

GRAVIS Domaine de connaissances

Essais de fatigue sur l'acier d'armature duplex (1.4062)

Ines Dällenbach
(Haute école de Lucerne)

Les aciers d'armature inoxydables se composent généralement de plus de 10,5 % de chrome et souvent également de nickel, de molybdène et d'azote. Ils contiennent également de faibles concentrations d'éléments d'alliage secondaires tels que le carbone, le soufre et le phosphore. L'objectif principal des aciers d'armature inoxydables est de prolonger le délai d'apparition de la corrosion. Alors que les aciers d'armature traditionnels sont protégés par une couche d'oxyde de fer (passivation) dans un milieu fortement alcalin, les aciers inoxydables forment une couche

d'oxyde de chrome stable qui reste efficace même en cas d'alcalinité réduite ($\text{pH} < 10,5$) et de teneurs en chlorure plus élevées.

Grâce à sa résistance à la corrosion élevée, il est de plus en plus utilisé dans les nouvelles constructions et les projets de rénovation. La fiche technique SIA 2029:2012 [1] recommande l'utilisation d'acier d'armature inoxydable afin d'améliorer la durabilité ou de réduire l'enrobage de l'armature conformément à la norme SIA 262:2025 [2].

Malgré son coût plus élevé, l'acier d'armature inoxydable est parfaitement adapté aux éléments de construction exposés à l'eau chlorée, dont la durée de vie doit être longue ou la réparation serait coûteuse et complexe. Pour la construction de ponts, il est de plus en plus utilisé pour des éléments soumis à la fatigue, tels que les dalles en porte-à-faux. La figure 1 montre un concept de réfection schématisé possible : l'exemple illustre le renforcement d'une poutre de pont par une couche supplémentaire de béton et l'utilisation d'acier d'armature inoxydable avec un enrobage réduit.

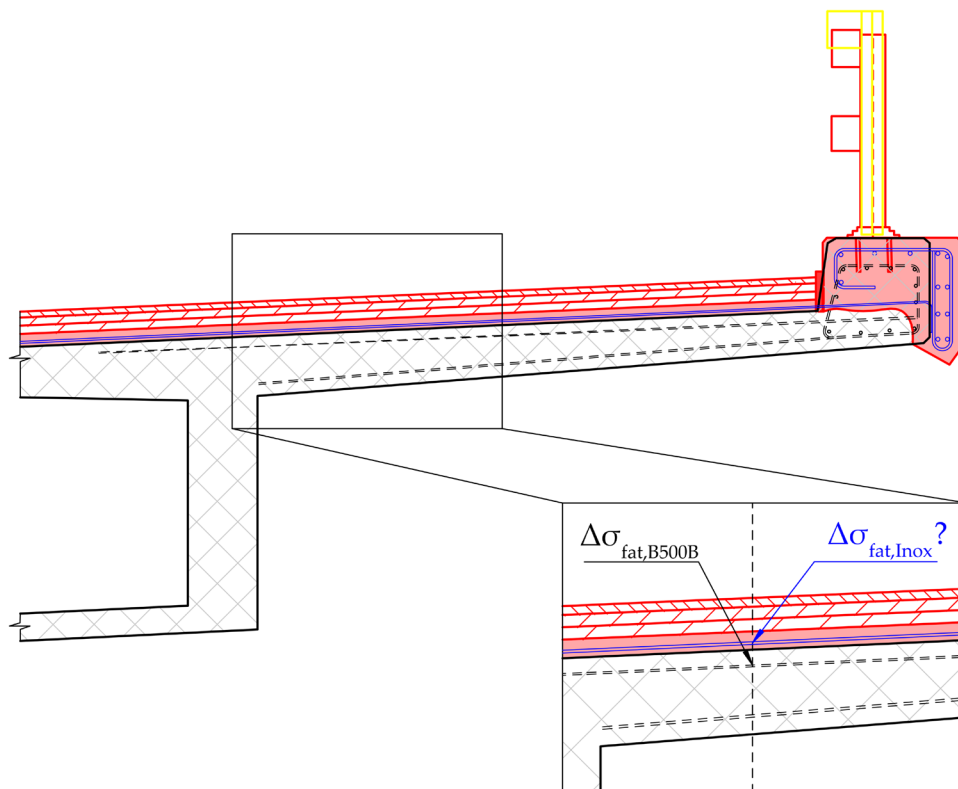


Figure 1 : Représentation schématisée d'une réfection possible de la dalle en porte-à-faux d'un pont autoroutier existant en utilisant de l'acier d'armature inoxydable.

Le tableau 13 de la norme SIA 262:2025 [2] indique les résistances à la fatigue de l'acier d'armature «conventionnel»¹⁾ pour différents diamètres et formes de flexion. Ces valeurs sont basées sur la courbe de Wöhler (figure 6 de la norme SIA 262:2025 [2]), qui repose sur des essais de fatigue réalisés par Tilly et al. (1982) [3] et Canteli et al. (1984) [4] et figurent dans la documentation SIA D0133:1997 [5]. À ce jour, il n'existe pas de tableau exhaustif contenant des données actualisées relatives aux propriétés de fatigue des barres d'armature couramment utilisées en Suisse.

Ni la norme SIA 262:2025 [2] ni le cahier technique SIA 209:2012 [1] ne fournissent pas de valeurs spécifiques concernant la résistance à la fatigue pour le dimensionnement de l'acier d'armature inoxydable. Dans la pratique, on utilise donc les mêmes valeurs caractéristiques de fatigue que pour l'acier d'armature. Comme il n'existe actuellement pratiquement aucun essai de classification régulier avec de l'acier inoxydable pour béton armé – ni de la part des fabricants, ni dans la littérature spécialisée – cela ne permet pas de déterminer si la résistance à la fatigue correspond effectivement aux valeurs normatives. Dans le cadre d'un projet mené pendant ses études de master à la HSLU, l'auteure a réalisé des essais de fatigue sur de l'acier d'armature inoxydable en collaboration avec l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche).

L'objectif du projet était l'étude expérimentale, la documentation et l'évaluation du comportement à la fatigue de l'acier duplex de type 1.4062. Une composante essentielle est la mise à disposition de données d'essai valides pouvant servir de base à d'autres études scientifiques.

Les essais ont été réalisés conformément à la norme SN EN ISO 15630-1:2019 [6] à l'Empa de Dübendorf. Ils ont été effectués dans le domaine d'endurance limitée sous forme d'essais de charge en une seule étape, au cours desquels l'amplitude de contrainte ($\Delta\sigma$) a été maintenue constante et le nombre de cycles jusqu'à la rupture N_B a été déterminé en fonction de $\Delta\sigma$. Pour chaque amplitude de contrainte étudiée, au moins cinq barres d'acier à béton de même diamètre ont été testées. À l'issue des essais, les surfaces et les aspects de rupture ont été documentés.

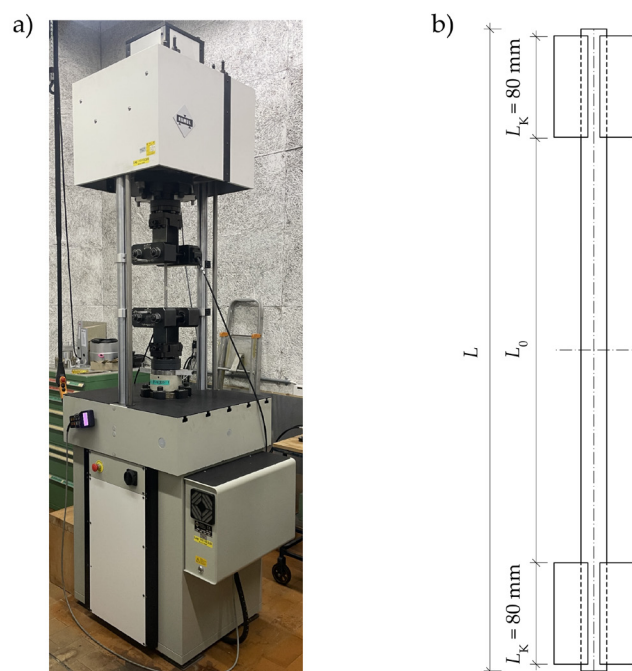


Figure 2 : a) Machine d'essai « RUMUL Testronic 8601 150 kN » et b) schéma de l'installation d'essai, où L représente la longueur d'essai, L_0 la longueur libre et L_k la longueur des pinces.

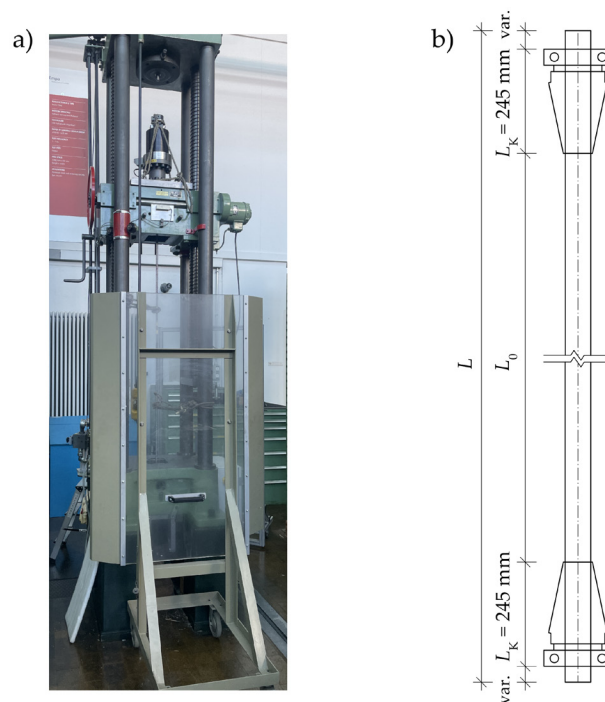


Figure 3 : a) Machine d'essai de fatigue hydraulique « Amsler P960 300 kN » et b) schéma du dispositif d'essai, où L représente la longueur d'essai, L_0 la longueur libre et L_k la longueur des pinces.

¹⁾ Dans cet article, le terme « acier d'armature » est utilisé pour désigner l'acier d'armature « conventionnel » couramment utilisé dans la pratique (tel que le B500B).

Pour caractériser le comportement à la fatigue, deux longueurs d'essai différentes ont été examinées :

- des échantillons d'une longueur de 400 mm ont été testés sur une machine d'essai à haute fréquence de 150 kN à 78 Hz ; au total, l'étude a porté sur 82 échantillons, dont 42 provenant de bobines (Ø 14 mm) et 40 provenant de barres (Ø 16 mm) (Voir figure 2)
- des essais sur des échantillons de 3000 mm de long ont été réalisés sur une machine d'essai de fatigue hydraulique de 300 kN à 7 Hz ; au total, 30 barres ont été testées, dont 15 provenant de bobines (Ø 14 mm) et 15 provenant de barres (Ø 16 mm) (Voir figure 3)

En outre, les données disponibles issues d'essais de classification réguliers en une seule étape sur l'acier d'armature ont été utilisées afin de pouvoir comparer et classer les résultats de nos propres essais avec ceux de l'acier d'armature inoxydable. Il a été tenu compte des résultats d'essais de classification réguliers réalisés à l'air libre, c'est-à-dire sur des échantillons non bétonnés. Les données utilisées proviennent de Canteli et al. (1984) [4] ainsi que des essais réalisés par Fehlmann (2012) [7]. Les informations détaillées relatives aux barres d'acier d'armature utilisées dans ces études ne sont pas abordées ici ; elles peuvent être consultées dans les sources originales correspondantes.

Les figures 4 et 5 illustrent les vues et les surfaces de rupture des éprouvettes courtes ($L = 400$ mm) et longues ($L = 3000$ mm) de diamètres 14 mm et 16 mm. Les résultats montrent l'amplitude de contrainte maximale étudiée ($\Delta\sigma$).

La formation de fissures du matériau en bobine s'est principalement produite dans la zone de la nervure longitudinale, tandis que celle du matériau en barres

est apparue à la base des nervures. Les marques de laminage n'ont pas démontré d'influence notable sur la formation de fissures. Avec l'augmentation de l'amplitude de contrainte, des surfaces de rupture nettement plus prononcées se sont formées ; en particulier dans les éprouvettes longues du matériau en barres, des structures grossières et détruites sont apparues, sans la forme en coquille caractéristique des surfaces de rupture par fatigue. De plus, avec l'augmentation de l'amplitude de contrainte, un nombre plus élevé de fissures est apparu dans la barre restante.

Les images de rupture et la présence de fissures diffèrent des observations connues sur l'acier d'armature. Les causes de ces résultats pourraient résider dans la composition de l'acier d'armature duplex et la spécificité de ces alliages. Alors que l'acier d'armature est composé exclusivement de ferrite, l'acier d'armature inoxydable duplex est composé de ferrite et d'austénite et contient également d'autres éléments d'alliage. Cette structure biphasée ainsi que la composition chimique différente pourraient influencer les répartitions locales des contraintes et le comportement à la fissuration, ce qui pourrait fournir une explication possible aux différents types de rupture.

Les données de Canteli et al. (1984) [4] et Fehlmann (2012) [7] sur l'acier d'armature sont comparées aux résultats des essais réalisés sur des barres d'acier inoxydable d'une longueur d'échantillon de $L = 400$ mm. Afin de pouvoir se prononcer à propos de la résistance nominale à la fatigue, une ligne médiane (quantile 50 %) a été déterminée dans le diagramme de Wöhler (double logarithmique) à l'aide d'une analyse de régression. La pente de la ligne de régression a été fixée à $m = 4$, comme spécifié dans la norme SIA 262:2025 [2] pour l'acier d'armature. La résistance nominale à la fatigue a été déterminée en conséquence pour $N = 2 \cdot 10^6$ cycles de charge.

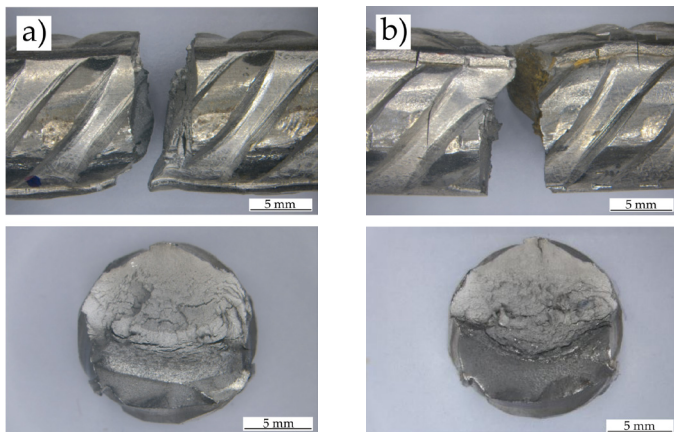


Figure 4 : Ø14 mm, Vue et surface de rupture (a) $L = 400$ mm ; $\Delta\sigma = 375$ MPa et (b) $L = 3000$ mm ; $\Delta\sigma = 375$ MPa

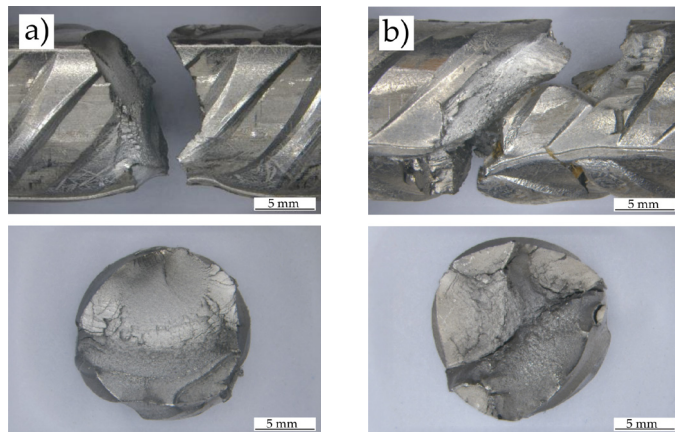


Figure 5 : Ø16 mm, Vue et surface de rupture (a) $L = 400$ mm ; $\Delta\sigma = 375$ MPa et (b) $L = 3000$ mm ; $\Delta\sigma = 413$ MPa

Le tableau 1 indique les résistances nominales moyennes à la fatigue de l'acier à béton conventionnel et inoxydable, tandis que la figure 6 montre tous les points de données des deux groupes ainsi que les courbes de moyenne correspondantes.

La courbe normalisée SIA 262:2025 [2] représentée dans le graphique est purement indicative, n'a aucune valeur statistique et ne permet pas de comparaison directe avec les courbes de moyenne.

Tableau 1 : Résistances nominales moyennes à la fatigue de l'acier d'armature (données de Canteli et al. [4], Fehlmann [7]) et de l'acier d'armature inoxydable duplex

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

¹⁾ Données relatives aux barres d'armature duplex d'une longueur d'essai de (L=400 mm), Ø 14/16
²⁾ Résistance nominale moyenne à la fatigue ± écart-type moyen [MPa] (nombre de valeurs expérimentales)

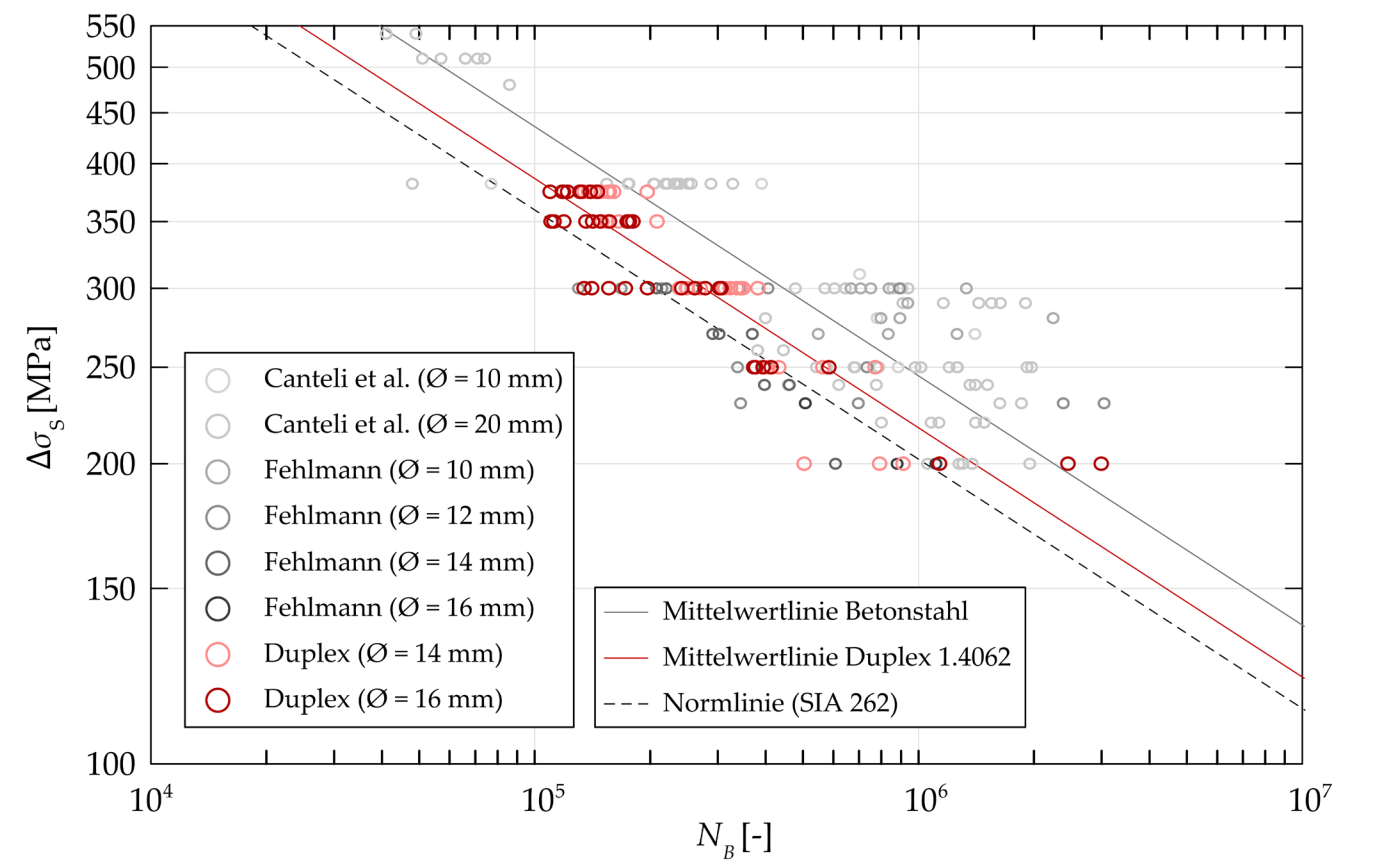


Figure 6 : Points de mesure et ligne médiane dans le diagramme de Wöhler pour l'acier d'armature (Canteli et al. [4], Fehlmann [7]) et l'acier d'armature duplex

Le graphique montre que les valeurs mesurées pour l'acier inoxydable ont tendance à se situer dans la partie inférieure de la fourchette des valeurs de l'acier d'armature. La résistance moyenne à la fatigue de l'acier d'armature duplex 1.4062 indiquée dans le tableau 1 est inférieure à celle de l'acier d'armature, qui présente toutefois une dispersion nettement plus importante des résultats. Compte tenu du large intervalle de confiance de l'acier à béton on ne peut procéder à la vérification d'un désavantage statistiquement significatif en termes de résistance inférieure de l'acier à béton duplex par rapport à l'acier à béton traditionnel.

En considérant la dispersion, les résistances à la fatigue de l'acier d'armature duplex étudié sont comparables à celles de l'acier d'armature. Même si aucun inconvénient significatif ne peut être mis en évidence en termes de résistance à la fatigue par rapport à l'acier d'armature « conventionnel », des différences apparaissent dans les profils de rupture et dans l'apparition de fissures. Pour une évaluation plus générale, il serait donc judicieux de mener des recherches plus approfondies sur l'acier inoxydable, par exemple en tenant compte de différents types d'acier et de différents diamètres.

Littérature

[1] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), « Cahier technique 2029 - acier d'armature inoxydable », SIA, Zurich, 2012.

[2] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), « Norme SIA 262 - Construction en béton », Zurich, 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] Association suisse de normalisation (SNV), « Aciers pour l'armature et la précontrainte du béton - Méthodes d'essai - Partie 1 : Barres, fils machine et fils pour béton armé », EN ISO 15630-1:2019, 2019.

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



GRAVIS AG
Birchstrasse 17, 3186 Düringen



+41 26 492 30 10



info@gravis.ch



www.gravis.ch

