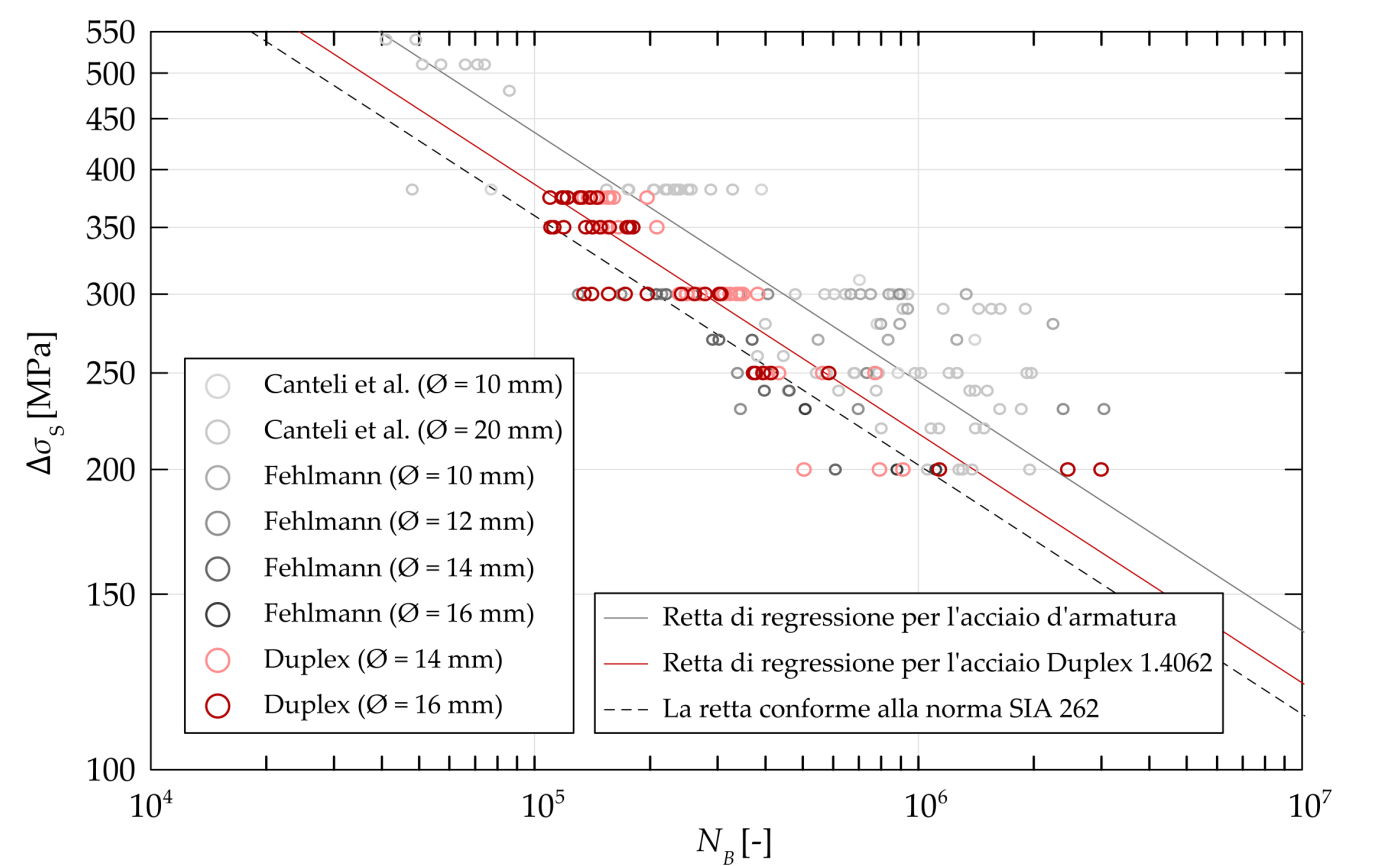


Figura 6: punti di misurazione e linea mediana nel diagramma di Wöhler per l'acciaio d'armatura (Canteli e al. [4], Fehlmann [7]) e l'acciaio d'armatura duplex.

Il grafico mostra che i valori misurati per l'acciaio inossidabile tendono a situarsi nella parte inferiore dell'intervallo dei valori dell'acciaio d'armatura. La resistenza media alla fatica dell'acciaio d'armatura duplex 1.4062 indicata nella tabella 1 è inferiore a quella dell'acciaio d'armatura, che presenta tuttavia una dispersione dei risultati nettamente maggiore. Tenuto conto dell'ampio intervallo di confidenza dell'acciaio per cemento armato, non è possibile effettuare una verifica di uno svantaggio statisticamente significativo in termini di resistenza inferiore dell'acciaio per cemento armato duplex rispetto all'acciaio per cemento armato tradizionale.

Considerando la dispersione, le resistenze alla fatica dell'acciaio d'armatura duplex studiato sono paragonabili a quelle dell'acciaio d'armatura. Sebbene non sia possibile evidenziare alcun svantaggio significativo in termini di resistenza alla fatica rispetto all'acciaio d'armatura "convenzionale", emergono differenze nei profili di rottura e nella comparsa di fessure. Per una valutazione più generale, sarebbe quindi opportuno condurre ricerche più approfondite sull'acciaio inossidabile, ad esempio tenendo conto dei diversi tipi di acciaio e dei diversi diametri.

Letteratura

[1] Società Svizzera degli Ingegneri e degli Architetti (SIA), «Quaderno tecnico 2029 - Acciaio d'armatura inossidabile», SIA, Zurigo, 2012.

[2] Società Svizzera degli Ingegneri e degli Architetti (SIA), «Norma SIA 262 - Costruzioni in calcestruzzo», Zurigo, 2025.

[3] G.P.Tilly und D.S.Moss, „Long Endurance Fatigue of Steel Reinforcement,“ IABSE Reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte 37, pp. 229-238, 1982.

[4] A.F. Canteli, V. Esslinger, B. Thürlimann, „Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen,“ Bericht 8002, Zürich, pp. 1-87, 1984.

[5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „Dokumentation D0133: Betonbau – Ermüdung von Betonbauten,“ SIA, Zürich, 1997.

[6] Associazione svizzera di normalizzazione (SNV), «Acciaio per calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso - Metodi di prova - Parte 1: Barre, rotoli e fili per calcestruzzo armato», EN ISO 15630-1:2019, 2019.

[7] P. Fehlmann, «Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken», Zurich, 2012



GRAVIS AG
Birchstrasse 17, 3186 Düdingen



+41 26 492 30 10



info@gravis.ch



www.gravis.ch

