Résistance à la fatigue des constructions rivetées

Autor(en): **Brühwiler, Eugen / Bez, Rolf / Hirt, Manfred A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **111 (1985)**

Heft 1-2

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75599

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Résistance à la fatigue des constructions rivetées

par Eugen Brühwiler, Rolf Bez et Manfred A. Hirt, EPF Lausanne

Le nombre d'ouvrages d'art qui atteignent la fin de leur période d'exploitation augmente chaque année. Pour pouvoir adopter une politique de maintenance cohérente, il est nécessaire d'avoir à disposition les éléments permettant d'évaluer leur durée de vie restante. Celle-ci dépend à la fois des sollicitations rencontrées et de la résistance à la fatigue de la construction. Cet article présente ce dernier aspect appliqué plus particulièrement aux constructions rivetées. Il donne un aperçu de résultats d'essais de fatigue effectués tant à l'étranger qu'à l'ICOM de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Ces résultats sont comparés aux différentes catégories de fatigue de la norme de construction métallique SIA 161.

Die Anzahl der Brücken, welche das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, nimmt jedes Jahr zu. Um die Häufigkeit der Kontrollen und den Unterhalt planen zu können, müssen Grundlagen zur Ermittlung der Restlebensdauer zur Verfügung stehen. Die Restlebensdauer wird aufgrund der wirklichen Beanspruchungen des Bauwerks und der Ermüdungsfestigkeit der Konstruktion ermittelt. Dieser Artikel gibt eine Übersicht der Resultate von Ermüdungsversuchen an genieteten Konstruktionen, welche sowohl im Ausland als auch am ICOM der ETH Lausanne durchgeführt wurden. Die Ergebnisse werden mit den Ermüdungskategorien der Stahlbaunorm SIA 161 verglichen.

1. Introduction

Il existe en Suisse un grand nombre de ponts métalliques construits à la fin du siècle dernier. La plupart de ces ouvrages ont été réalisés pour permettre le développement du réseau des chemins de fer. Les différents éléments de ces ponts ont été assemblés à l'aide de rivets qui étaient le seul moyen d'assemblage utilisé jusqu'à l'apparition des boulons ou de la soudure.

Depuis leur construction, ces ponts ont vu les charges de trafic augmenter de façon considérable. Leur système statique a parfois changé à cause de renforcements exécutés ultérieurement et des fissures de fatigue sont apparues dans quelques ouvrages. Pour ces raisons, il est devenu nécessaire de vérifier la sécurité de ces ouvrages et d'essayer de connaître leur *durée de vie restante*. Ceci se fait d'autant plus sentir que la plupart de ces ponts atteignent ou ont déjà dépassé leur période d'exploitation prévue. Il s'agit de savoir s'ils peuvent être maintenus en service, s'il faut les renforcer ou les remplacer et dans quel ordre de priorité.

L'évaluation de la durée de vie restante intéresse donc particulièrement les ingénieurs responsables de l'entretien des ponts. Elle leur permettrait d'adopter une *politique de maintenance cohérente*. C'est dans le but d'aider à résoudre ce problème de plus en plus actuel que des recherches sont en cours pour évaluer la durée de vie restante des ouvrages métalliques. Des approches probabilistes sont proposées [1][1] pour comparer les sollicitations à la résistance à la fatigue d'assemblages rivetés ; des recherches allant dans ce sens sont en cours à l'ICOM de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

L'objectif de cet article est de donner un aperçu de nos connaissances au niveau de la *résistance à la fatigue d'assemblages rivetés*. Après un historique des matériaux utilisés pour les constructions rivetées, nous allons présenter un résumé des résultats d'essais existants, avant de donner les résultats des essais de fatigue effectués dans nos laboratoires depuis sept ans, sur des éléments rivetés en vraie grandeur.

[1] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

2. Matériaux utilisés pour les constructions rivetées

Avant d'entreprendre, sur un ancien pont, des travaux de réparation ou de renforcement, il est important de bien connaître les propriétés du matériau constitutif de l'ouvrage. Le but de ce chapitre est de montrer l'évolution des matériaux ferreux utilisés pour les constructions rivetées.

Le premier pont construit en métal a été le pont de Coalbrookdale en Angleterre, en 1779 : il a été réalisé en *fonte* (en allemand : Gusseisen, en anglais : cast iron). Cependant, au cours du XIXe siècle, la fonte a été rapidement remplacée par le fer puddlé, qui présentait des caractéristiques en traction nettement plus élevées. De nos jours, il ne subsiste plus, en Suisse, d'ouvrage ayant été exécuté avec ce type de matériau.

Le *fer puddlé* (Schweisseisen, puddled or wrought iron) a été le matériau le plus utilisé entre 1870 et 1915. Il contient très peu de carbone et présente de nombreuses inclusions. Il a un grain grossier, ce qui représente un facteur de fragilité. Lors de son élaboration par forgeage et laminage, grains et inclusions sont écrasés et s'allongent, ce qui donne au fer puddlé une texture feuilletée, souvent avec peu de cohésion entre les feuillets (fig. 1). Ses fortes teneurs en impuretés, telles que le soufre et le phosphore, ont une influence défavorable sur la ductilité du fer puddlé, surtout perpendiculairement au sens de laminage. Tout ceci fait que les caractéristiques mécaniques de ce matériau, données dans le tableau 1, sont relativement hétérogènes.

Avec le développement de nouveaux procédés d'élaboration et d'affinage de l'acier (convertisseurs Bessemer et Thomas, fours Siemens-Martin), l'*acier doux ou fer fondu* (Flussstahl, mild steel) a graduellement remplacé le fer puddlé. Depuis le début de ce siècle et d'une manière générale entre 1915 et 1950, la plupart des constructions métalliques ont été réalisées en acier doux. Les caractéristiques mécaniques de l'acier doux

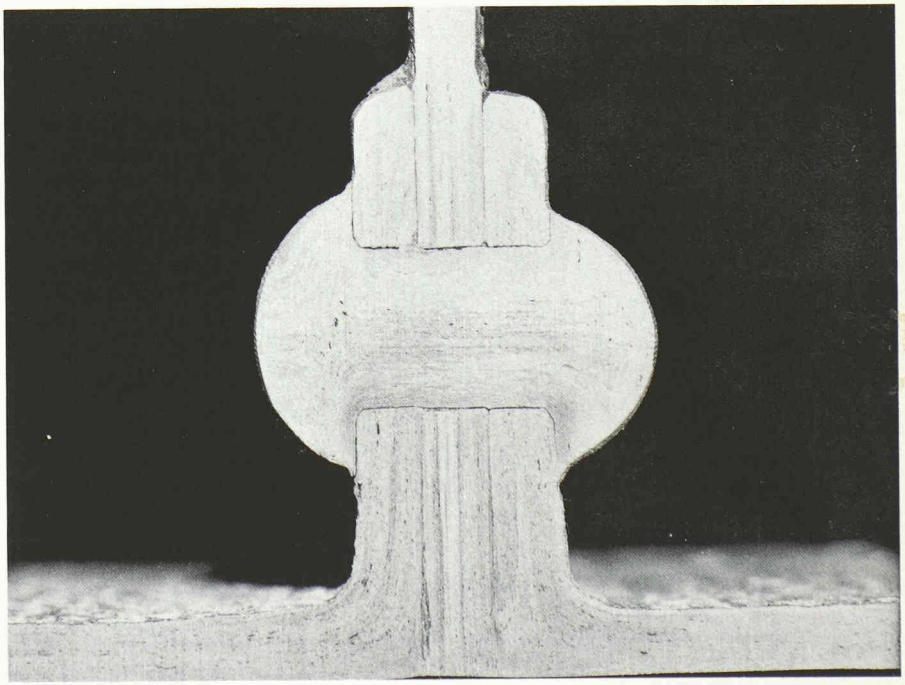

Fig. 1. — Macrographie d'un assemblage riveté (échelle 1:1) montrant la texture feuilletée et les inclusions du fer puddlé.

TABLEAU 1: *Caractéristiques mécaniques du fer puddlé (sens de laminage) et de l'acier doux.*

Caractéristiques mécaniques			Fer puddlé	Acier doux
Limite élastique	τ_f	[N/mm²]	200 ÷ 270	220 ÷ 250
Résistance à la traction	τ_u	[N/mm²]	320 ÷ 380	365 ÷ 410
Module d'élasticité	E	[N/mm²]	130000 ÷ 200000	210000
Allongement après rupture	λ_{10}	[%]	5 ÷ 15	30 ÷ 35

sont également reportées au tableau 1 [2], [4], [9].

Sur la base de ces considérations, on constate que pour déterminer la nature du matériau d'une construction rivetée, il est utile de prélever sur l'ouvrage des éprouvettes de traction, car ce sont surtout les valeurs des allongements qui permettent de distinguer le fer puddlé de l'acier doux. Une macrographie pourra aussi mettre en évidence la texture feuilletée du fer puddlé. Des analyses métallographiques et des essais de résilience ne peuvent cependant donner qu'une appréciation qualitative de la nature des matériaux à cause de leur hétérogénéité (fig. 1).

3. Aperçu des résultats existants

Avec l'utilisation des rivets dans les constructions métalliques, les tentatives de perfectionnement se sont essentiellement portées sur la méthode de mise en place des rivets. Peu d'attention a été portée au comportement à la fatigue des assemblages rivetés, car les contraintes admissibles très faibles limitaient automatiquement les sollicitations en service. Après quelques accidents, des essais de fatigue ont sérieusement été entrepris, il y a environ 50 ans. Depuis, un grand nombre de détails constructifs rivetés ont été étudiés dans de nombreux pays [3]. A partir de la fin des années septante, des assemblages rivetés prélevés dans des ouvrages existants ont été testés [4], [5], [6].

La figure 2, tirée de [3], présente un résumé des résultats d'essais effectués jusqu'en 1976, pour la plupart avec des éprouvettes fabriquées spécialement pour des essais de fatigue. Les catégories A1, C et D de la norme SIA 161 [7] sont également reportées dans cette figure. Il ressort des essais effectués que les paramètres qui influencent la résistance à la fatigue des assemblages rivetés sont [5]: la force de serrage, la longueur de la tige du rivet, le degré de remplissage du trou par le rivet, la méthode d'exécution du trou (perçage ou poinçonnement), la peinture de la surface de contact des assemblages, ainsi que la contrainte moyenne et le taux de pression latérale. Parmi tous ces paramètres, la force de serrage est très influente et permet d'expliquer partiellement la grande dispersion des résultats donnés dans la figure 2. La force de serrage se crée en effet dans le rivet, lorsque formé à chaud, il se refroidit et se contracte, ce qui permet un transfert de force par frottement entre les plaques plutôt que par pression latérale; l'effet des concentrations de contraintes est ainsi réduit. La résistance à la fatigue s'améliore donc avec une augmentation de la force de serrage, bien que celle-ci varie considérablement d'une éprouvette à l'autre.

La comparaison des résultats d'essais avec les courbes de la norme SIA 161 (fig. 2) nous permet de tirer les conclusions suivantes:

- la courbe A1, valable pour le dimensionnement des assemblages boulonnés, ne s'applique pas aux assemblages rivetés;
- en négligeant les résultats des éprouvettes rivetées avec à la fois une force de serrage insuffisante et un taux de pression latérale élevé, la courbe C est satisfaisante pour environ 90% des résultats;
- si l'on ne considère que les éléments en vraie grandeur, on constate qu'une grande partie des résultats ne sont pas couverts par la courbe C et qu'il serait prudent d'adopter la courbe D.

Concernant la corrosion observée sur beaucoup de constructions anciennes, on peut faire les remarques suivantes: la perte de section augmente les contraintes sur toute la section et les entailles créées par la rouille font apparaître des concentrations locales de contraintes à leurs extrémités. Des études expérimentales ont cependant montré que la résistance à la fatigue de l'élément n'était pas diminuée.

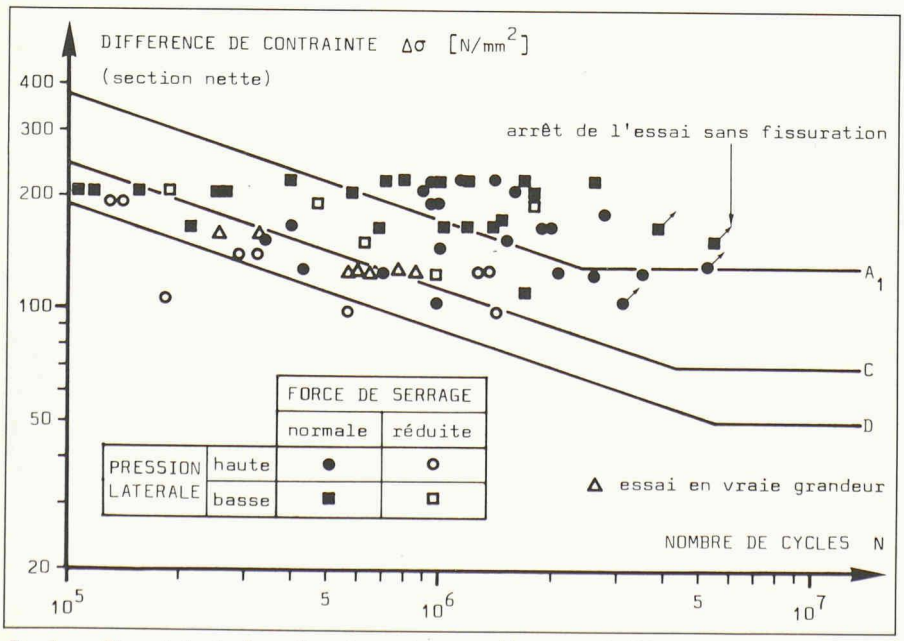

Fig. 2. — Résumé de résultats d'essais sur des assemblages rivetés [3].

4. Résultats des essais effectués à l'ICOM

4.1 *Eléments d'une membrure d'un pont-rail*

Des éléments rivetés ont été prélevés sur une membrure tendue d'un pont-rail en fer puddlé, construit en 1882 [8]. Les rivets ont été soigneusement enlevés en évitant d'endommager les trous. Deux types d'éprouvettes, ayant un rapport entre section brute et nette différent, ont été confectionnés; ils sont représentés à la figure 3a. Au total 14 éprouvettes ont été testées sur quatre niveaux de différence de contraintes.

Les résultats d'essais obtenus sont reportés à la figure 4. En tenant compte de la section nette, la résistance à la fatigue de ces éprouvettes peut être décrite assez précisément par la courbe C de la norme SIA 161.

4.2 *Entretoises d'un pont-route*

Six entretoises d'une longueur totale de 3,2 m, provenant d'un pont riveté construit en 1884 en fer puddlé, ont été récupérées lors de la démolition de l'ouvrage. Il s'agissait d'un pont situé en milieu urbain, fréquenté par un trafic intense composé de véhicules routiers et de tramways. Au moment de leur récupération, les entretoises avaient donc déjà été sollicitées par un très grand nombre de cycles de charge. Cependant, la différence de contraintes créée par le passage du trafic était faible, ce qui fait que le cumul du dommage de fatigue subi par les entretoises pendant leur période d'utilisation est pratiquement négligeable.

Les dimensions des entretoises récupérées, composées de deux cornières par semelle et d'une âme, assemblées par des rivets, sont représentées à la figure 3b, avec le système statique des essais. Les

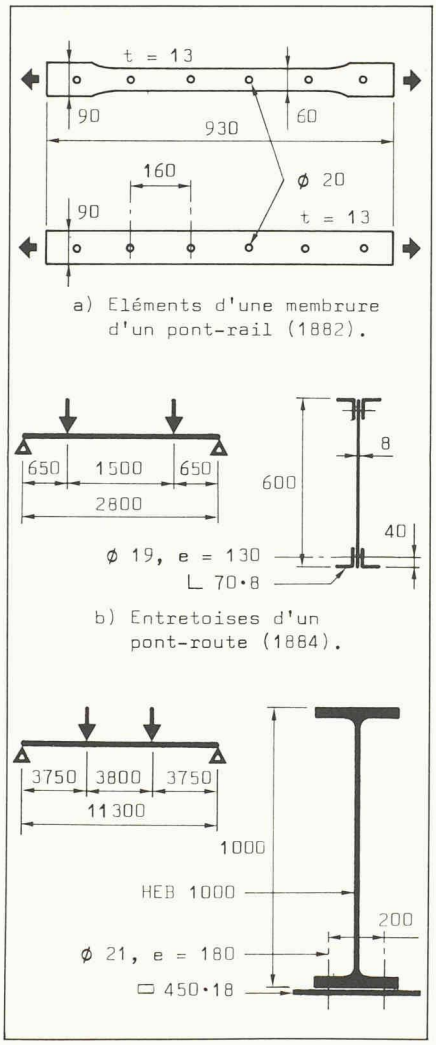

Fig. 3. — Types d'essais et d'éprouvettes de fatigue.

entretoises ont été réparées après l'apparition de la première fissure, ce qui a permis de poursuivre l'essai de fatigue et d'obtenir un deuxième résultat. Les résultats de ces essais sont reportés à la figure 4 et semblent confirmer les résultats obtenus sur les éléments d'une membrure de pont-rail.

4.3 *Poutres CFF*

Dans le cadre d'un mandat des CFF, nous avons effectué des essais de fatigue sur des poutres en acier doux datant d'avant 1935 [9]. Ces poutres prévues comme poutres de ponts-rails de secours, n'ont jamais été sollicitées à la fatigue. D'une longueur de 14 m, elles étaient composées d'un profilé HEB 1000 et d'une semelle de renfort assemblée par des rivets. Les dimensions de la section et le système statique d'essai sont représentés à la figure 3c.

Quatre poutres ont été testées, ce qui nous a permis d'obtenir 8 résultats correspondant à des fissures apparues dans la zone de flexion pure de la poutre. Ces résultats sont reportés à la figure 4. Ils se situent, à une exception près, au-dessus de la courbe C de la norme SIA 161, le calcul des contraintes étant fait en section nette.

4.4 *Synthèse des résultats et des observations*

La figure 4 regroupe donc les résultats des différents types d'essais de fatigue effectués à l'ICOM sur des anciens éléments rivetés.

Les observations faites pendant ces essais et l'analyse des résultats obtenus permettent de formuler les conclusions et les remarques suivantes:

- en se basant sur la section nette pour le calcul des contraintes, la courbe D de la norme SIA 161 donne une description conservatrice de la résistance à la fatigue des constructions rivetées;
- la résistance à la fatigue des éléments rivetés en fer puddlé ou en acier doux ne semble pas être différente;
- en général la fissure se développe au bord des trous des rivets. En effet, l'exécution des trous ou la mise en place des rivets peuvent provoquer un défaut dans le trou et ainsi créer une amorce de fissure;
- cette constatation nous permet d'avancer l'hypothèse qu'un état rouillé ne va pas changer le comportement à la fatigue pour autant que les rivets soient correctement en place et empêchent ainsi une corrosion sous les têtes et dans le trou des rivets;
- la vitesse de propagation d'une fissure augmentant très rapidement avec sa longueur, il est en général urgent d'intervenir dès que la fissure devient visible. Ceci est le cas quand la fissure dépasse largement le dessous de la tête du rivet, soit environ un diamètre de tête de rivet.
- il est possible d'empêcher provisoirement la progression d'une fissure par simple percement d'un trou d'un diamètre adéquat [10] à l'extrémité de la fissure, pour autant que sa longueur soit encore faible. La pose d'un boulon précontraint dans le trou permet en plus d'empêcher la reprise rapide de la fissuration;
- pour qu'une réparation soit durable, il est de loin préférable de renforcer la section partiellement fissurée au moyen de couvre-joints fixés à la poutre par des boulons précontraints;
- des réparations par soudure sont, de façon générale, à déconseiller, car on tombe alors sur des catégories de résistance à la fatigue de beaucoup

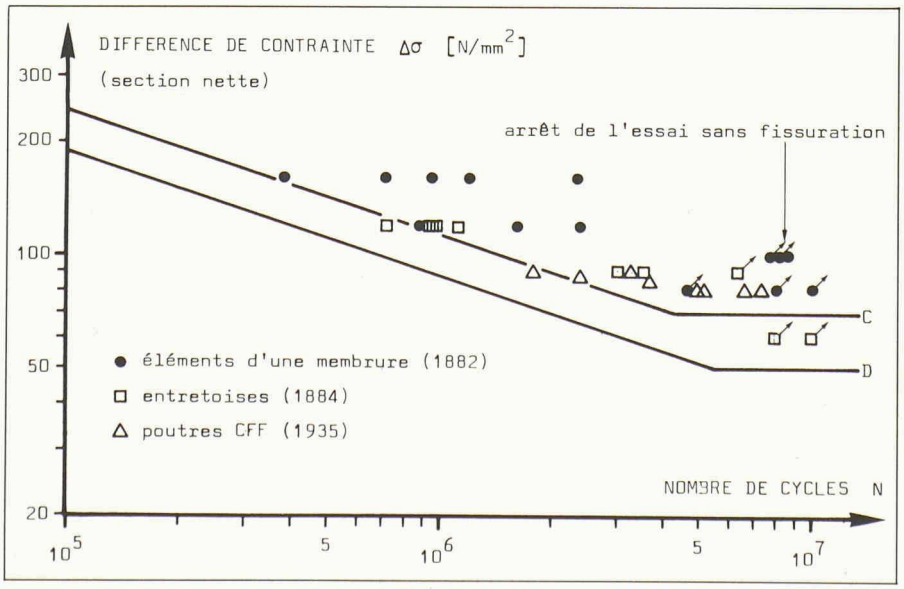

Fig. 4. — Résultats des essais effectués à l'ICOM.

Bibliographie

[1] Hirt M. A., *Remaining Fatigue Life of Bridges*, Proceedings, IABSE Symposium Washington, IABSE Report 38, 1982, pp. 113-129.

[2] SBB-GD, *Abteilung Brückenbau, Schweisseiserne Brücken.* Teil 2: *Materialeigenschaften*, Bern, 1978.

[3] Fisher J. W., *Fatigue and Fracture in Steel Bridges.* Case Studies, John Wiley Son, New York, 1984, pp. 202-205.

[4] Stier W., Kosteas D., Graf U., *Ermüdungsverhalten von Brücken aus Schweisseisen*, Stahlbau 5/1983, pp. 136-142.

[5] Van Maarschalkerwaart H. M. C. M., *Fatigue Behaviour of Riveted Joints*, Proceedings, IABSE Colloquium Lausanne, IABSE Report 37, 1982, pp. 691-698.

[6] Baker K. A., Kulak G. L., *Fatigue Strength of Two Steel Details*, Structural Engineering, Report No. 105, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 1982.

[7] Norme SIA 161: *Constructions métalliques*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1979.

[8] SBB-GD, *Abteilung Brückenbau, Schweisseiserne Brücken.* Teil 4: *Ermüdungsfestigkeit*, Bern, 1979.

[9] Rabemanantsoa H., Hirt M. A., *Comportement à la fatigue de profilés laminés avec semelles de renfort rivetées*, Rapport d'essai, ICOM no 133, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1984.

[10] Gottier M., Hirt M. A., *Das Ermüdungsverhalten einer Eisenbahnbrücke*, Bauingenieur 58/1983, pp. 243-249.

inférieures à celle correspondant à un assemblage boulonné.

5. Conclusion

Cet article veut montrer quel est le degré de connaissance dans le domaine du comportement à la fatigue des constructions rivetées. Les essais effectués jusqu'à présent, tant à l'ICOM que dans d'autres institutions, et les résultats que nous avons donnés ci-dessus permettent de se faire une idée sur la question. Nous comptons compléter ces essais par l'étude à la fatigue d'autres poutres prélevées sur des anciens ponts encore en service.

Remerciements
Les auteurs de cet article tiennent à remercier MM. Saluz, Kummer et Rabemanantsoa, qui ont permis de réaliser une partie des essais effectués à l'ICOM, ainsi que les personnes qui ont aidé à une bonne mise en forme de cet article, en particulier M. Steinhauer du département des matériaux de l'EPFL.

Cela nous permettra de disposer de résultats expérimentaux supplémentaires pour effectuer une approche cohérente, si possible probabiliste, de l'évaluation de la durée de vie de constructions métalliques, but général de notre recherche, dont cet article ne présente qu'un aspect. Il sera ainsi plus facile de déterminer la durée de vie restante d'une structure métallique en service depuis un certain temps. Cette question devient chaque année plus actuelle à cause du nombre toujours croissant d'ouvrages au sujet desquels il s'agit de décider si on peut les maintenir en service, ou s'il faut soit les renforcer soit les remplacer.

Adresse des auteurs:
Eugen Brühwiler, ing. dipl. EPFZ/SIA
Rolf Bez, ing. dipl. EPFL/SIA
Manfred A. Hirt, prof., Dr. ès sc., ing. dipl. EPFZ/SIA
ICOM-Construction métallique
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
1015 Lausanne

The Development of Constructional Steelwork: Suggestions for Further Research in Structural Mechanics

by Leo Finzi, Milan

Summary
This paper focuses attention on the present and near future of constructional steelwork, so far as can be foreseen today. Its object is to identify those areas that have attracted less research, are less well known than others, and so the fields where further developments in Structural Mechanics would be more profitable for constructional steelwork in general.

1. Introduction

In the mid 18th century, when Leonhard Euler began to tackle the problems of instability in compressed struts, he certainly did not realize that he was opening the way to the construction of steel skeletons for buildings of one hundred floors and more, or for trusses sunk deep below the sea to support gigantic offshore drilling platforms, or for arched road and rail bridges with spans covering hundreds of metres.

The same sort of thing could be said of many other scientific pathfinders in the later 18th and early 19th centuries, men like Cauchy, Coulomb, De Saint Venant and Navier, when they layed the foundations for the theory of elasticity. Their seminal studies were quickly fostered and exploited by the Industrial Revolution, so that the second half of the 19th century saw the construction of such daring and illustrious works as great suspension and arched bridges, or the boldness and lightness of the London Crystal Palace. To a large extent this rapid progress was due exactly to the fact that the engineers of the day could draw on the results of research into the Mechanics of Solids and the Theory of Structures.

In the course of 1984 we celebrated the centenary of the death of Alberto Castigliano who, with other contemporary scientists, layed down the rules for identifying the state of stress and strain in hyperstatic structures. Once again, mastery of this kind of problem was quickly translated into actual structures — perhaps one of the most beautiful being the Ponte di Paderno, a bridge over the river Adda built in 1889 by the Swiss engineer Giulio Röthlisberger, who studied under Culmann and Ritter at ETH in Zurich.

However, this is by no means an exclusively one way process. It is certainly true that scientific progress has often furnished the essential premises behind the design work for new and original buildings with their relative technologies and contruction methods. But the reverse is also true.

Think for a moment of prestressed concrete technology. At the beginning of this century it raised problems for the scientists concerning rheological behaviour and the cracking mechanisms in concrete. Or again, the behaviour of metal struts in the range of mean slendernesses, which opened the way thirty years ago for so many studies, both theoretical and experimental, on the effects of residual stresses in relation to the manufacturing process. Then, just as a final example, consider the instability of shells. Technological reality showed their actual behaviour to be so different from what the classical theorems in this field suggested, that the whole question had to be opened up again, stressing the effects of the initial geometrical and mechanical imperfections. This paper takes the standpoint of the second of these two possible approaches. Or, to put it another way, it is written from the point of view of a structural engineer, whether he is designer, technologist or constructor, and is directed towards scientists engaged in research into the Mechanics of Solids and the Theory of structures. Its purpose is to draw attention to certain problems that have still not been solved, or that have been given solutions of limited practical value, and to certain methods or algorithms which are highly esteemed by research scientists, but that in practice are not so effective and perhaps deserve less commendation.

2. The mathematical Tools

C. Trusdell, who is well known for his penchant towards the paradox, recently held a conference in Milan with the title, «The Computer, the Ruin of Science». He pointed out that such a very powerful and precious tool might in the end dull or deaden the critical faculties of the scientist. However, if we look at the results that have been obtained in the field of structural engineering since the advent of the computer, it must be admitted that the analysis of the static and dynamic behaviour of even such highly complex structures as shells, space trusses, hanging roofs and so on has taken really great steps forward. An undoubted contribution here is the possibility to consider and store a vast range of possible load conditions, temperature effects and the interaction between the structure itself and its foundation soil. Methods such as those employing finite elements and boundary elements are today highly efficient tools for the structural engineer. More work, however, is still needed, and a number of targets have yet to be reached. On that is worth mentioning here is the possibility of using constitutive laws that are less elementary than the by now classical elasto-viscoplastic laws met with in geotechnical problems, or in ultimate limit state structural analyses, often associated as well with second