La résistance à la fatigue des poutres en treillis soudées et rivées

Autor(en): **Ceradini, G.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht**

Band (Jahr): **3 (1948)**

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-4079

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

Ia8

La résistance à la fatigue des poutres en treillis soudées et rivées

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweissten und genieteten Fachwerkträgern

Resistance to fatigue of lattice girders welded and riveted

DOTT. ING. GIULIO CERADINI
Rome

Les progrès réalisés en Suisse pendant les années 1935 (1) à 1945 dans la construction de poutres en treillis soudées pour constructions soumises à des sollicitations de fatigue ont été contrôlés et mis en évidence par des essais très soigneux et étendus effectués au Laboratoire Fédéral d'Essai des Matériaux de Zurich. Ces essais ont porté sur trois poutres soudées et, à titre de comparaison, sur deux poutres rivées.

Les poutres soudées ont été réalisées en respectant les principes fondamentaux suivants :

1. Abandon des schémas propres aux constructions rivées et adoption de nouvelles formes structurales satisfaisant aux exigences particulières des constructions soudées;
2. Assemblage des barres aux goussets par des soudures bout à bout;
3. Choix des sections des barres et des goussets en fonction des tensions qui naissent dans la zone d'assemblage et dans les goussets mêmes, afin que la transmission des efforts puisse avoir lieu d'une façon absolument continue et sans formation de pointes de tension indésirables;
4. Réalisation des barres du treillis par des fers plats assemblés par soudures d'angle continues et exceptionnellement par des profilés;
5. Elancement maximum des barres et des goussets afin de réduire au minimum les tensions secondaires;
6. Usinage des soudures bout à bout sollicitées à la traction, et disposition à l'extrémité des cordons d'angle courants des barres de soudures de raccord usinées en forme de patte et à section très élancée, afin de réduire les effets d'entaille (2);

(1) Mortada, *Beitrag zur Untersuchung der Fachwerke aus geschweisstem Stahl und Eisenbeton unter statischen und Dauerbeanspruchungen*. Rapport EMPA, n° 103, 1936.

(2) Ros-Ceradini, *Statische und Ermüdungsversuche mit aufgeschweissten und aus dem vollen Stahlmaterial herausgearbeiteten, verschieden geformten Laschenkörpern sowie mit überlapptem Stoss*. ESAB Göteborg, 1949.

7. Choix des matériaux, disposition du plan de soudure et exécution conformes à toutes les prescriptions qui garantissent la réalisation de soudures de première qualité, c'est-à-dire pratiquement exemptes de défauts, avec bonnes caractéristiques de déformation pour le métal d'apport et pour la zone de transition, et soumises à des faibles tensions de retrait.

Les poutres soudées type A n°s 1 et 2, qui différaient entre elles par quelques détails constructifs seulement, avaient des barres à section en croix (v. fig. 1 et 4). La section des barres de la poutre soudée type B n° 3 était en T et en double T (v. fig. 2). Celles de la poutre rivée n° 4 étaient constituées par deux cornières disposées symétriquement par rapport au plan de la poutre; les goussets étaient plans (v. fig. 3). La poutre rivée n° 5 était celle essayée en 1920-1921 par le professeur T. Wyss pour la détermination du comportement statique des poutres en treillis et en particulier de l'état de tension dans les goussets; ces derniers étaient en conséquence de dimensions relativement très grandes et l'élancement des barres était très faible ([3]).

L'acier utilisé pour ces poutres d'essai était l'acier courant « Ac N », prélevé du magasin sans des précautions spéciales. Les caractéristiques de résistance et de déformation du matériau de base, de celui d'apport et des soudures, ainsi que des rivures, ont toujours satisfait aux exigences des normes. En particulier pour la résistence à la fatigue on a déterminé, sur les éprouvettes prélevées des poutres, ou préparées avec le même matériau, les valeurs moyennes suivantes (les valeurs minima devant au moins atteindre 85 % de celles-ci):

	σ_{puls} kg/mm²
Matériau de base avec peau de laminage ou traité au jet de sable .	24
Soudure bout à bout, sollicitée perpendiculairement au cordon :	
Non usinée	18
Usinée	22
Soudure d'angle, sollicitée parallèlement au cordon	20
Tôle avec trou pratiqué avec soin	18
Rivure	18

Toutes les poutres furent soumises à des essais statiques et de fatigue, très soigneux et détaillés, dans la grande machine à flexion du L. F. E. M.

Au cours des essais statiques on a mesuré :

1. Les déplacements verticaux et horizontaux des nœuds;
2. Les rotations et les déformations des goussets;
3. La répartition des tensions dans les barres (tensions principales, tensions secondaires, tensions aux bords);
4. L'état de tension dans les gousset les plus intéressants.

Les résultats des mesures furent comparés systématiquement avec les valeurs correspondantes déterminées par le calcul.

([3]) Wyss, *Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke* (*Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, H. 262, Berlin, 1923).

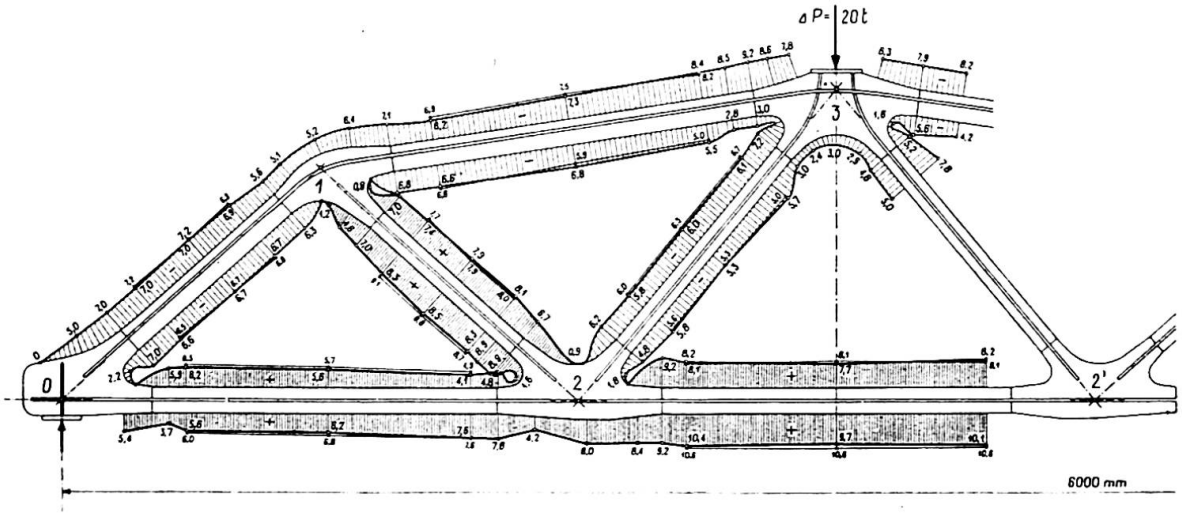

Fig. 1. Tensions à la fibre extrême en kg/mm² sous l'effet d'une charge de 20 tonnes au nœud 3.

– Valeurs mesurées. – Valeurs calculées.

Les essais de fatigue ont été effectués en soumettant les poutres à des pulsations, produites par deux vérins spéciaux Amsler travaillant en synchronisme et actionnés par deux pulsateurs Amsler reliés en parallèle. Après rupture la poutre était soigneusement réparée et remise en état de service; l'on put ainsi essayer la même poutre plusieurs fois.

En outre on a soumis la poutre n° 1 à un essai de charge dans le domaine plastique et à un essai de flambage.

Les résultats des essais

Essais statiques

Toutes les poutres, sollicitées jusqu'à 150 % de la charge maximum admissible en service, se comportaient dans le domaine élastique. On releva des déformations permanentes après la première charge dues aux glissements des joints pour les poutres rivées et aux déformations plastiques locales causées par l'égalisation ou l'élimination sous charge des tensions de retrait. La concordance entre les valeurs calculées et celles mesurées des *flèches de flexion, rotations des nœuds, tensions principales et tensions secondaires* a été toujours très satisfaisante (fig. 1 à 3); certaines irrégularités mises en évidence par les mesures dans l'allure des diagrammes des tensions secondaires doivent être attribuées : pour les poutres soudées aux déformations de retrait, qui produisent des incurvations des axes des barres; pour les poutres rivées, au fait que la rivure ne réalise pas un assemblage tout à fait rigide. Ces irrégularités, qui étaient d'ailleurs faibles, n'ont eu aucune influence sur la résistance des poutres.

Les mesures très minutieuses de l'*état de tension dans les assemblages des barres aux gousset et dans les goussets mêmes* ont donné des résultats très satisfaisants, qui peuvent être résumés ainsi :

Pour les poutres soudées type A n°s 1 et 2, grâce au choix approprié de la composition des sections des barres et de la conformation des goussets, la transmission des forces entre les différents éléments du treillis a lieu

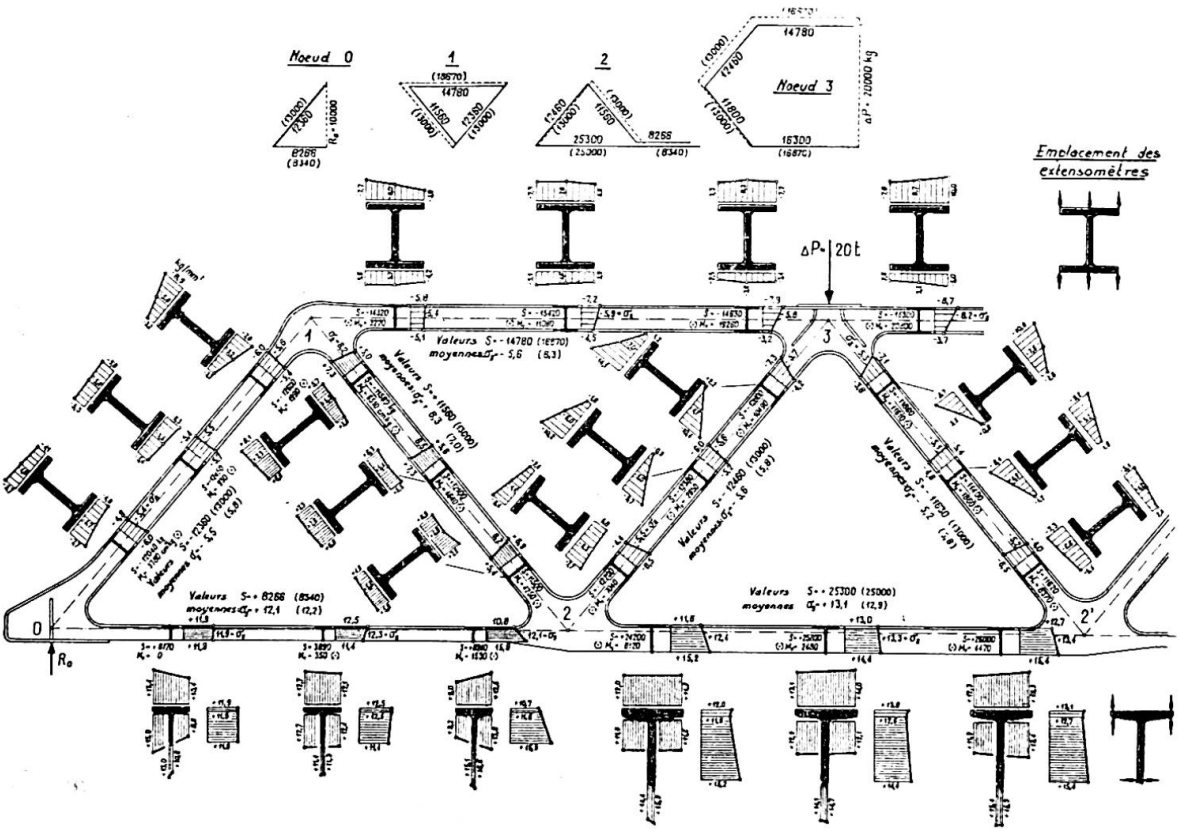

Fig. 2. Polygone des forces des nœuds 0, 1, 2 et 3. Tensions dans les barres :

– Valeurs mesurées. ... Valeurs calculées. σ : Tensions en kg/mm2.
S : Efforts en kg. M, : Moments secondaires en cmkg.

d'une façon tout à fait continue et uniforme; le treillis constitue une structure continue, monolithique, dans laquelle toutes les sections sollicitées à la traction ont pratiquement le même degré de sollicitation;

Le champ de tension dans les goussets de la poutre soudée type B n° 3 est très semblable à ceux qui se vérifient dans les goussets des poutres type A. Toutefois, aux endroits où les ailes des profilés en T et en double T s'incurvent sur les bords des goussets, on remarque une concentration de tensions due à la transmission au gousset des efforts agissants dans les ailes des profilés. Sous cet aspect le type A (section des barres en croix) est plus favorable que le type B (section des barres en T et double T);

Les poutres rivées se sont démontrées inférieures aux poutres soudées pour ce qui concerne la continuité et la régularité de la transmission aux goussets des forces agissantes dans les barres. Cette transmission a lieu en partie par effet du frottement entre les surfaces comprimées l'une sur l'autre par les rivets, en partie par l'action directe des rivets. Aux trous des rivets il se forme des pointes de tension très fortes, qui ne peuvent pas être calculées théoriquement. Pour chaque rivure la section correspondante au premier rivet, ou au premier rang de rivets, est plus sollicitée que les autres. Cela se vérifie parce qu'en cet endroit la force dans la barre agit encore dans toute son intensité, et que par conséquent la pointe de tension est la plus élevée; deuxièmement parce qu'en pratique on assemble aux goussets l'âme ou les ailes des sections des barres et cela implique que déjà avant le premier rivet, ou le premier rang de rivets, les tensions agissantes dans les barres tendent à se concentrer dans la partie directement assemblée

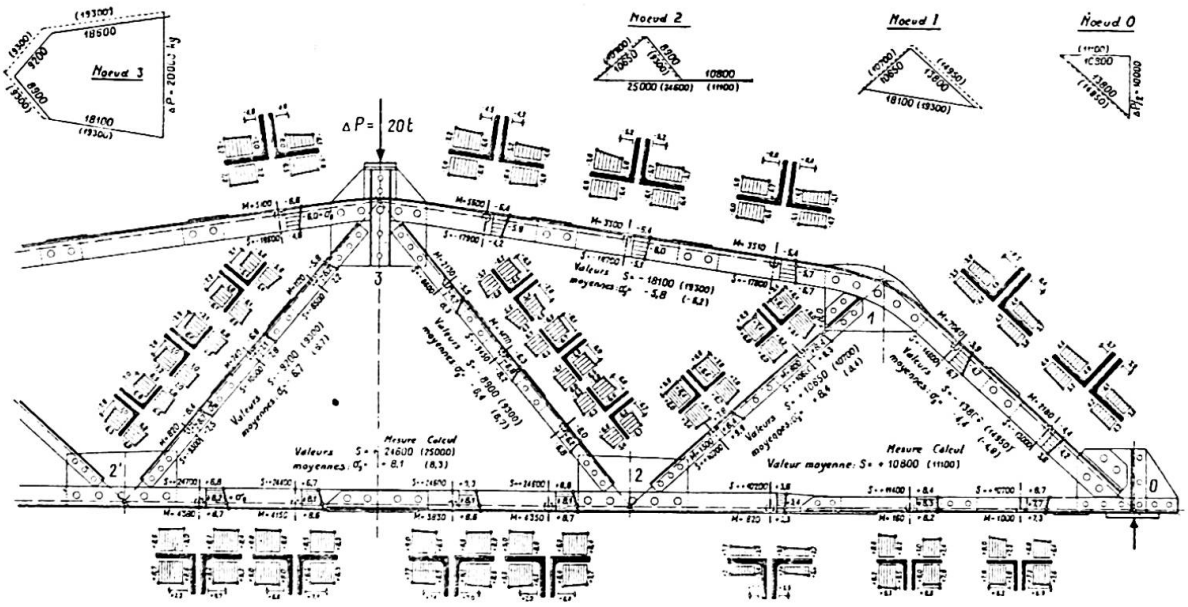

Fig. 3. Polygone des forces des nœuds 0, 1, 2 et 3. Tensions dans les barres :

– Valeurs mesurées. ... Valeurs calculées. σ : Tensions en kg/mm². S : Efforts en kg. M : Moments secondaires en cmkg.

au gousset en y augmentant le degré de sollicitation; enfin troisièmement parce que pour chaque rivure les rivets extrêmes transmettent un effort plus grand que les intermédiaires; ce fait, connu depuis longtemps, a été confirmé par les essais en question.

L'essai de charge jusqu'à sollicitation de la nervure inférieure dans le domaine plastique, effectué sur la poutre n° 1, donna les résultats suivants :

Limite de proportionnalité :	
Rapportée à la tension moyenne dans la barre 2-2′ . . .	24 kg/mm²
Rapportée à la tension au bord de la même barre	27 kg/mm²
Limite d'écoulement, rapportée à la tension moyenne dans la barre 2-2′	29 kg/mm²
Limite d'écoulement du matériau de base	31 kg/mm²

L'*essai de flambage* effectué sur la poutre soudée n° 1 montra que la charge critique des barres comprimées était plus haute que celle calculée selon la théorie du L. F. E. M. du flambage excentré, en supposant une excentricité de la charge initiale exprimée par la formule

$$m = p/k = 0{,}5\ \lambda/110$$

(p = excentricité de la charge, k = rayon du noyau central entrant en question, λ = degré d'élancement de la barre). A cause des irrégularités des axes des barres, constatés au cours des essais et dues au retrait des soudures, il est tout à fait justifié d'admettre pour chaque barre l'existence d'une excentricité initiale de la charge.

TABLEAU I. — *Résumé des principaux résultats des essais de fatigue*

Poutre d'essai	Rupture	Cause et emplacement de la rupture	Résistance à la fatigue pulsante (1)	Moyenne	Moyenne générale des poutres soudées
N° 1 Soudée	A B C D	Porosités dans les cordons longitudinaux des barres dues à la transition soudure d'angle-soudure en K.	~ 14,0 ~ 15,5 ~ 16,0 ~ 16,5	~ 15,5	
N° 2 Soudée	A B C	Soudure bout à bout; Soudure d'angle longitudinale; Soudure bout à bout.	~ 17,0 (19,0) (2) ~ 17,5 ~ 17,5	~ 17,5	~ 16,3
N° 3 Soudée	A B C D	Joint de la barre 2-2′ au gousset 2 ou resp. 2′ : concentration de tensions.	~ 16,0 ~ 15,5 ~ 17,0 ~ 16,0	~ 16,0	
N° 4 Rivée	A	Joint à couvre-joints rivé de la barre 2-2′;	~ 14,5	~ 15,5 rapportée à la section nette.	
	B	Joint de la barre 1-2 au gousset 1: rivure;	~ 16,0		
	C	Joint de la barre 1-2 au gousset 2: rivure:	~ 16,5		
	D_1 (3)	Joint de la barre 1′-2′ au gousset 2′: rivure;	~ 16,5		
	D_2	Joint à couvre-joints rivé de la barre 2-2′.	~ 14,5		
N° 5 Rivée	A	Joint de la barre 1-2 au gousset 1: rivure;	~ 11,5	~ 13,0 rapportée à la section nette.	
	B	Joint de la barre 1-4 au gousset 4: rivure;	~ 12,5		
	C	Comme A;	~ 12,0		
	D	Montant 1′-2′. Intaille profonde et forte; influence des tensions secondaires;	~ 12,0		
	E_1 (3) E_2	Barre 2-4 : rivure; Joint de la barre 1-4 au gousset 1 : rivure.	~ 15,0 ~ 14,5		

(1) Résistance à la fatigue pulsante — sollicitation variable entre 0 et la valeur maximale — rapportée aux tensions principales dans les barres (treillis à charnières), à 1 million de pulsations et, pour les poutres rivées, à la section nette : kg/mm².

(2) Rapportée à la section de rupture : ( ).

(3) Les deux ruptures ont eu lieu en même temps

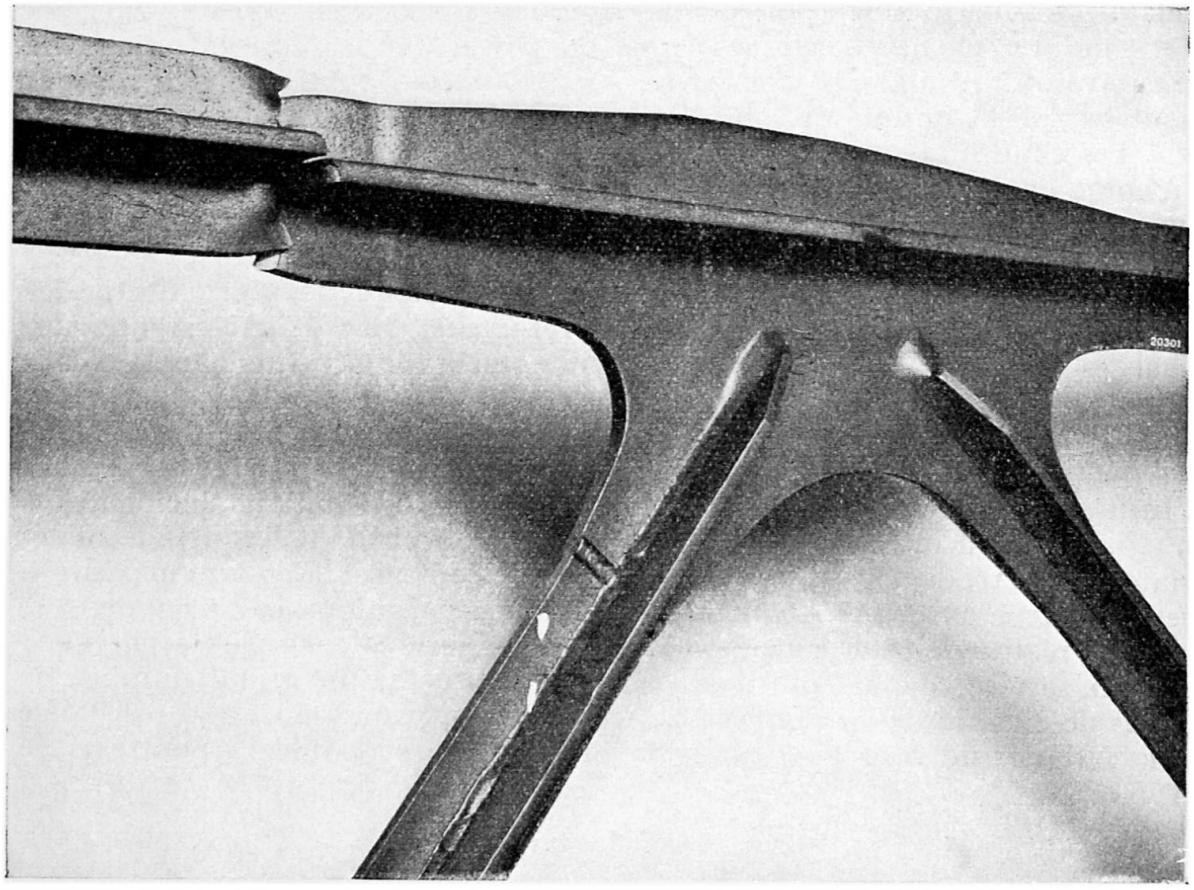

Fig. 4. Rupture de la poutre n° 1.

Essais de fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont résumés dans le tableau I.

Les poutres soudées n^{cs} 1 à 3 eurent en moyenne une résistance à la fatigue de 5 % plus élevée que la poutrée rivée n° 4. La cause des ruptures dans la poutre n° 1 a été un changement de forme des soudures longitudinales des barres (soudures d'angle en correspondance des barres, soudures en K en correspondance des goussets), qui donna lieu à des entailles (fig 4). Les ruptures de la poutre n° 3 furent au contraire causées par les concentrations de tension dans les goussets 2 et 2'. La poutre soudée n° 2 atteignit pratiquement la valeur optimum de la résistance à la fatigue (18 kg/mm^2).

Dans les poutres rivées la rupture s'amorça aux trous des rivets des joints; unique exception fut la rupture D de la poutre n° 5, qui fut causée par une forte entaille et par l'effet de tensions secondaires très importantes. La poutre rivée n° 5, qui avait été conçue pour d'autres buts que ceux des essais en question, montra une résistance à la fatigue assez faible (13 kg/mm^2).

Pour les poutres élancées n^{cs} 1 à 4 les tensions secondaires, dues à l'effet de l'assemblage rigide des barres aux goussets, n'ont eu aucune influence sur la résistance à la fatigue. De même les tensions de retrait n'ont eu aucun effet sur la résistance à la fatigue des poutres soudées. Les

défauts de construction (porosité des soudures, effets d'entaille aux surfaces des soudures et aux bords des trous des rivets) et les concentrations de tension aux assemblages des barres aux goussets (poutre soudée n° 3 et poutres rivées) ont eu au contraire une très grande importance ([4]).

Les conditions de sollicitation auxquelles ont été soumises les poutres au cours des essais avec les pulsateurs sont beaucoup plus sévères que celles qui se présentent dans la plus grande partie des constructions civiles sollicitées dynamiquement.

En réalité les charges maxima, sur la base desquelles l'on effectue les calculs statiques, ne se réalisent que rarement; la valeur moyenne des charges variables est toujours considérablement plus petite que le maximum prévu. Les éléments principaux des constructions sont en outre généralement soulagés par la collaboration d'autres éléments, tels que, pour les ponts, le tablier, les contreventements, etc., dont on néglige en général l'influence favorable dans les calculs. Enfin les sollicitations accidentelles n'agissent qu'à intervalles de temps assez longs, pendant lesquels le matériau peut se réadapter. Avec les pulsateurs au contraire la charge maximum est appliquée avec une fréquence de quelques pulsations par seconde.

La réalité de cette considération est mise en évidence par le fait qu'il y a en service, depuis plusieurs dizaines d'années, un grand nombre de ponts de chemin de fer dont les caractéristiques, par rapport à la résistance à la fatigue, ne sont guère plus favorables que celles de la poutre rivée n° 5.

Conclusions

Les poutres d'essai soudées ont montré, au cours des essais, un comportement statique supérieur et un comportement dynamique au moins équivalent à celui des poutres rivées.

Dans le domaine des poutres en treillis soudées la technique suisse a réalisé dans la période 1935-1945 des progrès remarquables qui ont permis d'augmenter, pour les poutres en treillis soudées en acier normal « Ac N » avec soudures de première classe, les tensions admissibles d'environ 40 % ([4]) ([5]).

Les coefficients de sécurité sont :

Par rapport à l'écoulement : 1,7;
Par rapport à la fatigue : 1,5;
Par rapport au flambage : 2,5 (en considérant une excentricité initiale de la charge selon la formule $m = p/k = 0{,}5\lambda/110$).

Afin que les coefficients de sécurité cités soient maintenus en pratique il faudra respecter toutes les mesures nécessaires, se rapportant aux matériaux, à la réalisation de la construction dans son ensemble et dans ses détails, et à la technique de la soudure, qui assurent la réalisation de constructions soudées de première classe.

Notamment, dans l'état actuel de la technique de la soudure, on doit

---

([4]) CERADINI, *Die Ermüdungsfestigkeit geschweisster und genieteter Fachwerkträger*. Rapport EMPA en cours de publication.
ROS-BÜHLER-CERADINI, *Fachwerkträger für Eisenbahnbrücken aus « ST N » in völlig geschweisster Ausführung*. ESAB, Göteborg, 1949.

([5]) ROS, *Die Festigkeit und Sicherheit der Schweissverbindungen*. Rapport EMPA, n° 156, 1946.
ROS, *La fatigue des soudures*. Rapport EMPA, n° 161, 1948.

éviter des formes complexes des sections des barres (par exemple section en caisson) qui donnent lieu à des difficultés dans l'exécution des soudures. Les résultats des essais en question sont valables, en construction de ponts de chemin de fer, pour des ponts légers et moyens, jusqu'à des portées de 35 mètres ([4]).

Résumé

La présente contribution se rapporte aux essais statiques et dynamiques effectués au L. F. E. M. de Zurich sur trois poutres d'essai soudées et deux poutres d'essai rivées de comparaison.

Les résultats des essais peuvent être considérés comme très satisfaisants et montrent qu'il est tout à fait justifié de considérer les poutres à treillis soudées, construites selon les principes fondamentaux de la technique des constructions soudées, sur un plan de parfaite équivalence avec les rivées, et de les admettre aussi pour les constructions soumises à des fortes solliciations dynamiques.

Les sections des barres doivent être simples — section en croix ou dérivées. A cause de cela les résultats des essais sont applicables, en construction de ponts de chemin de fer, pour les ponts jusqu'à 35 mètres de portée.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag bezieht sich auf die statischen und dynamischen Untersuchungen der E. M. P. A. Zürich an drei geschweissten und zwei für Vergleichszwecke genieteten Versuchsträgern.

Die Versuchsergebnisse können als sehr befriedigend betrachtet werden. Sie beweisen, dass es gerechtfertigt ist, geschweisste Fachwerkträger, die nach den allgemeinen Grundsätzen der Schweisstechnik konstruiert sind, als den genieteten ebenbürtig zu betrachten und sie auch für die schwersten dynamischen Beanspruchungen zuzulassen.

Die Stabformen müssen einfach sein — Kreuzquerschnitte oder ähnliche. Wenn dies der Fall ist, können die Versuchsresultate übertragen werden auf Eisenbahnbrücken bis zu 35 m Spannweite.

Summary

The present paper refers to static and dynamic tests carried out at the L. F. E. M. of Zurich on three test welded girders and two test riveted girders for comparison.

The test results can be considered as very satisfactory and show that it is quite justifiable to consider welded lattice girders, constructed according to the fundamental principles of the technique of welded structures, as being the absolute equal of riveted girders, and to allow them to be used equally for structures subject to large dynamic stresses.

The sections of the bars should be simple : section in the form of a cross or similar. On account of that, the results of the tests are applicable, when building railway bridges, to those having a span of up to 35 metres (115 ft).

Leere Seite
Blank page
Page vide