IIIc. Contrôle des soudures

Objekttyp: **Group**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **23.05.2024**

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

III c

Contrôle des soudures.

Prüfung der Schweißnähte.

Inspection and control of welded joints.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIc 1

Méthodes d'essais et de contrôle de la soudure électrique des aciers ordinaires.

Prüfungs- und Überwachungsverfahren für die elektrische Schweißung der gewöhnlichen Stähle.

Testing and Control in the Electric Welding of Ordinary Steels.

G. Moressée,
Ingénieur des Constructions Civiles et Coloniales, Liége.

La soudure électrique à l'arc ou par résistance des aciers utilisés normalement dans la construction des ponts et charpentes ne présente plus guère de difficultés, mais au fur et à mesure que des raisons d'économie, de facilité ou d'esthétique en favorisent l'emploi, il devient de plus en plus nécessaire de parfaire les méthodes d'essais et de contrôle de ces modes d'assemblages.

Les cahiers de charges et leurs stipulations quant à la soudure électrique, ne visent en général que la réception des électrodes, le contrôle de la main d'oeuvre et l'examen des cordons déposés ou des points effectués.

Le constructeur consciencieux qui supporte une grave responsabilité civile et morale, se doit d'être infiniment plus sévère et de pousser par des études plus approfondies le contrôle de son travail en vue de sa bonne réussite.

I. La soudure électrique à l'arc.

Modalités d'emploi.

La soudure électrique à l'arc des aciers doux (37—44 kg/mm², 42—50) et demi-durs (St. 52, MS. 60—70, C. 58—65 etc.) de construction, ne s'effectue guère en Belgique que par les électrodes protégées, enduites ou enrobées. La soudure au fil nu est abandonnée dans les assemblages de résistance à cause de la fragilité et de l'oxydabilité du métal déposé dus aux oxydes et aux nitrures qui y sont inclus (SiO_2 état globulaire) ou dissous (FeO et nitrures jusqu'à teneur fixe de 0,12 %).

Le courant alternatif est plus généralement employé que le courant continu car il provoque par des variations de pression, un brassage énergique de la masse en fusion chassant scories et bulles; il exige un arc maintenu court pour des raisons de stabilité d'où production de gouttelettes nombreuses et petites à cause de la concentration de chaleur et protection efficace du métal en fusion.

Les intensités élevées sont spécialement recherchées, tout en restant dans la zone d'arc stable, car elles permettent un accroissement notoire de la vitesse de

soudure d'où économie de prix de revient et diminution des tensions internes, une pénétration meilleure, un dépôt de métal sain et sans inclusions.

Choix des électrodes.

Le choix des électrodes convenant pour un ouvrage déterminé est un problème capital, laissé trop souvent au libre arbitre des services commerciaux. Il dépend de la nature de l'acier à souder, des types d'assemblages (rigides semi-élastiques, élastiques), de la position des éléments de résistance, (cordons en bout, frontaux, latéraux, obliques, combinés), de leur place dans l'espace (cordons horizontaux, verticaux, au plafond), de l'endroit où le travail de soudure se fait (atelier, chantier) et même des conditions atmosphériques.

Les types d'électrodes étant déterminés, on a avantage à utiliser les diamètres les plus gros possible compatibles avec l'épaisseur des pièces à souder et la position des cordons. En effet, en admettant une densité de courant convenable, la vitesse de soudure croît en même temps que le rendement du matérial et de la main d'oeuvre et les tensions internes diminuent d'autant.

La main d'oeuvre.

La bonne réussite dépend en grande partie de la qualité et de la conscience professionnelle des ouvriers soudeurs et des surveillants.

Des visites médicales périodiques assureront l'état de santé du personnel et l'on tâchera que le travail se fasse dans des conditions d'hygiène, de salubrité et de commodité.

Chaque semaine ou au maximum chaque quinzaine, soit au début ou en fin de semaine, chaque soudeur effectuera une plaque de contrôle comprenant essais de pliage à froid et éprouvettes en croix destinées à être écrasées sans que les cordons s'altèrent, puis examinées dans leur coupe par l'examen macrographique (fig. 1).

Le métal d'apport.

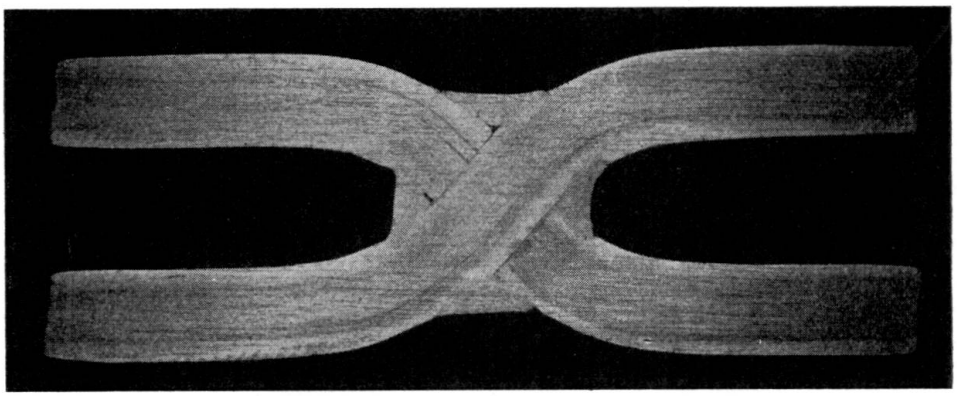
Le métal d'apport doit être examiné dans sa nature par l'analyse chimique (vérification de la constance de qualité); dans sa structure par l'analyse micrographique (influence du mode opératoire sur la grosseur des grains, la pénétration, les inclusions); dans son état de pureté par l'analyse macrographique (inclusions, porosité); dans ses caractéristiques physiques par des essais mécaniques sévères (l'allongement de rupture étant le critère de qualité). Cf. fig. 2, 3, 4 et 5, exemple d'étude de soudure sur acier au carbone Ougrée 58—65 kg et électrodes Arcos Stabilend.

Les assemblages soudés.

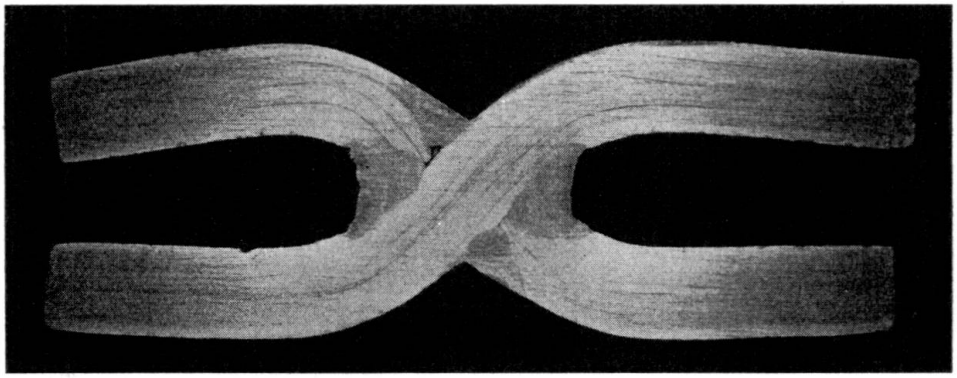
Ce qui intéresse le constructeur n'est pas cependant la seule tenue du métal déposé mais la résistance de l'assemblage soudé aux efforts et aux agents corrosifs de l'atmosphère.

Les éprouvettes pour l'étude de la soudabilité d'un acier présentent à ce sujet un grand mérite parce qu'elles se rapprochent des conditions pratiques de travail,

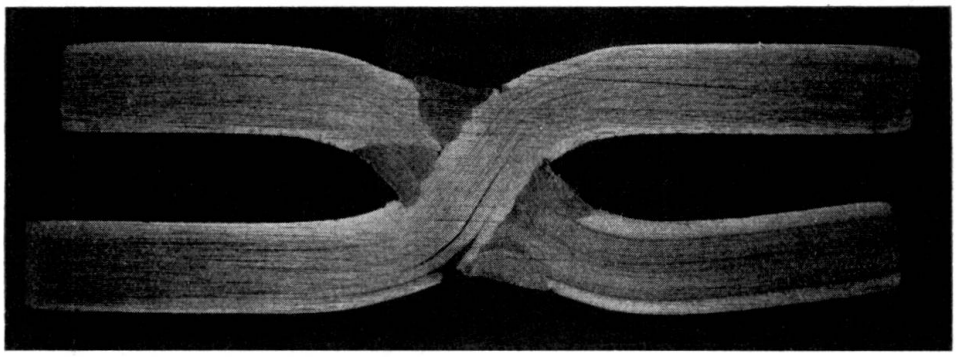
tout en donnant des résultats absolument précis sur leur comportement à la traction (avec détermination de la limite élastique) et au choc (éprouvettes de résilience *Mesnager* ou *Charpy*).



Soudures avec électrodes de ø = 4 mm. Intensité: 190 ampères.



Soudures en chanfrein avec électrodes de ø = 6 mm. Intensité: 250 ampères.



Soudures en chanfrein avec électrodes de ø = 8 mm. Intensité: 500 ampères.

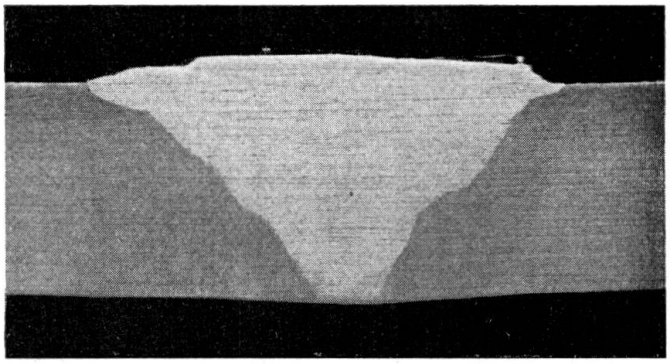
Fig. 1.

Eprouvettes en croix; après écrasement les cordons doivent rester intacts.

Il est ensuite nécessaire de vérifier le taux de résistance des cordons des divers types envisagés par le bureau d'études dans les conditions même de réalisation et de fatigue et d'en étudier les propriétés de déformation avant d'atteindre la limite élastique.

Fig. 2a.

Etude d'un joint soudé.



Analyse chimique.

Acier à 58—65 kg		Electrodes „Arcos Stabilend" métal déposé	
C.	0,310	C.	0,080
Mn.	0,836	Mn.	0,430
P.	0,060	P.	0,014
Si.	0,075	Si.	0,015
S.	0,037	S.	0,032

Essais mécaniques.

Charge de rupture	58 kg/mm²	50 kg/mm²
Limite élastique	38 kg/mm²	36 kg/mm²
Allongement de rupture	24 %	28 %
Résilience	6 kgm/cm²	10,6 kgm/cm²

Résultats moyens sur 80 essais.

Fig. 2b.

Sondages à la fraise.

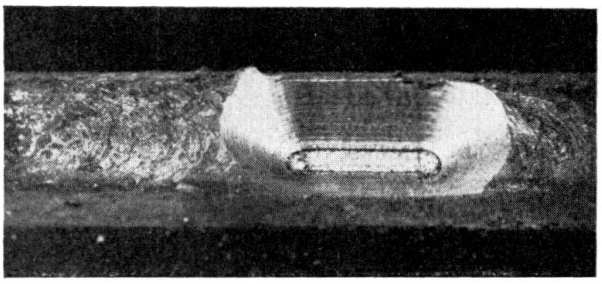


Fig. 2.

Etude d'une éprouvette soudée en courant alternatif avec des électrodes «Arcos Stabilend» le métal de base étant de l'acier à 58—65 kg.

Plaque de réception sur acier 37—44 kg (24 essais),

Charge de rupture	min.	50 kg/mm²
	max.	56 kg/mm²
	moy.	54 kg/mm²
Résilience	min.	8,9 kgm/cm²
	max.	12,6 kgm/cm²
	moy.	11 kgm/cm²

Pliage sur mandrin ø = 3 · e.
Bons à 180°.

Plaque de réception sur acier 58—65 kg (24 essais).

Charge de rupture	min.	55 kg/mm²
	max.	69 kg/mm²
	moy.	58,5 kg/mm²
Résilience	min.	5,52 kgm/cm²
	max.	8,27 kgm/cm²
	moy.	6,7 kgm/cm²

Pliage sur mandrin ø = 5 · e.
Bons à 180°.

Fig. 3.

Sans traitement thermique. Après recuit de normalisation.

Métal d'apport.

Joint de la soudure.

Près du joint.

Métal brut.

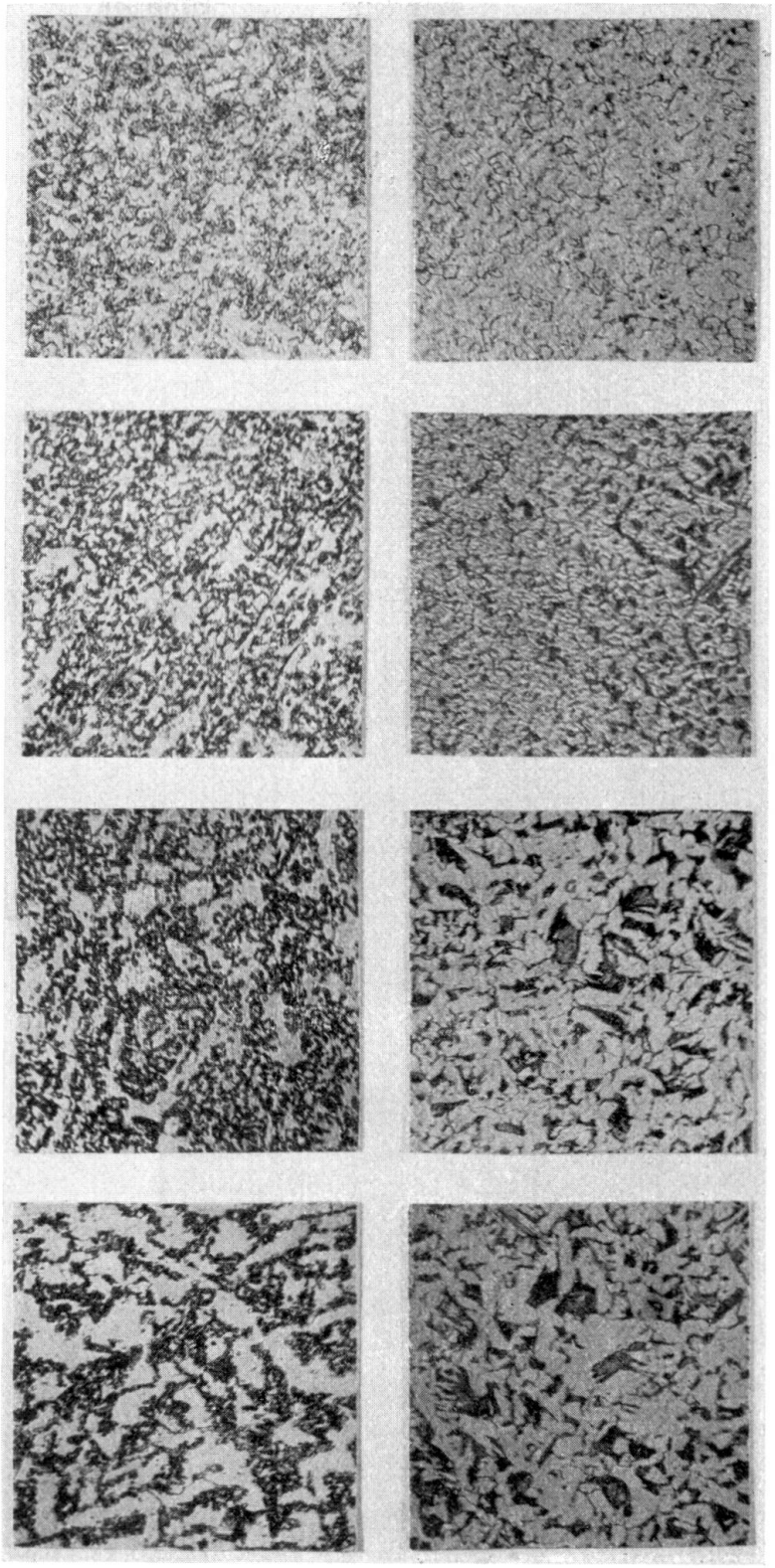


Fig. 4.

Etude micrographique d'un joint soudé.

Acier au carbone 58—65 kg. Electrode: Arcos-Stabilend.

Le mode de répartition des tensions peut se faire par la méthode tensométrique sur modèle réduit ou en grandeur tel qu'il a été effectué par le professeur *Campus* sur les noeuds soudés de la charpente des Instituts de Chimie et de Génie civil (Université de Liége).

L'examen visuel des cordons par un surveillant spécialisé est le premier des moyens de contrôle: les cordons déposés sont poinçonnés par le soudeur d'un

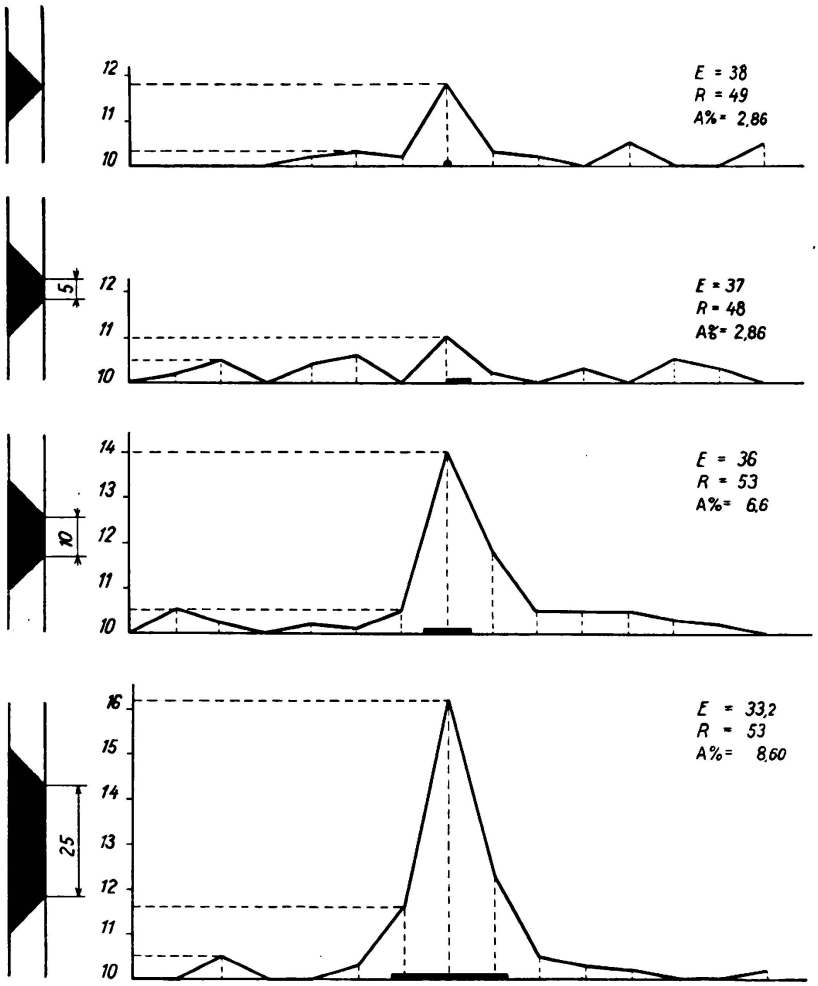


Fig. 5.

Essais de traction sur éprouvettes méplates de 100 mm² de section et de 140 mm de long en faisant varier la quantité de soudure; avec mesure des allongements de rupture de 10 en 10 mm. Acier au carbone 58—65 kg. Electrodes: Arcos-Stabilend. Remarquer la répartition des allongements et le faible allongement total. Une éprouvette témoin en tôle donne 20 %.

numéro les identifiant ce qui le rend responsable de son travail même si les malfaçons n'apparaissent que longtemps après l'exécution. Note en est tenue dans un registre spécial où l'on indique également toutes remarques utiles.

Des sondages à la fraise dans les cordons posés peuvent donner d'utiles résultats tout au début d'une mise en fabrication pour juger des pénétrations, des reprises, etc. Plus tard, ce procédé destructif ne présente plus guère qu'un intérêt secondaire: l'effet moral sur l'ouvrier qui se sent surveillé.

Le contrôle au stéthoscope est inefficace dans les cas d'utilisation envisagés.

Le contrôle magnétographique basé sur l'examen des déformations produites par la soudure sur les lignes de force d'un champ magnétique créé par un aimant ou par la mesure des variations de ce champ, peut donner dans certains cas spéciaux des renseignements précieux, notamment dans l'examen préalable d'éprouvettes avec soudure en bout. L'augmentation de résistance magnétique dans la soudure aux zones déficientes (cassures, soufflures, collages) se marque dans les lignes de force du spectre.

Les métalloscopes licence *Giraudi* donnent des résultats remarquables dans l'examen de pièces de petites dimensions car l'intensité du champ doit être telle qu'elle les porte à saturation; un liquide contenant en suspension des oxydes métalliques magnétiques déversé sur elles, est attiré aux points où le flux se disperse dans l'air, et dessine à leur surface une projection des défauts contenus en profondeur.

Le contrôle par radiométallographies qui consiste à photographier les lignes de soudure à l'aide des rayons X est le seul efficace et rendu pratique à ce jour. L'intensité des rayons doit être graduée en fonction de l'épaisseur des pièces et des dimensions des défauts à déceler. Les appareils Métalix Macro-Radiographiques Philips fixes ou montés sur remorque automobile permettent une pénétration des rayons X de 80 mm dans l'acier, l'intensité électronique étant réglée par rhéostat et la protection des opérateurs absolument assurée (fig. 6, 7, 8 et 9).

II. La soudure par points.

Modalités d'emploi.

La soudure électrique par résistance, systeme par points, n'est guère utilisée à ce jour que dans la construction même de poutres, grilles ou éléments secondaires de la construction des ponts et charpentes. Son emploi prendra cependant de plus en plus d'extension.

La bonne exécution d'un point soudé dépend en tant qu'opération de soudure de 3 conditions: la température de la zone soudante, le temps et la pression exercée sur les pièces à assembler pendant et à la fin de l'opération.

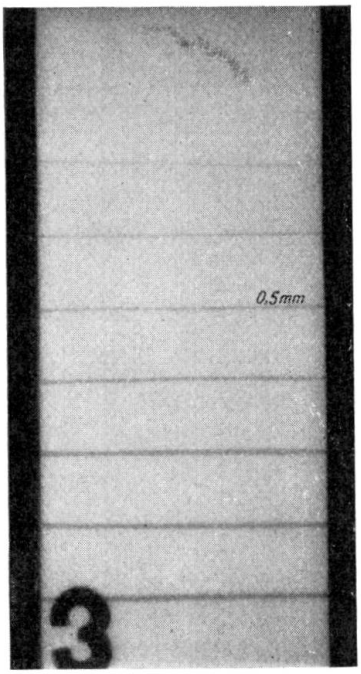
La température du métal à l'endroit de la soudure est difficilement mesurable directement; le temps de soudure doit parfois être extrêmement court ($^1/_{50}{}^2$ de seconde pour les aciers inoxydables 18/8 afin d'éviter certaines transformations chimiques du métal) et variable suivant l'état des pièces; la pression est maintenue constante pour un cas déterminé et réglée par un mécanisme mécanique, pneumatique, hydraulique ou électrique.

Les intensités très élevées agissant pendant des temps très courts avec supression automatique agissant aussitôt après interruption du courant, donnent les résultats pratiques les meilleurs.

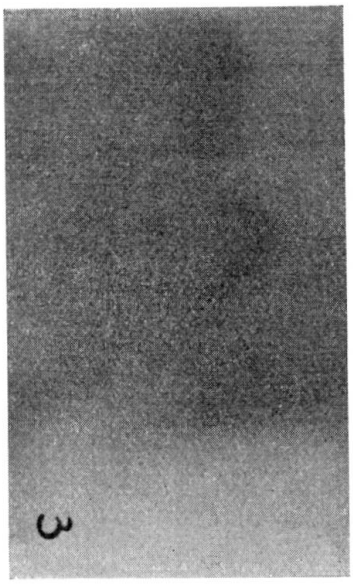
Le contrôle.

Le contrôle de la soudure par des interrupteurs appropriés interrompant le courant au moment convenable donne actuellement des résultats très satisfaisants.

Les interrupteurs à temps constant ne compensent pas les irrégularités dans tous les cas où les résistances varient suivant l'état d'oxydation des pièces et les



Radiophotographie.

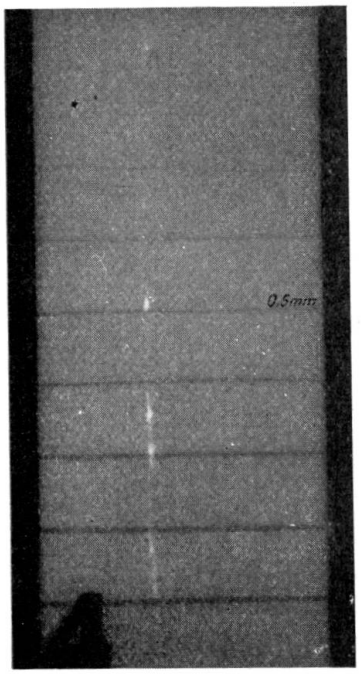


Spectre magnétique.

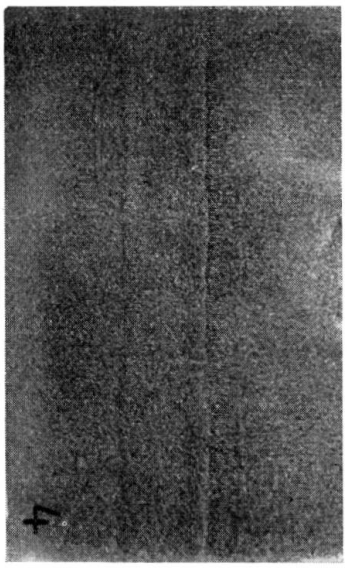
(Exposition: 10 minutes. 70 KV. 4 m A.
Reconnaissance de défauts de 0,1 mm).

Fig. 6.

Joint soudé en V. Epaisseur: 10 mm. Electrodes: Esab. OK. 47 Acier doux.
Soudure saine.



Radiophotographie.

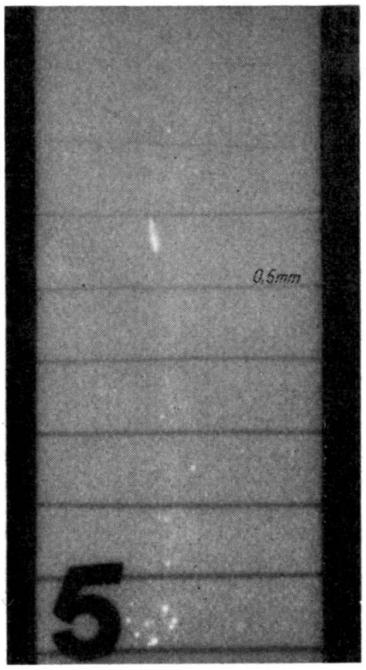


Spectre magnétique.

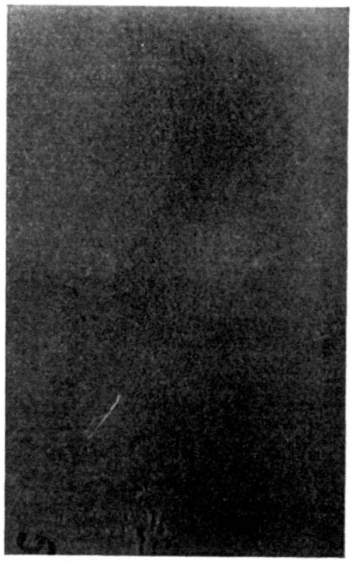
(Exposition: 15 minutes. 70 KV. 4 m A.)

Fig. 7.

Joint soudé en V. Epaisseur: 10 mm. Electrodes: Esab. O.K. 47.
Acier au carbone: 58—65 kg. On remarque une fêlure longitudinale de retrait.
La soudure paraissait parfaite extérieurement.



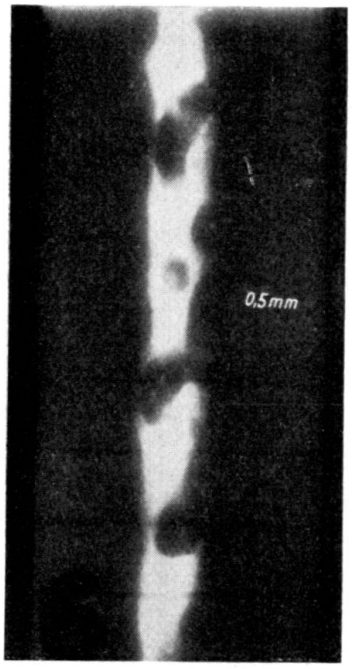
Radiophotographie.
(Exposition: 15 minutes. 70 KV. 4 m A.)



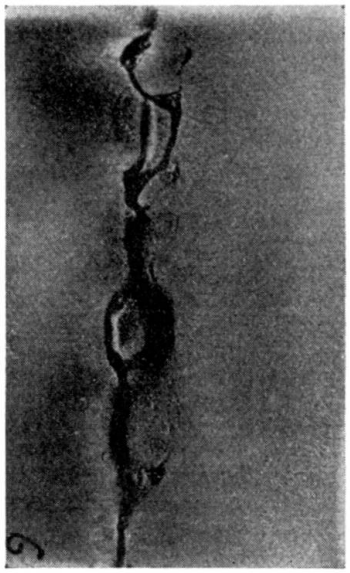
Spectre magnétique.

Fig. 8.

Joint soudé en V. Epaisseur: 10 mm. Electrodes: Arcos-Veloxend.
Porosités de l'ordre de 0,1 mm à 0,2 mm, dues a une intensité de courant exagérée.



Radiophotographie.
(Reconnaissance possible de défauts > 0,3 mm.
Exposition: 4 secondes. 90 KV. 4 m A.)



Spectre magnétique.

Fig. 9.

Joint soudé en V. Epaisseur: 10 mm. Electrodes: Arcos-Veloxend.
On remarque une cavité sur toute la longueur du cordon avec des gouttes métalliques entourées de laitier.

variations d'accostage car ils sont basés sur le principe que la température de soudure restera constante pour deux opérations successives, ce qui n'est vrai que si la force électromotrice induite dans le secondaire est constante et la somme des résistances de contact pièces-électrodes a la même valeur à chaque instant: résultats qui ne sont obtenus que pour des tôles absolument propres avec une résistance à l'accostage et une tension d'alimentation constantes.

Les interrupteurs à intensité minimum constante coupent le courant lorsque l'intensité du courant passant dans la soudure atteint une valeur déterminée. Ils sont d'un réglage délicat et dépendent de la tension d'alimentation.

Les interrupteurs compteurs d'ampères-seconde coupent le courant d'alimentation lorsqu'un nombre déterminé d'ampères-seconde a traversé la machine. On constate que le rapport entre l'intensité passant dans le transformateur et la puissance fournie à la soudure varie constamment et dépend essentiellenent de l'état de la surface des pièces, de la pression réelle et de la variation de celle-ci pendant la soudure.

Les interrupteurs wattmétriques mesurent la puissance réelle fournie à la machine ou une fonction de cette puissance. Il est préférable qu'ils soient installés sur le secondaire et la tension aux électrodes car ils sont ainsi plus précis mais ils demandent un transformateur d'intensité et un branchement compliqué.

Un contrôleur enregistreur et sonore imprime à chaque point de soudure sur une bande de papier, un arc représentant une fonction de la puissance fournie, test de la qualité du point. En cas d'accident, mauvais contacts, conducteurs mal connectés, réglages défectueux, chutes de tension etc., une sonnerie avertit le surveillant et la soudeuse s'arrête jusqu'à ce que les conditions redeviennent normales.

On ne doit utiliser que des pièces à souder propres et autant que possible meulées ou sablées.

Les points soudés.

Les points soudés doivent être examinés au laboratoire par l'analyse micrographique surtout dans le cas d'emploi d'aciers à teneur en cuivre, en nickel ou

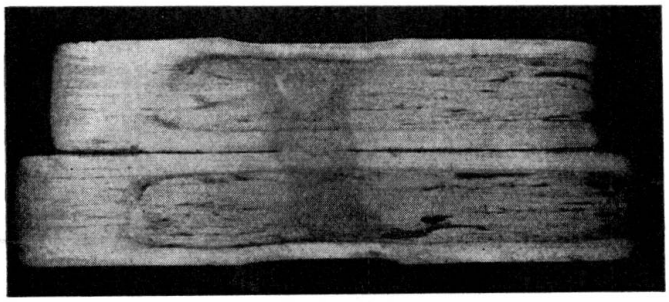
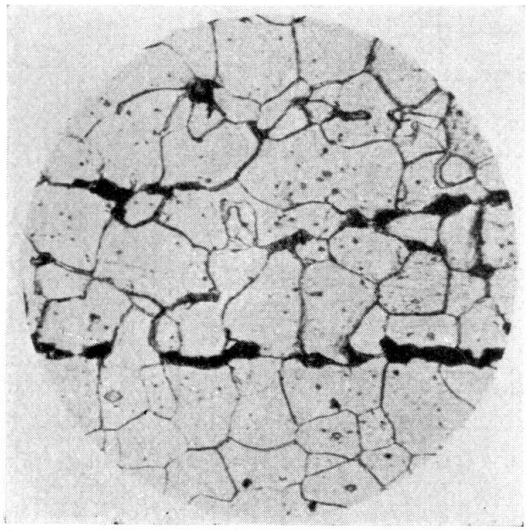


Fig. 10a.

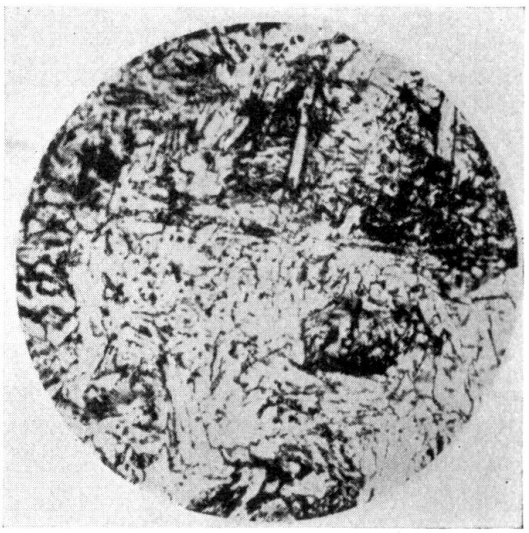
Macrophotographie d'un point soudé. Acier: 42—50 kg.

en chrome. Les impuretés qui se trouvaient à la zone de contact restent englobées dans le métal fondu et s'y concentrent (fig. 10).

Les essais préalables au cisaillement sont nécessaires et l'on peut être assuré avec les appareils modernes munis d'interrupteur wattmétrique d'une constance des résultats. Le temps de soudure étant toujours relativement très court et par



Métal brut.



Métal dans la zone soudée.

Fig. 10 b.

Etude micrographique d'un point soudé. Acier: 42 - 40 kg.

conséquent de bas prix, le nombre des points sera calculé largement afin d'utiliser un taux de travail faible. Il résulte de la pratique que jusqu'à des épaisseurs de l'ordre de deux fois dix millimètres la sécurité de la soudure est du même ordre que celle d'une rivure correspondante.

IIIc 2

Contrôle des ponts et charpentes soudés.

Prüfung der geschweißten Brücken und Hochbauten.

The Testing of Welded Bridges and Structures.

F. Campus,
Professeur à l'Université de Liége, Directeur du Laboratoire d'Essais du Génie Civil.

Les constructions soudées ne nécessitent pas seulement un contrôle de la qualité des soudures. Elles requièrent un contrôle plus attentif de l'acier et de son usinage que les constructions rivées. Cette remarque n'est peut-être pas assez généralement considérée, elle explique beaucoup de difficultés et d'échecs.

Je n'envisage pas seulement la qualité de l'acier telle qu'elle est définie par des essais normaux. Elle doit être réglée par des essais de soudabilité, tant métallographiques que mécaniques, destinés à combiner avantageusement un métal de base et un métal d'apport convenables. Il importe, dans cet examen, de s'inspirer déjà des dispositions particulières de la construction envisagée.

Les formes spéciales sous lesquelles des pièces d'un acier réputé soudable sont mises en oeuvre requièrent une grande attention. La construction soudée n'a pas négligé l'avantage qu'elle pouvait tirer de l'emploi de pièces laminées, poutrelles ou plats, de fortes dimensions ou épaisseurs. Ces pièces sont d'une production métallurgique assez délicate et peuvent, du fait des opérations thermiques et mécaniques auxquelles elles sont soumises pendant leur fabrication, prendre des propriétés inconnues, leur donnant une individualité parfois mauvaise, souvent susceptible. L'application ultérieure de la soudure à ces pièces peut constituer pour elles une excitation défavorable. Il n'est pas rare aussi que les pièces des constructions soudées subissent des préparations adéquates, souvent des découpages au chalumeau, de formes parfois compliquées. Ces opérations suffisent pour provoquer avant soudure des désordres dans les pièces à assembler. Si ces défauts sont importants, ils sont sûrs au point de vue contrôle, la pièce étant condamnée. Plus grave est le défaut minime, susceptible d'être réparé, voire simplement masqué. Mais dans la gamme de ces défauts, pré-ou post-opératoires à la soudure, il peut en exister d'invisibles, sous forme de fissures indécelables. Comment expliquer autrement la formation de fissures visibles qui ne sont parfois décelables que longtemps après l'épreuve et la mise en service d'ouvrages? Elles n'apparaissent nullement sous l'action des charges et ne présentent pas d'apparence de fatigue, mais une forme tout à fait analogue à celle des fissures spontanées envisagées ci-dessus. Il est d'ailleurs général que ces fissures ne soient pas tout à fait instantanées, mais se produisent au bout d'un temps variable après la manipulation génératrice.

Dans les cas dont j'ai eu connaissance, il a été exceptionnel que la fissure se

soit produite dans la soudure. En général, elle s'étendait dans l'acier de base. Dès lors, en quoi le contrôle de la qualité des soudures pourrait-il garantir contre un semblable accident, se produisant parfois de nombreux mois après réception?

On voit que la construction soudée exige des qualités aussi définies des pièces à assembler que des moyens d'assemblage. Procédé de fabrication de l'acier, méthode de laminage, dimensions des pièces, recuit éventuel, autant de points dont l'importance dans une construction est aussi essentielle que celle de la qualité des soudures. L'usinage a tout autant d'importance: découpage, entaillage, perçage, etc. Des cas de fissuration nombreux, parfois retardés, ont été dus à ces opérations, surtout lorsqu'elles créaient ou laissaient subsister des amorces de fissurations. On préférera donc, pour autant que l'on ne puisse éviter ces opérations, des forages aux poinçonnages, des sciages au cisaillage ou le découpage thermique, etc. Pour le moins faut-il meuler ou fraiser les lèvres des coupures, aléser les trous poinçonnés etc., bref ménager le métal autant qu'il est économiquement possible. Enfin, ces conditions: dimensions et formes des pièces élémentaires, façonnage et usinage, sont étroitement liées à la conception complète de la construction. Par cela même, les éléments essentiels de la sécurité et du contrôle résultent, avec leurs importances respectives, de l'établissement du projet. L'emploi de la soudure introduit dans la construction des ponts et charpentes métalliques un caractère de complexité qui constitue une révolution tout à fait analogue à celle du béton armé dans la maçonnerie.

L'analogie avec les particularités du béton armé est réelle à plus d'un point de vue. En ce qui concerne le contrôle, elle est bien propre à éclairer la distinction entre le contrôle de la qualité des soudures et celui des constructions soudées. L'expérience relativement ancienne du béton armé est utile pour éviter les illusions et les outrances. On pratique depuis longtemps le contrôle de la qualité des ciments et des bétons. Mais le contrôle des constructions en béton armé est un point de vue plus complexe. On peut paraphraser à son sujet à peu près tout ce qui est énoncé ci-dessus pour les constructions soudées et l'état pratique actuel du contrôle des constructions en béton armé peut utilement inspirer les tendances autant que modérer les exigences en matière de constructions soudées.

Le contrôle de la qualité des soudures constitue néanmoins un élément primordial de la sécurité des ponts et charpentes utilisant ce mode d'assemblage. On a vu, dans la première partie, les méthodes dont on dispose. Leur application pratique aux ponts et charpentes souffre de sérieuses difficultés, provenant d'une certaine complication, et même des impossibilités dans de nombreux cas. On doit admettre que la soudure dans les ponts et charpentes ne peut faire l'objet d'un contrôle aussi parfait que celui qui peut être appliqué à d'autres objets plus simples, tels que des réservoirs, des pièces de dimensions modérées produites en série, des joints de rails, certaines constructions spéciales mécaniques, etc. Cette énumération suggère d'ailleurs qu'un tel contrôle n'est pas aussi nécessaire pour la charpente ou encore, si l'on préfère, que la conception économique de la soudure des ponts et charpentes doit s'inspirer de l'idée que le contrôle n'est pas absolu, mais relatif et imparfait. La sagesse consiste donc à rechercher et à assurer la sécurité nonobstant cette imperfection et cela est parfaitement possible. Par une telle conception, qui exige une étude spéciale des formes cons-

tructives et des assemblages, on peut atteindre le résultat que, malgré son imperfection, ce n'est pas la soudure qui constitue l'élément le moins sûr de la construction. L'observation précédente, relative à la fréquence plus grande des fissures dans le métal de base que dans le métal d'apport, donne à ce principe toute sa signification en même temps que sa consécration pratique. On peut l'énoncer sous une forme concise: la rupture ne doit jamais se produire dans l'assemblage. Cela est parfaitement réalisable et réalisé, même dans les essais dynamiques de constructions bien conçues. Or, on ne peut pas obtenir un pareil résultat par la rivure.

Si une telle conception est suffisante, ce que l'épreuve du temps doit décider, et provisoirement admissible, il reste utile et nécessaire d'exiger, au point de vue de la qualité des soudures, le maximum de garanties, par un système qui n'est pas loin de s'apparenter à celui en usage en béton armé et qui, à vrai dire, est déjà d'une précision plus grande.

Ces méthodes sont assez généralement appliquées, d'une manière qui ne diffère, d'un pays ou d'une construction à l'autre, que par des modalités. Elles consistent en un ensemble de précautions, fixées par un cahier des charges ou un règlement, et qui sont destinées à créer un ensemble de garanties pratiquement effectives et suffisantes. Pour fixer les idées, j'énoncerai sommairement les prescriptions appliquées à des charpentes dont j'ai dirigé la construction en Belgique en 1932, 1933 et 1934 et dont les bases figuraient dans un cahier des charges rédigé au début de 1932, premier document officiel de l'espèce en Belgique. Un règlement édité ultérieurement en Belgique n'en diffère guère.

Les conditions préalables sont une conception conformé au principe énoncé plus haut quant à la sécurité des assemblages. Ensuite vient le contrôle de la qualité du métal d'apport. Dans l'hypothèse, réalisée dans le cas envisagé, d'emploi d'acier spécial, ce contrôle doit constituer en même temps une véritable épreuve de soudabilité. Les aciers employés étaient de la nuance 42/50 (type Etat Belge) et 58/65. Pour ce dernier, des examens métallographiques de soudabilité furent effectués. Les essais de réception des électrodes comportaient:

1° Un essai de traction sur éprouvettes cylindriques de 10 mm de diamètre entièrement en métal d'apport déposé, comportant la détermination de la résistance à la rupture, de la limite élastique apparente, de l'allongement mesuré entre repères écartés de 50 mm et de la striction.

2° Un essai de résilience sur éprouvette Mesnager, petit modèle, à entaille en pleine masse de métal d'apport déposé. En variante, des essais furent effectués aussi sur des éprouvettes comportant une soudure en V dans laquelle la rainure était disposée soit dans le sommet du V, soit à l'opposé, soit suivant la bissectrice du V. Le métal de base était en acier 42/50 ou en acier 58/65. Ces essais, moins réguliers, font recommander l'éprouvette dans laquelle la rainure est taillée dans un volume suffisant de métal d'apport, à distance suffisante du métal de base. L'éprouvette à simple soudure en V peut passer pour une épreuve de soudabilité, mais il faut bien définir la position de la rainure par rapport au volume très réduit du métal d'apport.

3° Un essai de pliage d'une plaque en acier 42/50 de 10 mm d'épaisseur après façonnage, de 200 mm de longueur et de 40 à 70 mm (en moyenne 50) de largeur, comportant une soudure en V, pliée sur un mandrin de 30 mm de

diamètre, jusqu'à ce que les deux branches droites soient parallèles (180°), la soudure étant bien dans l'axe du pliage et le sommet du V au contact du mandrin.

Ce dernier essai pourrait être supprimé et réservé uniquement à l'agréation des soudeurs.

Les essais d'agréation des soudeurs qualifiés et entraînés comportaient:

1° Un essai de pliage comme ci-dessus et, pour le cas d'emploi d'acier 58/65, un essai analogue, mais effectué sur un mandrin de 75 mm de diamètre au lieu de 30 mm. Les éprouvettes peuvent être soudées soit à plat horizontalement, soit verticalement, selon le genre de travaux à effectuer.

2° Un essai de pliage assez particulier, effectué sur une éprouvette en croix analogue à l'éprouvette du règlement allemand. La croix a des branches de 150 mm de longueur totale, de 100 mm de largeur et de 15 mm d'épaisseur. Une branche est formée de 2 pièces soudées l'une à l'autre par des soudures d'angle, ou en V ou en K, selon les cas. Cette croix est ensuite aplatie sous une presse suivant la diagonale, d'abord jusqu'à ce que les branches soient parallèles et écartées de 30 mm, ensuite de 15 mm seulement. L'acier de base était l'acier 42/50. Cet essai est relativement sévère, surtout pour les soudures en V ou en K. Les soudures de ces croix étaient, selon les cas, exécutées horizontalement ou verticalement.

Après agréation, les soudeurs étaient périodiquement astreints à des essais de contrôle, consistant en confection d'éprouvettes ordinaires de pliage, selon 1°. Il est recommandable, pour toutes ces éprouvettes de pliage, surtout pour l'agréation des soudeurs, de procéder à un contrôle métallographique, ou à une série d'essais de dureté, au duromètre *Brinell* ou *Rockwell*, ou à un examen par sciage ou roentgenographique. L'essai de dureté est utile notamment pour vérifier la qualité du métal de base et déceler un traitement thermique éventuel des éprouvettes. L'examen par sciage ou aux rayons X décèle la régularité et la qualité de détail de la soudure. Les soudeurs étant agréés, on organisait une identification des soudures de la construction par la tenue d'un registre, définissant avec précision les soudures effectuées par les différents soudeurs pendant la durée du travail. Toutes les observations quelconques étaient notées en même temps. Le contrôle ampèremétrique de l'intensité du courant de soudure, effectué de temps en temps, peut être étendu autant qu'on le juge utile. Il est incontestable que ces méthodes de réception des matériaux, d'agréation des soudeurs et de surveillance de l'exécution, quoiqu'elles ne procurent aucune garantie absolue, sont cependant supérieures aux méthodes usitées pour le contrôle des ouvrages en béton armé. Il y a belle lurette que les bétonneurs ne sont plus soumis à agréation. Même la vibration du béton n'est pas entourée de garanties personnelles analogues à celles réclamées pour la soudure des ponts et charpentes.

Les soudures étant effectuées, de multiples contrôles sont possibles. Le plus simple est celui des dimensions des cordons d'angle, qui se font au moyen de gabarits, réunis de manière commode en trousseaux. Pour les soudures en V et en X, le façonnage même des pièces, vérifiées avant soudure, détermine les dimensions. Il y a lieu d'examiner s'il n'y a pas eu de déplacements relatifs ou de déformations des pièces assemblées.

Ensuite, il y a l'examen d'aspect de la soudure, assez fallacieux si l'on ne connaît pas les particularités du soudeur. Cependant, certains points sont à consi-

dérer spécialement: les cratères, les reprises, éventuellement les entailles dans le métal de base. Le martelage pour sondage au son, même aidé d'un stethoscope, est sans efficacité, sauf défaut grave visible à l'oeil nu.

Les méthodes de contrôle non destructives: magnétoscopiques, radiographiques, etc. paraissent d'application souvent incommode et non généralisable sur le chantier et même à l'atelier de charpente. Leur application dans la mesure du possible est certes souhaitable. Le rapport de *M. Berthold* ouvre des perspectives intéressantes, mais il implique une organisation qui n'est pas conforme aux habitudes de tous les pays et dont l'adoption générale est problématique. L'examen magnétoscopique paraît fallacieux. La méthode proposée par *Schmuckler* des fraisages de contrôle est assez pratique mais de signification limitée. Elle a été appliquée aux constructions auxquelles j'ai fait allusion plus haut. Comme il s'agissait d'acier de base 58/65 et de soudure résistante, le fraisage des cordons était difficile. Aussi les opérations étaient elles relativement lentes et coûteuses. Il en a été effectué au total 73 pour 595 tonnes de charpentes (1 forage par 8 tonnes). Sur ces 73 sondages, 5 ont présenté des défauts importants (trous de dimensions appréciables dans le fond des soudures d'angle), 9 des défauts légers (bulles de faibles dimensions). Quelques fissures ont été constatées à l'atelier dans des soudures latérales de jonction de plats à des ailes de poutrelles, par temps très froid, ainsi qu'à quelques soudures sans importance d'extrémités de poutrelles de roulement.

Ce contrôle déjà assez poussé tant au chantier qu'à l'atelier, qui n'est pas usuel en Belgique, a établi que, en dépit des précautions prises pour la garantie des matériaux et de la main d'oeuvre, les soudures présentaient un pourcentage modéré d'imperfections. Ceci justifie les opinions énoncées précédemment sur la nécessité d'en tenir compte dans la conception des constructions soudées, pour assurer une sécurité largement suffisante.

Ainsi qu'il a été dit en commençant, l'acier de base peut comporter autant de défauts que la soudure, ce que révèlent les empreintes *Baumann*, les macrographies et micrographies et aussi les accidents survenus aux constructions soudées, doublement de tôles, tensions internes, écrouissages locaux, amorces de fissurations, surchauffes, etc. Il n'est pas mauvais que le constructeur ait suffisamment à l'esprit l'idée qu'il ne dispose pas de matières parfaites pour ses travaux. Cette notion est supérieure à celle d'une fallacieuse perfection, impossible à réaliser. Elle tempère aussi la notion délicate et ambigue de l'adaptation. Elle exige pour la conception et l'exécution des constructions soudées des techniciens de haute formation et de grande valeur personnelle et professionnelle. Il est d'ailleurs certain que la rigueur d'un contrôle absolu mais nécessairement a posteriori doit être modérée, dans la pratique des ponts et charpentes, par la notion d'une certaine tolérance, eu égard raisonnablement aux intérêts en cause. C'est ce qui ressort des remarques de *M. Berthold* au sujet du contrôle roentgenographique. Pour une construction sûre et économique, idéal de l'ingénieur, il convient de se préoccuper du contrôle des soudures suffisamment mais sans excès. Le contrôle le plus utile sera sans doutes celui du comportement des ouvrages en service, notamment des ponts. Il peut comprendre un examen périodique des soudures, par tel moyen que l'on voudra, analogue à l'examen périodique des rivets.

IIIc 3

Contrôle de la qualité des soudures.

Prüfung der Güte der Schweißungen.

Quality Control in Welding.

A. Goelzer,
Directeur de la Société Secrom, Paris.

Pour la bonne exécution des constructions soudées le contrôle de la qualité des soudures est essentiel. On se trouve en effet en présence d'un procédé d'assemblage relativement nouveau qui doit se défendre lui-même contre les défaillances possibles.

Les cahiers des charges et règlements sur la soudure prescrivent tous des épreuves qui ont pour but de contrôler la qualité des soudures d'une manière aussi commode que possible.

Si on remarque que la qualité d'une soudure dépend d'une part, de la qualité intrinsèque du métal d'apport et d'autre part, de l'habileté de l'opérateur, on est amené à effectuer, comme l'a prescrit le règlement français, les épreuves suivantes:

a) *Epreuves sur le métal d'apport.*

Ces épreuves sont des épreuves de traction et de résilience. Les éprouvettes sont obtenues à partir du métal des électrodes fondu dans un moule en acier, par exemple.

Les épreuves de traction doivent donner les résultats suivants:

	Métal de base	
	Ac 42	Ac 54
Résistance minima à la traction	38 kg/mm²	48 kg/mm²
Allongement min. de rupture mesuré entre repères . . .	15 %	12 %

La résilience ne doit pas être inférieure à 8 kgm/cm².

b) *Epreuves sur assemblages soudés.*

Ces épreuves contrôlent en réalité à la fois la qualité du métal d'apport et la bonne exécution des soudures. Elles comportent des épreuves de traction et des épreuves de pliage sur des éprouvettes obtenues en soudant des fers plats bout à bout.

Pour les épreuves de traction, on devra obtenir 42 kg/mm² si le métal de base est de l'acier 42 et 54 kg/mm² si le métal de base est de l'acier 54. Les cassures qui se présenteront dans la soudure ne devront présenter ni soufflures, ni zônes noirâtres, ni inclusion de laitier ou de scories.

L'épreuve de pliage se fait sur deux appuis cylindriques de 100 mm de diamètre dont les centres sont distants de 150 mm, la soudure étant placée à égale distance des appuis et l'ouverture du V étant tournée vers le bas. Au moyen d'un dégorgeoir appliqué au droit de la soudure, on fait agir une presse jusqu'à ce que les deux branches du plat soudé fassent un angle de 60°. Il ne doit se produire aucune crique ou fissure dans la soudure et dans le métal de base sur la face tendue.

On peut rattacher à ces diverses méthodes de contrôle les examens prévus pour l'acceptation des ouvriers soudeurs. D'ailleurs au point de vue pratique, la meilleure garantie que l'on puisse avoir est de n'employer que des ouvriers possédant une instruction suffisante et dont on vérifie les aptitudes par des examens périodiques.

En dehors du point de vue en quelque sorte officiel que nous venons d'examiner, on a cherché à mettre au point diverses méthodes directes d'investigation. Ici le but est de chercher à identifier les défauts qui peuvent se produire dans l'opération métallurgique en miniature que représente la soudure. Les principales méthodes sont les suivantes[1]:

Examen radiographique.

La radiographie des soudures s'effectue soit au moyen du radium, soit au moyen du radon.

Rappelons que le radium se transforme en radon en émettant des rayons α constitués par des atomes d'hélium à charge positive double se déplaçant très rapidement. Le radon se transforme d'ailleurs à son tour en radium B, puis en radium C, en émettant des rayons β et des rayons γ. Les rayons β sont composés d'électrons très rapides. Les rayons très rapides α et β sont dangereux physiologiquement et inutilisables pour la radiographie. On empêche leur passage en utilisant des capsules en cuivre, argent ou platine, qui laissent passer les rayons γ.

La radiographie permet par exemple de photographier les soudures des corps creux en plaçant une capsule à l'intérieur de la pièce.

Examen magnétographique.

L'examen magnétographique dû à *M. Roux,* Professeur à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, est basé sur le principe suivant:

Si l'on place sur un aimant une feuille de tôle recouverte d'une feuille de papier et qu'on projette ensuite de la limaille de fer sur le papier, on obtiendra un spectre magnétique dont la physionomie est bien connue.

Si l'on remplace la feuille de tôle par deux tôles convenablement soudées, c'est-à-dire sans aucune soufflure ni défaut quelconque, le spectre laisse

[1] Voir «La soudure à l'arc électrique et la soudure à l'hydrogène atomique» par *Maurice* Lebrun, Ingénieur A. & M., Docteur de l'Université de Paris, Lauréat de l'Institut.

apparaître la ligne de soudure parceque la perméabilité magnétique du métal d'apport est différente de celle de la tôle, en raison de la surépaisseur de la soudure. Si la soudure est bien faite le spectre de la ligne de soudure est régulier et ne présente aucune anomalie.

Les divers défauts bien connus des soudures donnent lieu à des images caractéristiques. Dans le cas d'un manque de pénétration, par exemple, défaut assez commun, on voit une ligne noire qui est due à l'augmentation de la densité des lignes de force dans les parties les plus minces. Dans le cas également d'un manque complet de la soudure au milieu de l'épaisseur à souder, on voit une bande noire accentuée.

La méthode magnétographique permet l'examen de soudures sur place, à la condition que la masse des pièces à examiner ne soit pas trop forte (on ne peut pas, par exemple, examiner la coque d'un grand navire). Pour conserver la trace des examens ainsi réalisés, on emploie des feuilles de papier transparent recouvertes d'une solution gommée sur laquelle on projette la limaille. On peut se servir de ce procédé dans toutes les positions. Des appareils portatifs ont été mis au point pour la vérification sur place des pièces soudées.

Examen magnéto-acoustique.

La méthode Roux a été complétée par l'adjonction d'un appareil ausculteur qui est peut être susceptible de donner des résultats intéressants.

Elle consiste à introduire dans le champ magnétique créé par un électro-aimant, sur une tôle soudée, une petite bobine animée d'un mouvement périodique. Cette bobine devient le siège d'une tension induite dont la valeur est proportionnelle à la variation du champ magnétique le long de la soudure au-dessus de laquelle on la déplace.

Les tensions induites produisent des ondes harmoniques qui sont renforcées dans un amplificateur semblable à ceux utilisés en T.S.F. Elles sont ensuite décelées dans un écouteur qu'on applique aux oreilles.

L'inconvénient de l'examen magnéto-acoustique est d'introduire un facteur personnel dans l'appréciation des défauts éventuels des soudures.

Examen direct par sondage à la fraise.

Cette méthode consiste à creuser au moyen d'une fraise spéciale une petite cavité dont on soumet ensuite la surface à un examen macrographique. La fraiseuse Schmuckler a été créée spécialement pour ce genre d'investigation.

L'avantage de ce procédé est d'exercer un contrôle direct sans contestation possible. Son inconvénient est de ne permettre que des sondages.

Nous citerons également deux méthodes pratiques applicables à la soudure à l'arc électrique:

Contrôle des caractéristiques électriques de l'arc.

Le défaut commun des méthodes que nous avons décrites est d'être des méthodes de contrôle à posteriori.

On peut exercer en cours de soudure un contrôle d'une au moins des caractéristiques de l'arc, le débit en ampères. Le contrôle de la différence de potentiel aux bornes de l'arc ne présente pas d'intérêt.

Sans aller jusqu'à l'emploi d'un ampèremètre enregistreur, il existe des appareils mobiles, ne nécessitant aucun démontage du circuit électrique et permettant de vérifier le débit à tout instant. Ils fonctionnent aussi bien sur le courant continu que sur le courant alternatif.

Si le débit correspond au diamètre de l'électrode, on est sûr que tout le métal déposé sera soudé. Il y aura peut être des solutions de continuité dans la soudure, mais c'est là un défaut qui sera facilement décelé par un essai hydraulique.

Nous sommes passés, avec cette méthode, du contrôle du métal déposé au contrôle de l'ouvrier qui dépose le métal. Ce contrôle peut être complété par celui du temps pendant lequel le soudeur travaille.

Contrôle du temps de soudure.

On introduit dans le circuit de soudure, par une dérivation, une pendule électrique qui enregistre exactement le temps pendant lequel l'ouvrier a travaillé. Ce temps est évalué en centièmes d'heure. La pendule est freinée pendant les périodes où le soudeur ne travaille pas et même pendant les mises en court-circuit de l'électrode.

Parmi les épreuves de contrôle que nous avons citées, on a envisagé seulement la résistance à la rupture sous des efforts statiques et la mesure de la résilience. Depuis un certain temps on envisage aussi, sur une grande échelle, les essais à la fatigue sur éprouvettes soudées. Ces essais permettent de mettre en évidence les effets défavorables qui peuvent être produits par la soudure au point de vue de la résistance à la fatigue.

Des recherches systématiques faites par *M. Dutilleul,* Ingénieur au Génie Maritime, ont montré que toutes les fois qu'il y avait réduction de la résistance à la fatigue des soudures par rapport à la tôle saine, cela provenait à peu près exclusivement de soufflures existant dans les soudures, c'est-à-dire de leur porosité.

On a quelquefois tendance à considérer la résistance à la fatigue comme un critérium absolu. Il semble qu'elle soit surtout intéressante dans le cas de pièces soumises réellement en service à des efforts alternés, indéfiniment répétés, comme c'est le cas en aviation et dans les pièces de mécanique. Mais en ce qui concerne la construction courante, la valeur des essais à la fatigue est très discutable. On peut d'ailleurs remarquer à ce sujet que, très souvent, la résistance à la fatigue et la résilience varient en sens inverse.

IIIc 4

Le contrôle des soudures à l'atelier.

Werkstattprüfung der Schweißung.

Workshop Control of Welding.

W. Heigh,
Welding Superintendent, Babcock & Wilcox, LTD., Glasgow.

En principe, lorsque les électrodes utilisées possèdent les qualités requises, le contrôle des soudures se réduit au contrôle des soudeurs.

Les méthodes de soudage doivent être valables pour toutes les conditions qui peuvent se présenter; lorsque les méthodes choisies sont éprouvées et qu'elles ont donné entière satisfaction, l'exécution des soudures ne doit plus présenter aucune difficulté pour autant que le soudeur soit maître de son art.

Il est intéressant de faire remarquer qu'une méthode éprouvée permet d'obtenir des soudures très régulières et d'augmenter la rapidité de soudage. Les raisons en sont assez évidentes. Lorsque le soudeur connaît exactement son travail il perd beaucoup moins de temps à étudier comment il doit l'effectuer.

Dans chaque opération de soudage, le point de beaucoup le plus important est la première passe, qu'il s'agisse de soudures d'angle ou de soudures bout à bout. L'exécution de la première passe exige une beaucoup plus grande habileté que l'exécution des passes suivantes, quelle que soit la position (horizontale, verticale ou au plafond). Les défauts que l'on constate le plus fréquemment dans la première passe sont le manque de pénétration et la fissuration. L'habileté du soudeur peut jusqu'à un certain point empêcher la formation des fissures.

En général, il semble bon d'enseigner au soudeur les moyens d'éviter toute inclusion de scories et toute mauvaise fusion du métal d'apport. A cet effet il faut choisir des méthodes appropriées.

Pour éprouver le degré d'habileté d'un soudeur le mieux est de passer une soudure bout à bout aux rayons X et de graver à l'acide différentes coupes d'une soudure quelconque que l'on montrera ensuite au soudeur.

La valeur de ces deux méthodes, qui consistent à montrer au soudeur les erreurs de son travail, dépasse de beaucoup celle de toutes les autres car le soudeur a ainsi sous les yeux une preuve matérielle de ses erreurs. Des séries de chiffres, telles que celles fournies par les essais mécaniques, n'ont absolument aucune signification pour le soudeur, du moins à l'heure actuelle. La seule autre méthode qui pourrait encore rendre quelques services consisterait à éprouver une soudure jusqu'à rupture, pour en montrer les pièces au soudeur avec toutes les explications nécessaires. Cependant, ces explications entraînent sou-

vent de la confusion et même un observateur expérimenté ne remarque pas toujours les inclusions de scories. Les radiographies et les gravures à l'acide convaincront parfaitement le soudeur de ses erreurs.

Il faut donner au soudeur une formation complète, basée sur une méthode standardisée, passant progressivement du soudage horizontal au soudage au plafond; on fera finalement effectuer, dans une position donnée, des soudures bout-à-bout et des soudures d'angle sur un tuyau de petit diamètre. On constate que les résultats obtenus grâce à cette methode sont toujours excellents. Nous avons observé dans une usine qui occupe 130 soudeurs que les erreurs commises le sont par des soudeurs qui ne conviennent pas du tout à ce genre de travail et qui, par le fait même, doivent être congédiés.

Ces gens là sont incapables de voir, tout au moins d'une façon intelligente, le travail qu'ils effectuent. Il faut peut-être en chercher la raison dans une certaine achromatopsie ou dans un manque d'intelligence.

Les résultats obtenus avec soudures effectuées verticalement et au plafond ont toujours été conformes aux règlements concernant les classes correspondantes d'électrodes et les différents types de joints. Les écarts obtenus au cours des essais semblent devoir être attribués à l'emploi de différentes classes d'électrodes.

Les méthodes que nous venons de décrire brièvement, sont employées pour la formation de soudeurs destinés à la construction de réservoirs et de tuyaux soumis en service à des pressions allant jusqu'à 1000 livres par pouce carré; on a cependant constaté que les soudeurs possèdant une formation complète acquerraient avec le temps une très grande habileté qui leur permettait d'exécuter très rapidement des soudures parfaites, même dans d'autres domaines d'application de la soudure.

IIIc 5

Le contrôle des soudures.

Über die Prüfung von Schweißnähten.

The Testing of Welds.

Dr. Ing. habil. A. Matting,
Professor an der Technischen Hochschule Hannover.

A côté d'une surveillance suivie du processus de soudage, un contrôle des soudures terminées est indispensable à cause du rôle très important que joue le soudeur lui-même. En outre il faut faire subir aux soudeurs des épreuves à intervalles de temps réguliers (cf. par ex. DIN 4100). Le contrôle des soudures doit être rapide et simple tout en permettant de conclure avec certitude.

L'essai de pliage est très simple et l'on adopte en Allemagne la disposition représentée aux fig. 1, 2 et 3. Sa valeur scientifique est très discutée.[1] Cet essai peut être fortement modifié (pliage à chaud, pliage après trempe, etc.) ce qui peut sensiblement influencer les valeurs obtenues. Malgré toutes les critiques, il est principalement employé pour le contrôle à l'atelier. Il ne permet cependant pas de tirer des conclusions suffisantes pour les soudures importantes.[2]

L'essai de traction joue un rôle très important au laboratoire. Il existe différentes formes d'éprouvettes; la fig. 4 montre les plus usuelles pour les soudures bout à bout. Dans la barre ronde avec entaille la rupture se produit dans la soudure. Cet essai sert principalement au contrôle du matériau. La barre prismatique sert au contrôle du travail car la rupture peut se produire dans la zone de transition ou dans le métal de base. La détermination de la limite d'écoulement et de l'allongement est difficile et inexacte.

L'éprouvette en forme de croix s'est introduite dans la construction métallique car elle permet le contrôle des soudures d'angle (fig. 5). La norme DIN 4100 donne tous les renseignements utiles.

On attribue de plus en plus d'importance aux essais d'endurance à la flexion et à la traction répétées. Une forme adéquate, des soudures sans faute et des transitions douces du métal de base au métal d'apport[3] permettent d'atteindre et même de dépasser 15 kg/mm^2. Des assemblages soudés bien exécutés sont en tous cas toujours égaux et même souvent supérieurs aux assemblages rivés.[4] Les dimensions des éprouvettes pour essais d'endurance ne sont pas encore normalisées.

---

[1] *G. Fiek* et *A. Matting:* Autogene Metallbearbeitung 27 (1934), fasc. 4, p. 61.

[2] *A. Matting* et *H. Otte:* Autogene Metallbearbeitung 29 (1936), fasc. 19, p. 289.

[3] *A. Matting* et *G. Oldenburg:* Elektroschweißung 7 (1936), fasc. 6, p. 108.

[4] *O. Kommerell:* „Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten", IIe partie: Vollwandige Eisenbahnbrücken. Edition W. Ernst & fils. Berlin 1936.

Les essais de dureté servent principalement à l'auscultation des soudures appliquées. L'essai de résilience (fig. 6) n'est utilisé en construction métallique, d'après la norme DIN 1913, que pour le contrôle des électrodes destinées à l'exécution d'assemblages fortement sollicités. Cet essai s'est implanté comme contrôle de réception des métaux d'apport. En général on atteint sans difficultés les valeurs exigées de 5 à 7 kgm/cm².[5]

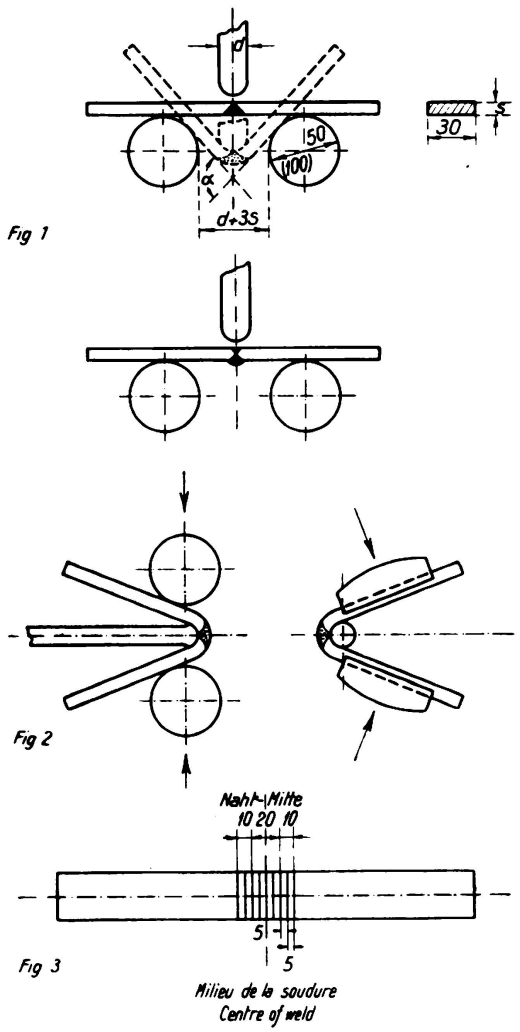


Fig. 1—3,
L'essai de pliage d'après la norme Din-Vornorm DVM A 121.

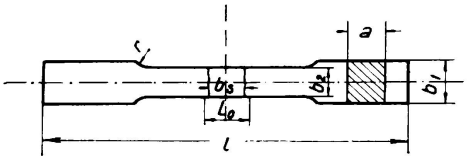
Pour le contrôle des électrodes on a introduit, à côté des essais mécaniques, un essai d'adhérence (fig. 7) qui indique si les électrodes sont utilisables aussi dans des passes difficiles. Les baguettes pour la soudure à gaz et les électrodes non enrobées donnent en général une bonne adhérence. L'adhérence peut décroître avec la grandeur du pourcentage de carbone. Il est difficile d'obtenir une bonne adhérence avec des électrodes enrobées et spécialement avec des électrodes fortement enrobées, quoiqu'il existe sur le marché des produits tout-à-fait au point. Le contrôle de l'adhérence des électrodes enrobées se fait, d'après la norme DIN 1913, à l'aide d'une soudure d'angle verticale dont on effectue une passe vers le bas puis une demi-passe vers le haut. Cet essai permet en même temps de déterminer le comportement des électrodes dans un soudage au plafond.

Les essais sur éprouvettes constituées uniquement de métal d'apport ont été assez peu utilisés jusqu'à présent.

La détermination de la déformabilité sur des éprouvettes soudées est difficile et ne donne pas de résultats satisfaisants. On étudie actuellement la possibilité de mesurer les allongements sur des éprouvettes en forme de croix.[6] Dans l'essai d'étirement[7] on se sert d'une barre avec soudure longitudinale (fig. 8). La soudure représente le 30 % de la section totale. L'éprouvette est étirée dans une machine de traction jusqu'à ce que la capacité d'allongement de la soudure soit détruite. Il est ainsi très facile de déterminer la capacité d'allongement des différentes sortes d'électrodes, l'influence du métal de base et les effets du procédé de soudage. Les éprouvettes sans bourrelet donnent toujours un allongement de 2 à 3 % plus grand. Ce genre d'éprouvettes ne s'est pas généralisé.

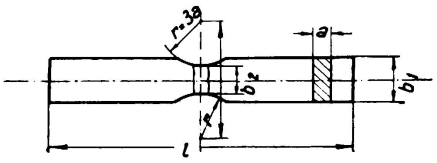
[5] *P. Bardtke* et *A. Matting:* Autog. Metallbearb. 26 (1933), fasc. 18, p. 279 et fasc. 19, p. 290.
[6] *H. Blomberg:* Elektroschweißung 6 (1935), fasc. 4, p. 61.
[7] *A. Matting:* Elektroschweißung 7 (1936), fasc. 3, p. 53.

Le contrôle des soudeurs et des assemblages soudés peut se faire sur des éprouvettes simples au moyen de l'essai d'écartement ou de l'essai de pliage (fig. 9). Nous n'avons pas besoin de donner à ce sujet de plus amples explications. Souvent on découpe, dans les pièces en exécution, des éprouvettes que l'on soumet à un essai approprié.



épaisseur a	10 [1] à 25	de 25 à 35	de 35 à 45
Longueur de l'éprouvette l	250	300	350
Longueur entre repères L_0	doit être égale à la largeur de la soudure $b_s + 5$ à 10 mm		
b_1	30	35	40
b_2	20	25	30
r	15	20	25

[1] Pour a = 6 mm il faut employer la barre de la DVL.



épaisseur a	6	8	10	12	14	16	18	20
Longueur de l'éprouvette l	250	250	250	250	250	250	250	250
b_1	18	24	30	36	42	48	54	60
b_2	12	16	20	24	28	32	36	40
r	18	24	30	36	42	48	54	60

Fig. 4.

Les éprouvettes employées pour l'essai de traction d'après la norme Din-Vornorm DVM A 120.

Il n'existe aucune relation numérique entre les différentes méthodes d'essai des assemblages soudés, sauf dans les aciers au carbone entre la résistance, l'allongement et la dureté. Le quotient de la résistance à la rupture et du nombre de dureté n'est pas ici 0,34 mais 0,29—0,32.[8] L'essai de résilience ne dépend que de la structure, on ne peut le comparer directement ni à l'allongement à la rupture ni à la résistance à la fatigue. De même il n'existe aucune relation parfaite entre la résistance à la fatigue d'une part et la résistance à la traction, la limite d'écoulement ou l'allongement d'autre part. Il est impossible d'éviter les essais spéciaux si l'on veut connaître toutes les propriétés intéressantes d'un assemblage.

Les auscultations macroscopiques (fig. 10) sont tout-à-fait appropriées au contrôle de la pénétration et de la porosité ainsi qu'à la détermination des inclusions. Les photographies microscopiques (fig. 11) complètent ces auscultations et permettent de découvrir les corps étrangers. On attribue actuellement

[8] *A. Matting* et *H. Koch:* Elektroschweißung 5 (1934), fasc. 7, p. 127.

une grande importance au comportement des assemblages soudées vis-à-vis des agents corrosifs.[9]

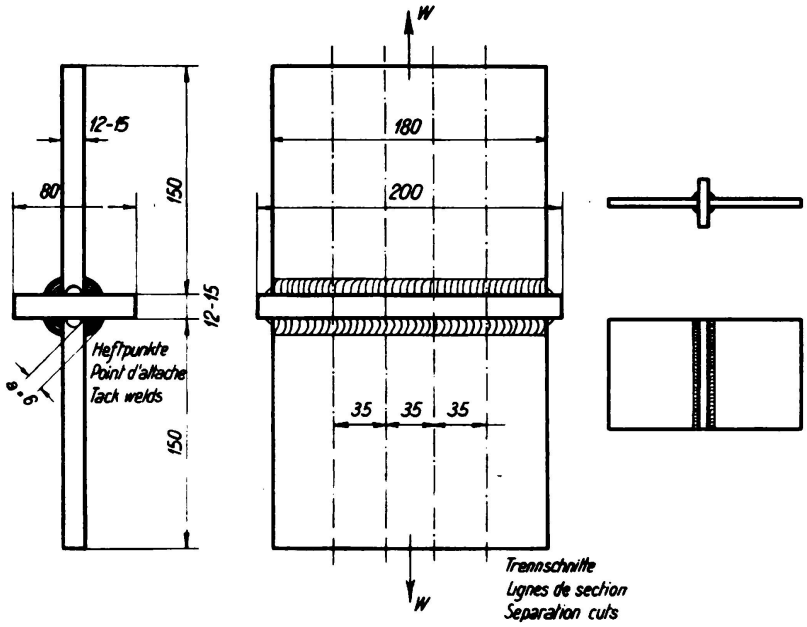


Fig. 5.
L'essai des soudures d'angle frontales.

Afin de justifier économiquement (tout en tenant compte de la sécurité) le surplus de travail résultant du contrôle des soudures, il est nécessaire d'appliquer

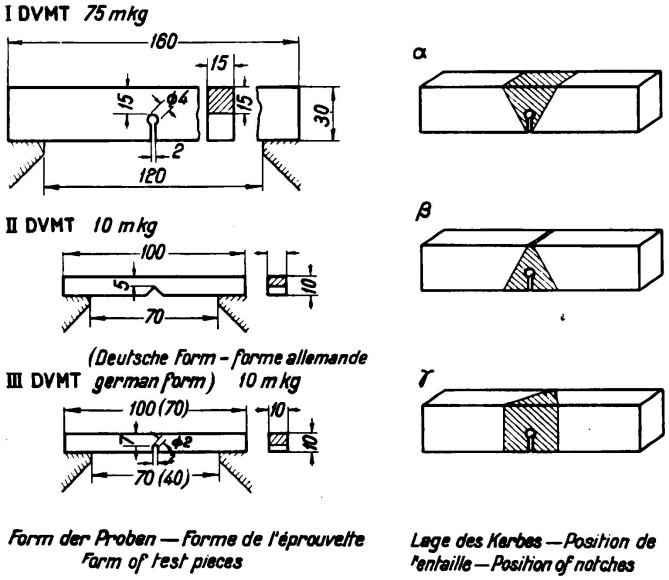
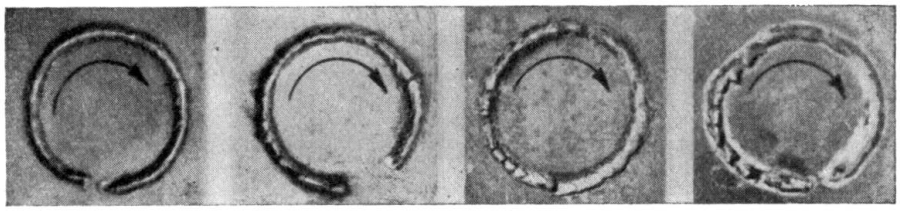


Fig. 6.
L'essai de résilience.

et de développer avec compréhension les méthodes d'essai et de les interpréter avec exactitude.[10] Toutefois, les hautes prestations que l'on peut exiger actuelle-

[9] *E. Diepschlag:* Autog. Metallbearb. 29 (1936), fasc. 8, p. 113.
[10] *H. Koch:* Stahlbau 9 (1936), fasc. 26, p. 206.

ment des soudures (sans compter le rôle joué par le soudeur) ne sont possibles que si l'on a pu se convaincre de la qualité des soudures exécutées.



90° nue — ø 4 | 90° nue — ø 5 | 90° enrobée — ø 4 | 90° enrobée — ø 4 Electr. au plafond

45° enrobée — ø 4 | 30° enrobée — ø 6 | 15° enrobée — ø 8 | 15° enrobée — ø 12

Fig. 7.
Essais d'adhérence.

Pour le contrôle des pièces terminées, les méthodes n'exigeant aucune détérioration sont à préférer aux autres. L'ouverture de la soudure, affaiblissant cette dernière, a une certaine valeur instructive mais doit être considérée comme un sondage tout-à-fait superficiel.[11] L'ouverture peut être refermée mais on intro-

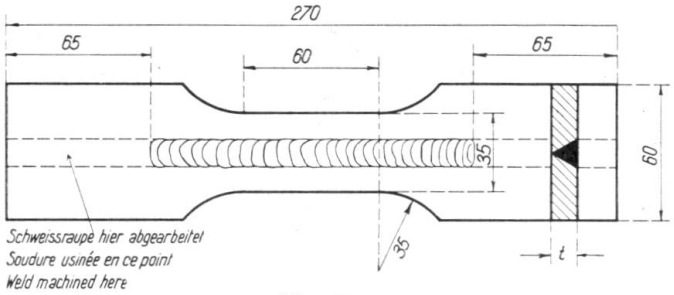


Fig. 8.
Eprouvette pour l'étirement.

duit une nouvelle inconnue à l'endroit qui nous était devenu connu et l'on peut craindre des contraintes thermiques additionnelles (fig. 12).

Lorsque la soudure ne doit pas être endommagée, il faut choisir un des procédés qui n'entraînent aucune détérioration. On peut compter ici sur l'aspect extérieur qui permet au connaisseur de conclure sur la qualité de la soudure. Dans la construction des réservoirs on peut employer les méthodes à eau, air

[11] *R. Bernhard* et *A. Matting:* Stahlbau 1932, fasc. 15, p. 114.

ou vapeur sous pression. Dans certains cas spéciaux on peut effectuer des essais d'explosion mais ces essais entraînent des détériorations.[12] Au lieu de ces essais

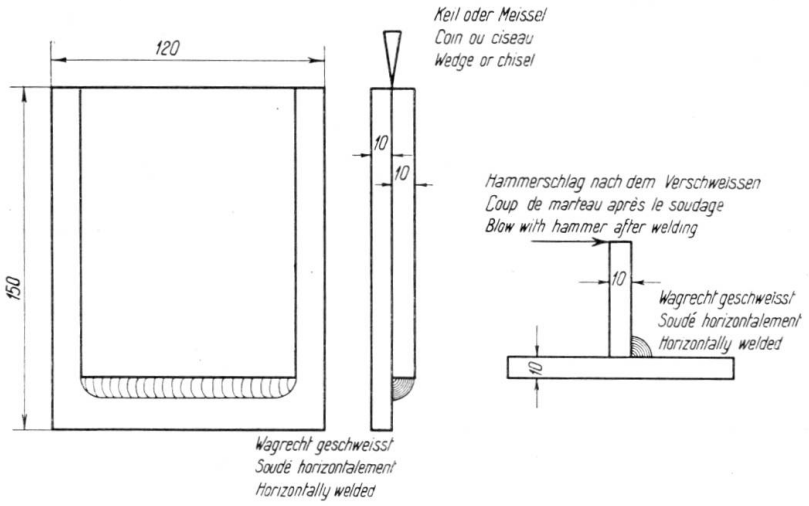


Fig. 9.
Essai d'écartement et de pliage.

on peut exécuter des mises en charge ou des essais à la fatigue en mesurant en même temps les contraintes.[13]

Les procédés d'auscultation acoustique ou au moyen de champs électriques

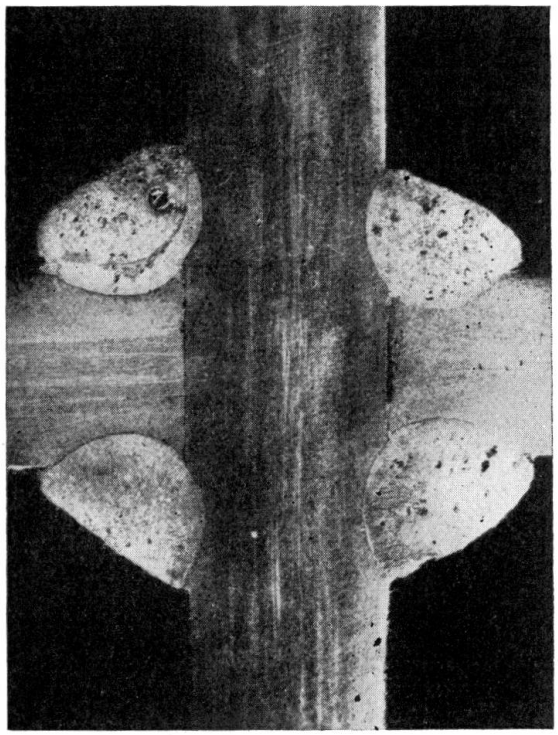


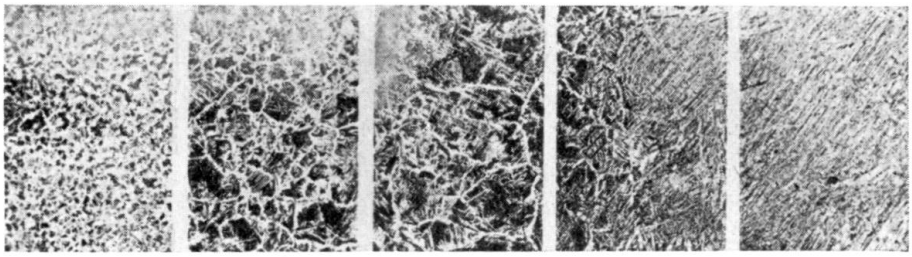
Fig. 10.
Structure macroscopique d'une soudure d'angle effectuée avec électrode nue. — Bonne pénétration.

n'ont eu aucun succès jusqu'à ce jour. Les procédés magnétiques ont donné de meilleurs résultats. On répend de la limaille de fer sur la pièce magnétisée. La

[12] *E. C. Hutchinson:* «Power», du 7. 10. 1930.

[13] *W. Rosteck:* Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 1934, fasc. 10 et 11, p. 187 et 197.

disposition régulière de la limaille est troublée par les vides, les inclusions de scories et les défauts de liaison.



Soudure au gas

Métal de base — Transition — Métal d'apport

Soudure à l'arc électrique

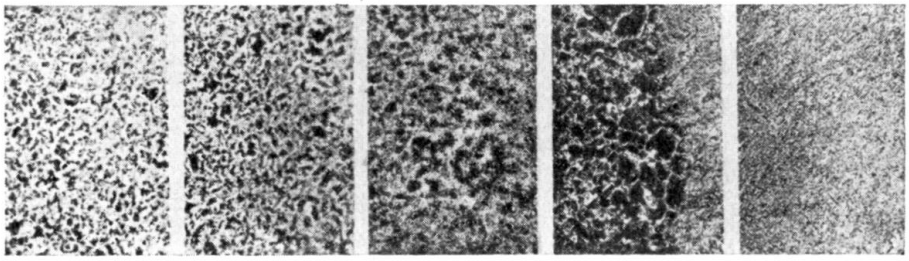
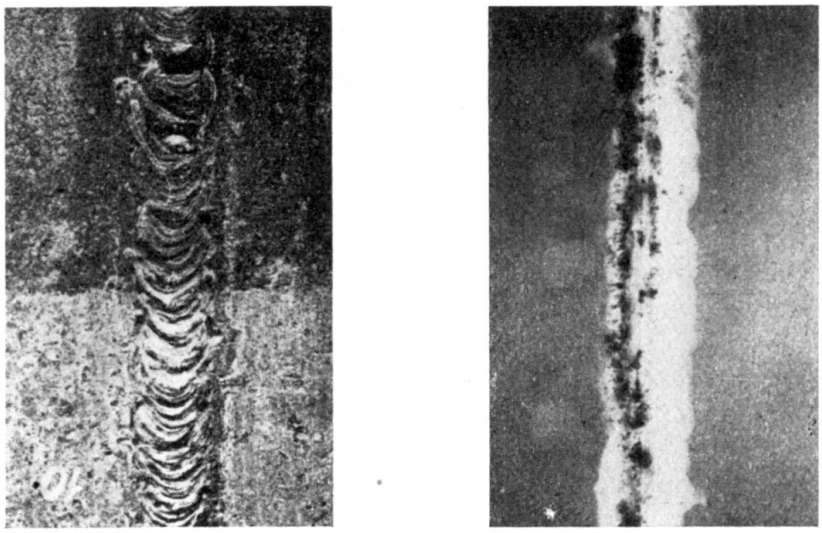


Fig. 11.

Photographies microscopiques de soudures au gaz et à l'arc électrique.

Le contrôle électromagnétique-acoustique[14] n'a pas satisfait à tous les espoirs. Les soudures sont auscultées électromagnétiquement et les impulsions de courant



Vue — Radiographie

Fig. 12.

Mauvaise soudure à l'arc électrique

[14] *S. Kießkalt:* Autog. Metallbearb. 1934, fasc. 5, p. 65.

sont perçues à l'aide d'un casque. Il n'est pas toujours possible de déterminer avec précision les points défectueux.

Bien meilleures sont les méthodes radiographiques et principalement roentgenographiques.[15] On a même employé les rayons Gamma dans un but de contrôle.[16] Ce dernier système n'entre cependant pas encore en ligne de compte dans la construction métallique.

Lors de l'emploi des rayons X, il suffit de projeter l'image sur un écran pour l'étude de la structure grossière de la soudure, à condition que l'épaisseur du

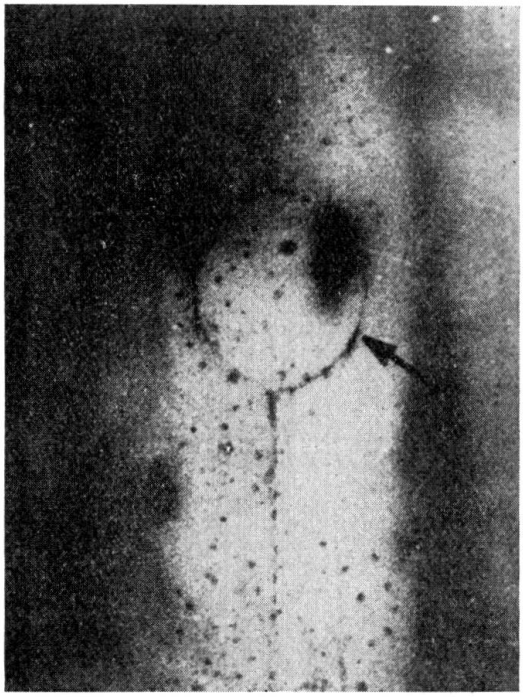


Fig. 13.

Radiographie d'un mauvais début de soudure.

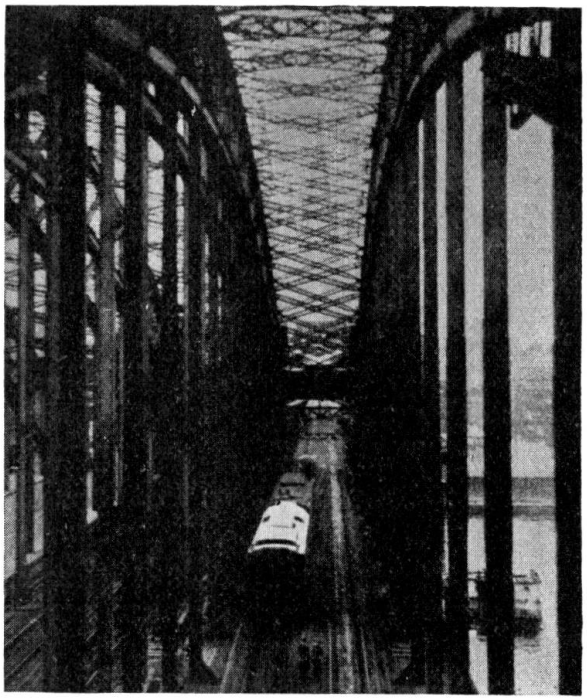


Fig. 14.

Wagon de contrôle radiographique sur le Pont Hohenzollern à Cologne.

métal ne soit pas trop grande. On peut aussi enregistrer l'image sur un film (fig. 13). Les installations sont assez développées pour que les auscultations soient aussi possibles en cours de service ou sur le chantier (fig. 14). Les fig. 15 et 16 montrent que l'on peut aussi ausculter roentgenographiquement les ponts de béton armé. Cette méthode de contrôle a des limites, représentées par la complication des appareils, la perceptibilité limitée des défauts et l'épaisseur du matériau.

Les méthodes de contrôle avec et sans détériorations peuvent aussi être employées simultanément. Un point très discuté est celui de la comparaison des résultats des deux méthodes.[17]

---

[15] *A. Matting:* Anwendung der Durchstrahlungsverfahren in der Technik. Akademische Verlagsanstalt m. b. H., Leipzig 1935, p. 51.

[16] *R. Berthold:* Z.V.D.I. 1934, fasc. 6, p. 173.

[17] *A. Matting* et *C. Stieler:* Stahlbau 1933, fasc. 24, p. 185.

La combinaison de différents procédés de contrôle permet presque toujours d'acquérir rapidement des connaissances suffisantes sur la structure des soudures.

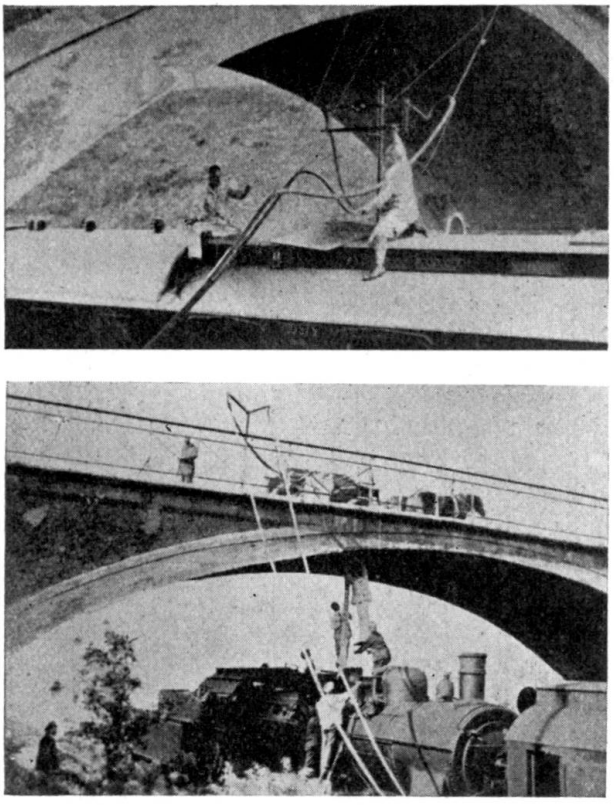


Fig. 15.
Auscultation radiographique d'un pont de béton armé.

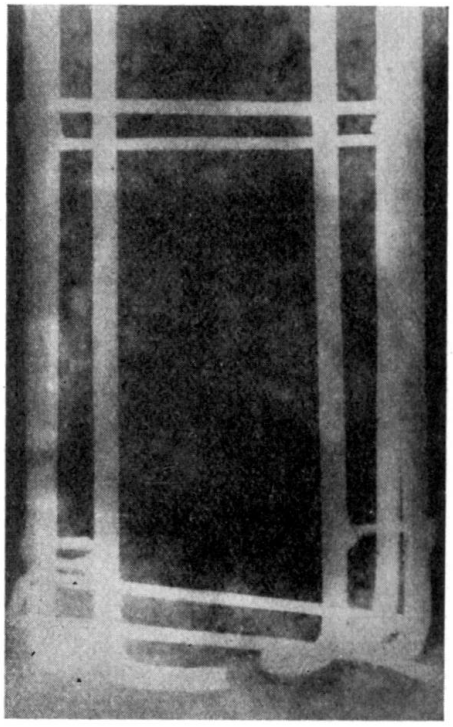


Fig. 16.
Radiographie d'une poutre de béton armé.

IIIc 6

Essai et contrôle des cordons de soudure.

Prüfung der Schweißnähte.

Examination of weld-seams.

Dr. Ing. h. c. M. Roš,

Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale et Président de la Direction du Laboratoire Fédéral d'Essai des Matériaux et Institut de Recherches pour l'Industrie, le Génie Civil et les Arts et Métiers, Zurich.

L'essai et le contrôle s'étendent

1° aux baguettes (électrodes),
2° aux soudeurs,
3° aux soudures de l'ouvrage même.

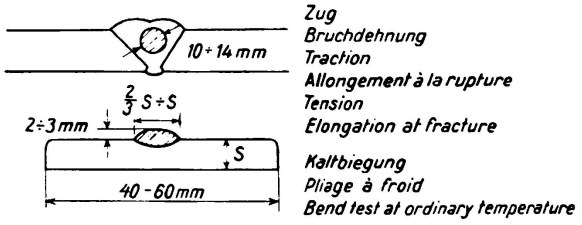


Fig. 1.

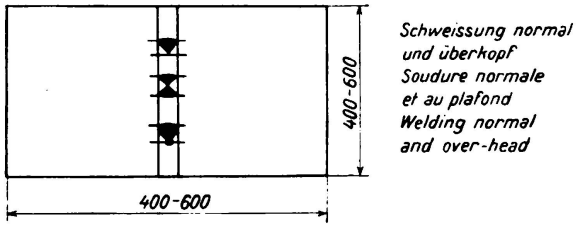


Fig. 2.

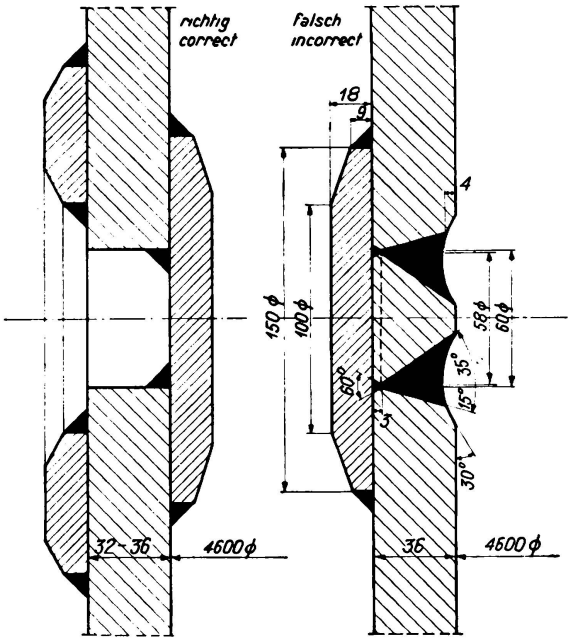


Fig. 3.

Fermeture correcte et fausse d'une trépanation par des soudures.

1° *Baguettes (électrodes).* Le métal d'apport fondu est soumis à des essais de résistance et de déformation; on examine également sa sensibilité à la trempe (fig. 1).

Eprouvette (barreau) prélevée de la soudure: — métal d'apport —

Valeurs prescrites:

Dureté d'après *Brinell* H = 115 — 160

Résistance à la traction pour acier normal de construction (β_z = 36 — 44 kg/mm², C $\leq$ 0,15 %): β_z = 40 — 55 kg/mm²;

Allongement à la rupture λ_{10} = 15 — 25 %.

Cordon de soudure léger: — sensibilité à la trempe —

Coefficient de pliage $K = 50 \cdot \frac{s}{r} = 32 - 48$.

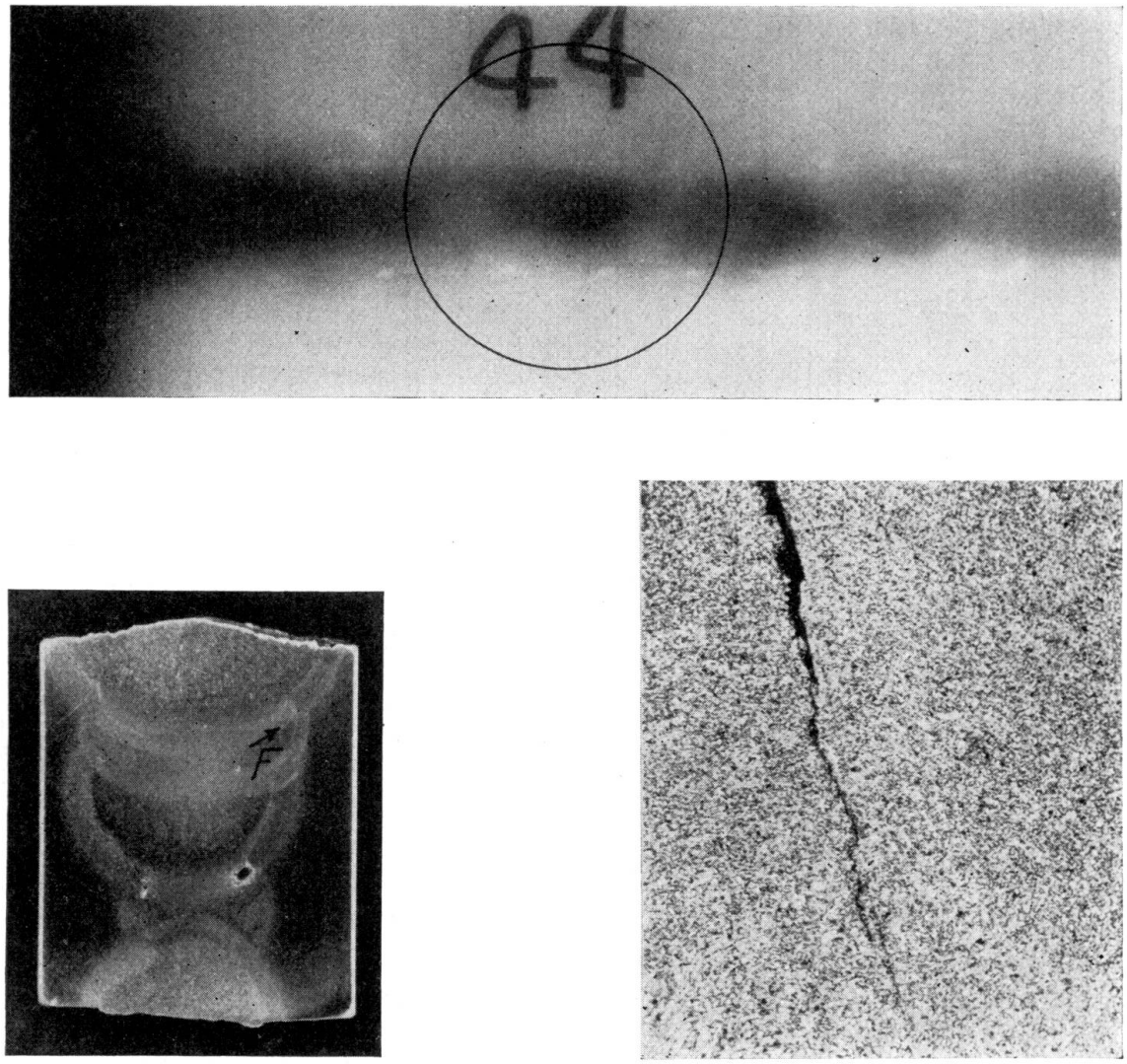


Fig. 4.

Fissure microscopique dans la structure du métal d'apport, non décelable röntgenographiquement.

Valeurs informatives:

Limite apparente d'élasticité σ_s = 25 — 35 kg/mm²

Résilience petite éprouvette normale du L.F.E.M. $\varkappa \geq 4$ mkg/cm².

Pour les aciers de qualité, prescriptions particulières.

2° *Soudeurs — ateliers —*. Des plaques ou barreaux soudés dans la position habituelle ou au-dessus de la tête, des plus minces et des plus épaisses que l'on puisse rencontrer — assemblages bout à bout et assemblages dont les axes se coupent — furent soumis à un examen radiographique et ensuite à des examens de structure tant macrographiques que micrographiques, à des essais de dureté, résistance à la traction, pliage, résistance à la fatigue par efforts répétés variant entre $\sigma = 0$ et $\sigma = + \sigma_{max}$, et exceptionnellement à des essais de résilience. Le choix des éprouvettes dépend du résultat de la radiographie (fig. 4).

Des endroits non liés ne sont pas admissibles. La structure ne doit présenter aucune fissure. Pour un acier normal de construction, on exige: dureté — section — $H = 115 - 160$ kg/mm², — surface — $H \leqq 180$ kg/mm²; résistance à la traction — assemblage bout à bout — égale à celle de l'acier $\beta_z = 36 - 44$ kg/mm²; résistance à la traction — assemblage dont les axes se coupent — en moyenne $\beta_z = 25$ kg/mm², minimum $\beta_z = 22{,}5$ kg/mm²; coefficient de pliage $K = 20 - 28$ (épaisseur de la tôle $\delta < 12$ mm), $K = 16 - 20$ ($\delta = 12 - 20$ mm) et $K = 12 - 16$ ($\delta > 20$ mm); résistance à la fatigue par efforts répétés variant entre $\sigma = 0$ et $\sigma = + \sigma_{max}$.

Assemblage bout à bout: $\sigma_U \geqq 15$ kg/mm² — position normale —
$\sigma_U \geqq 12$ kg/mm² — soudé au-dessus de la tête —

Assemblage dont les axes se coupent: $\sigma_U \geqq 6$ kg/mm².

Pour les aciers de qualité et aciers spéciaux, prescriptions selon les cas.

3° *Cordons de soudure — chantier —*. Les éprouvettes — disques ou barreaux — de forme appropriée (ronde, ovale), prélevées sur l'ouvrage soudé ou sur l'un de ses éléments, sont soumises aux mêmes essais que ceux mentionnés dans le chapitre « soudeurs » quant aux mêmes caractéristiques mécaniques — résistance, déformation. Les valeurs qui en résultent, critère de la qualité, ne doivent pas dépasser les mêmes limites; seuls des écarts très légers sont admissibles. Lorsque l'on bouche les endroits de prélèvement, il faut avoir particulièrement soin d'éviter un amas de métal d'apport et d'amoindrir le plus possible les tensions internes et de retrait (fig. 3).

La radiographie permet bien de découvrir des endroits imparfaitement liés, des pores, des inclusions de scories et des fissures, elle n'est cependant pas en mesure de déceler les fissures imperceptibles les plus fines, indésirables et souvent dangereuses (fig. 4). Il est souvent nécessaire d'exécuter deux fois la radiographie; la première a lieu après l'achèvement de la soudure, aussi aux endroits de prélèvement des disques d'essai, la seconde après l'éloignement des inégalités des couches superficielles (rabotage, meulage, fraisage).

III c 7

Quelques exemples de constructions soudées en Tchécoslovaquie.

Einige Beispiele von geschweißten Stahlkonstruktionen in der Tschechoslowakei.

Some Examples of Welded Steelwork in Czechoslovakia.

A. Brebera,

Ingénieur, Conseiller Supérieur au Ministère des Travaux Publics à Prague.

Les applications de la soudure électrique dans le domaine particulier de la construction des ponts et des grands bâtiments mettent en évidence les considérables progrès réalisés au cours de ces dernières années par suite de l'introduction de ce procédé.

En 1935 notamment, on a exécuté à Prague de grands hangars couvrant une superficie de 1500 m². La partie la plus intéressante de cette construction est le portique de 50 m d'ouverture (fig. 1) supportant les fermes triangulées distantes entre elles de 10 m (fig. 2).

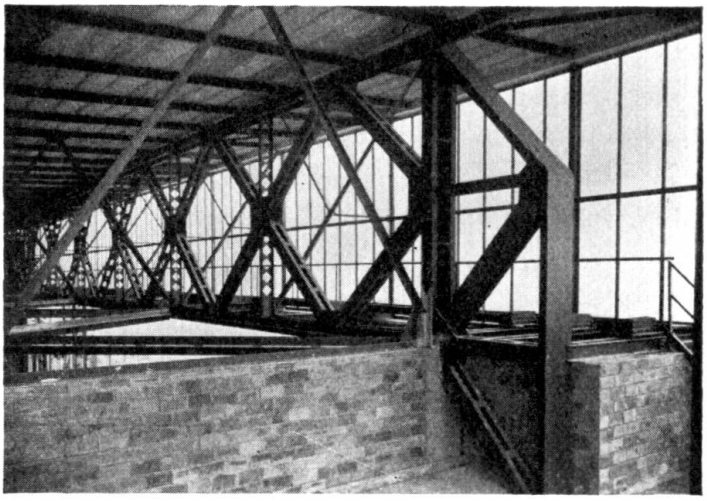


Fig. 1.

Dans le but d'étudier les avantages de la soudure à l'arc, l'ensemble du projet a été établi parallèlement en construction rivée et soudée. La comparaison des deux solutions a donné lieu à d'intéressantes constatations. Pour le portique de 50 m tout d'abord, le projet soudé était prévu en acier ordinaire C 37, tandis que pour le projet rivé on avait eu recours à de l'acier à haute résistance C 52. Quoique dans le second cas on ait toléré des tensions admissibles de 50 % supérieures à celles admises dans le premier cas les poids des deux portiques étaient identiques.

Quant à la charpente proprement dite du hangar, où l'acier ordinaire

C 37 avait été choisi pour les deux cas, l'économie de poids réalisée par l'emploi de la soudure était de 20 % (5210 Kgs. contre 6500 Kgs.).

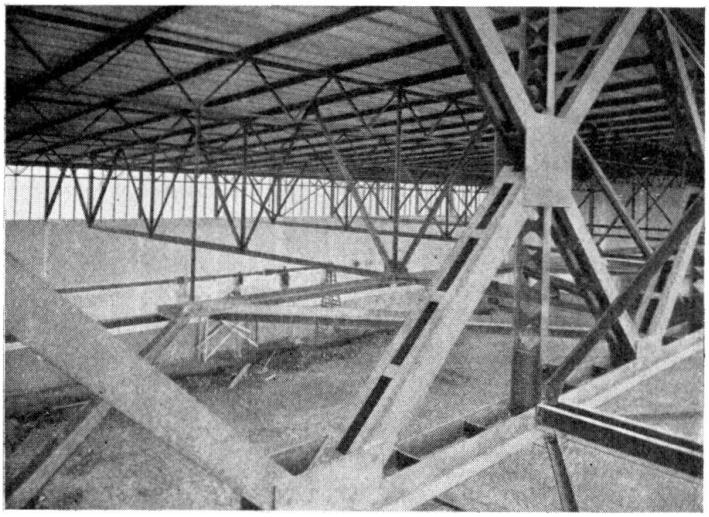


Fig. 2.

Etant donné ces résultats et pour des raisons d'ordre économique, la construction entière a été exécutée en acier ordinaire C 37 par soudure électrique tant en ce qui concerne le travail à l'usine que l'assemblage sur chantier.

Pour la soudure, deux types différents d'électrodes ont été employés. Ces deux types ont des caracteristiques mécaniques essentiellement différentes comme le montre le tableau I.

Tableau I.

Types d'électrode		I	II
Résistance à la traction	en kg/mm²	38	42
Limite élastique	en kg/mm²	23	26
Allongement	en %	12	20
Résilience (Mesnager)	en kgm/cm²	3	6

On a autorisé l'emploi des électrodes du type I pour les différentes parties de la construction dont la portée était inférieure à 15 m.

Dans les parties de la construction dépassant cette portée, ce type d'électrode a toutefois encore été admis en tenant compte du fait que la tension de cisaillement admissible y était moins élevée.

Les tensions maxima admises tant en ce qui concerne l'acier proprement dit que le métal d'apport sont données au tableau II pour les différentes sollicitations.

Tableau II.

Tensions admissibles	Métal de base	Métal d'apport	
		Type I	Type II
Traction	$\sigma = 1200$ (1400) kg/cm²	$0{,}75 \cdot \sigma$	$0{,}85 \cdot \sigma$
Compression . .	$\sigma = 1200$ (1400) kg/cm²	$0{,}95 \cdot \sigma$	$1{,}00 \cdot \sigma$
Cisaillement . .	$\tau = 850$ (1000) kg/cm²	$0{,}60 \cdot \sigma$	$0{,}65 \cdot \sigma$

Remarque: Les valeurs entre parenthèses ont été autorisées dans le cas où les calculs tenaient compte de toutes les influences extérieures, c'est-à-dire de l'effet de la température et de la pression du vent.

Avant la mise en oeuvre des travaux de soudure, les électrodes et les soudeurs ont été soumis à différents examens. Les résultats obtenus lors de ces épreuves sont contenus dans les tableaux III et IV.

Tableau III.

Épreuves du métal d'apport		Type d'électrode I	Type d'électrode II
Résistance à la traction	en kg/mm²	38	42
Résistance au cisaillement	en kg/mm²	28	30
Angle de pliage	en °	120	180
Allongement	en %	12	18

Tableau IV.

Épreuves des soudeurs		Type d'électrode I	Type d'électrode II
Résistance à la traction	en kg/mm²	34	40
Résistance au cisaillement	en kg/mm²	26	29
Angle de pliage	en °	90	120
Allongement	en %	10	15

Dans l'établissement du projet définitif, tous les assemblages ont été étudiés de manière à les adapter aux derniers perfectionnements de la technique de la soudure.

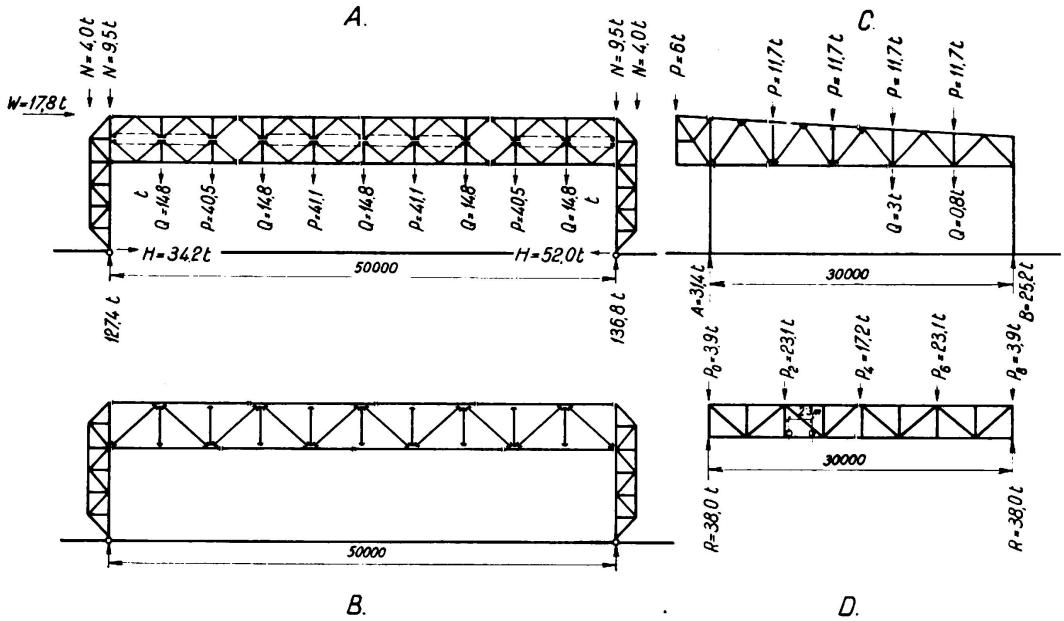


Fig. 3.

On a eu largement recours à l'emploi de sections à simple té obtenues par découpage au chalumeau de poutrelles laminées ordinaires.

La membrure supérieure de la traverse du portique a été constituée d'une section extrêmement simple (semelles: 500 · 50; cornières: 100 · 180 · 18) et particulièrement appropriée à la sollicitation à laquelle cette poutre était soumise; l'effort axial y était de 318 tonnes.

Pour certains éléments, notamment les montants de la traverse du portique, on a constitué des profils tirés de poutrelles laminées ordinaires par découpage en zig-zag et dont les deux éléments ainsi obtenus étaient ensuite resoudés après décalage entre eux. On obtient ainsi, d'une manière économique, une poutre à âme évidée, de même poids que la poutrelle normale mais de rigidité beaucoup supérieure.

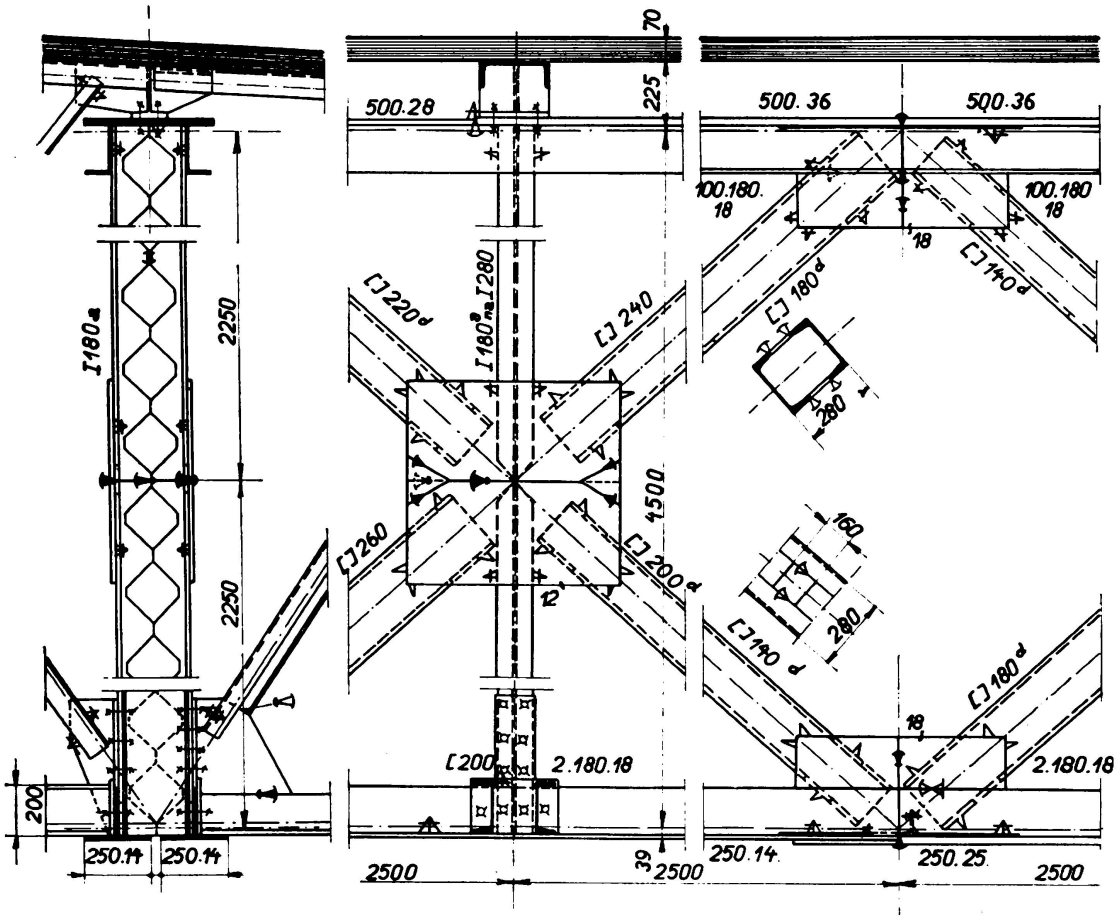


Fig. 4.

En majeure partie on s'est servi de soudures bout à bout pour l'assemblage des profilés entre eux. La disposition des joints de montage principaux est représentée à la fig. 3.

Toutes les poutres ont été assemblées et soudées à pied d'oeuvre, à plat dans la mesure du possible; puis elles ont été placées d'emblée dans leur position définitive où les derniers joints ont été terminés dans la position verticale. Les soudures de montage ont pour cette raison été conçues, d'après la position où elles seraient exécutées, et placées à des endroits facilement accessibles.

L'idée maîtresse qui a guidé la conception du portique était la réduction au minimum des joints de montage. Les montants d'extrémité du portique ont pu être expédiés d'une seule pièce. La traverse supérieure par contre (fig. 4) était

trop grande et trop haute pour permettre une expédition analogue et il a fallu la sectionner en plusieurs tronçons. Pour faciliter l'assemblage de ces différents tronçons, on a adopté la poutre à losanges (fig. 3) qui réduisait à 8 le nombre

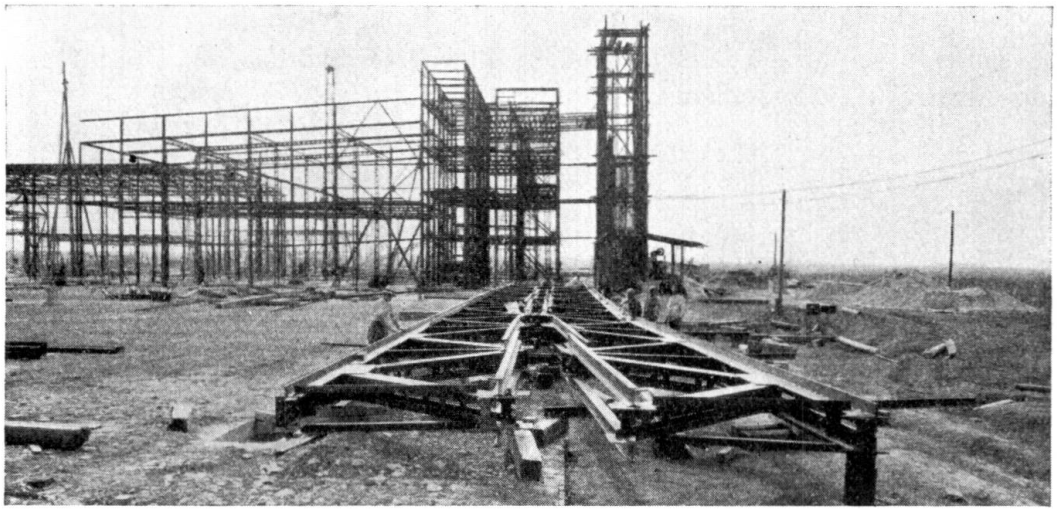


Fig. 5.

de tronçons alors que ce nombre se serait élevé à 27 pour une poutre triangulée habituelle (fig. 3B).

Pour obtenir des ensembles solides et transportables, les différentes parties ont été complétées par des membrures provisoires cousues aux goussets centraux. D'une façon ingénieuse on a fait usage, en guise de membrures, des chevrons du hangar (fig. 5).

Les joints de montage se trouvent dans les membrures et les goussets centraux, ainsi qu'il est clairement indiqué sur la fig. 3. Le noeud des diagonales croisées est très intéressant (fig. 6). Pour faciliter le soudage des goussets inférieurs la plaque correspondante supérieure a été entaillée. Le complément triangulaire a été soudé dans la plaque supérieure après que la plaque inférieure a été entièrement soudée.

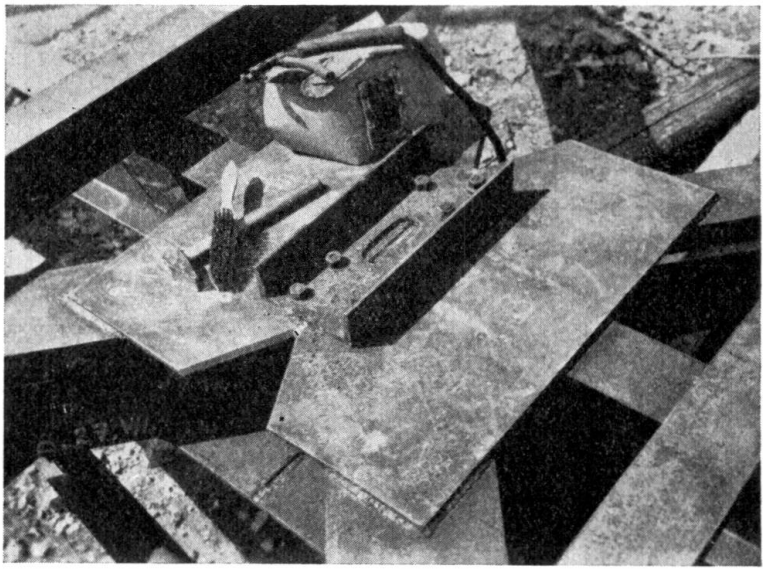


Fig. 6.

Tout d'abord les parties horizontales du cadre ont été assemblées et agrafées à l'aide de pièces appliquées et de boulons pour leur assurer la position correcte. Ensuite les joints ont été cousus et l'un après l'autre complètement soudés. Enfin les membrures auxiliaires ont été éloignées et les pieds assemblés et

soudés. Le montage a commencé par la mise en place des cadres du dessus de la porte. Le cadre tout entier, d'une travée de 50 m et d'un poids de 410 t, a été dressé et mis en place sur ses appuis à l'aide de poteaux de montage (fig. 7). Le dressage et la mise en place d'un cadre durait 4 heures. Ensuite on a procédé de la façon usuelle au montage de la charpente.

Le soudage se faisait dans les ateliers et sur le chantier au courant continu à l'aide d'agrégats de soudage.

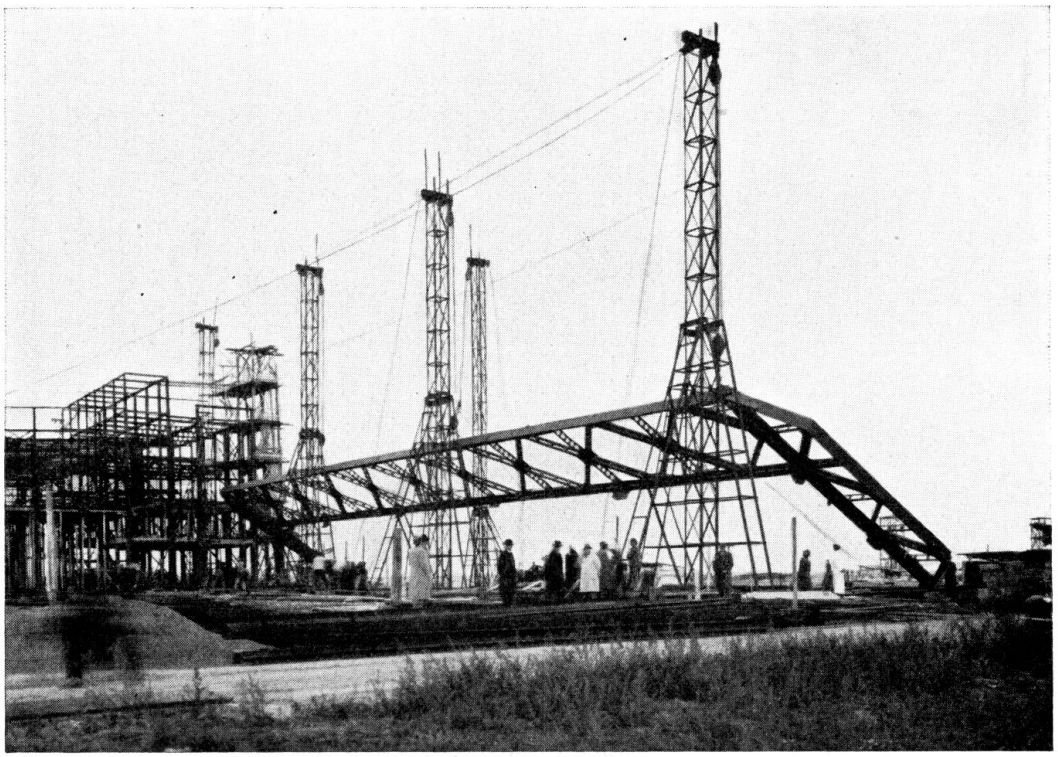


Fig. 7.

La construction des charpentes métalliques a été adjugée et répartie entre les 2 firmes suivantes:

la S.A. des Anciens Etablissements Škoda à Plzeň, et

la Českomoravská-Kolben-Daněk à Prague.

La première de ces firmes a utilisé pour les soudures du type I des électrodes Böhler-B-Elite-KVA; pour celles du type II, des électrodes Arcos Stabilend; la seconde firme s'est servie exclusivement d'électrodes Elarc-Resistens.

Les résultats moyens des éprouvettes d'agréation des électrodes, des soudures et des soudeurs, sont consignés dans le tableau V. En regard des résultats obtenus, on a indiqué, pour rappel, les minima exigés. En tout, 42 soudeurs ont été soumis à l'agréation.

De ce tableau, il découle que les valeurs minima exigées, malgré leur rigueur, ont été aisément atteintes.

Les soudures ont été attentivement suivies pendant leur exécution. Une fois terminées, elles ont été soumises à un contrôle minutieux, et leurs dimensions

relevées avec précision. Plusieurs d'entre elles ont été examinées intérieurement après fraisage.

Les projets de la charpente, ont été établis par la Sté Ame des Anciens Etablissements Škoda à Plzeň qui a veillé tout particulièrement à la simplicité de leur exécution, tant à l'atelier qu'au montage.

Le contrôle des travaux a été effectué par le Département des Ponts du Ministère des Travaux publics.

Tableau V.

Epreuve d'agréation			type d'électrodes				
			I		II		
			Böhler B-Elite	minimum requis	Arcos Stabil.	Elarc Resist.	minimum requis
des électrodes	limite élastique en kg/mm²		30,9	23	35,0	40,0	26
	résistance à la traction en kg/mm²		46,5	38	46,3	48,7	42
	allongement en %		21,6	12	21,9	23,6	20
	résilience en kgm/cm²		4,3	3	8,5	9,7	6
des soudures	résistance à la traction en kg/mm²		44,7	38	48,5	46,3	42
	résistance au cisaillement en kg/mm²		34,1	28	34,6	37,1	30
des soudeurs	résistance à la traction kg/mm²	position horizontale	47,2	—	49,6	46,8	—
		position verticale	42,2	—	47,9	48,0	—
		position »overhead«	43,8	—	50,5	47,0	—
		moyenne	44,5	34	49,5	47,3	40
	résistance au cisaillement en kg/mm²	position horizontale	33,3	—	33,3	35,7	—
		position verticale	33,7	—	35,7	36,1	—
		position »overhead«	31,3	—	35,1	34,2	—
		moyenne	33,1	26	34,8	35,3	29
de soudures	en forme de I: résistance à la traction en kg/mm²		—	—	46,6	47,6	42
	en forme de V (épaisseur 50 mm): résistance à la traction en kg/mm²		—	—	58,9	42,4	42

Une autre application très importante est la construction soudée d'un pont route de 52,005 mètres de portée (fig. 8).

Les poutres maîtresses sont du type Vierendeel, c'est-à-dire sans diagonales. Ce type de poutre a été choisi pour des raisons d'esthétique surtout, mais il présente encore d'autres avantages pour la soudure, notamment la simplicité et la rigidité des noeuds.

Les tensions secondaires aussi y sont nulles alors que dans les systèmes triangulés, celles-ci peuvent varier entre 10 et 15 % des tensions principales, par suite notamment des grandes dimensions des goussets aux noeuds et du procédé de calcul de ces systèmes.

Par conséquent, pour des tensions admissibles égales dans les calculs, la sécurité réelle est supérieure dans les poutres Vierendeel. Enfin, la flexibilité des ponts à poutres maîtresses Vierendeel est, par suite de la grande rigidité des noeuds de ce système, beaucoup moins grande que celle que l'on rencontre dans les ponts à poutres maîtresses triangulées.

Ce fait est très favorable à la conservation des ouvrages.

Jusqu'ici, le seul inconvénient qui se manifestait pour l'application des poutres Vierendeel naissait de la complexité du calcul statique.

La détermination des lignes d'influence par le procédé Beggs-Blažek a résolu complètement cette difficulté.[1]

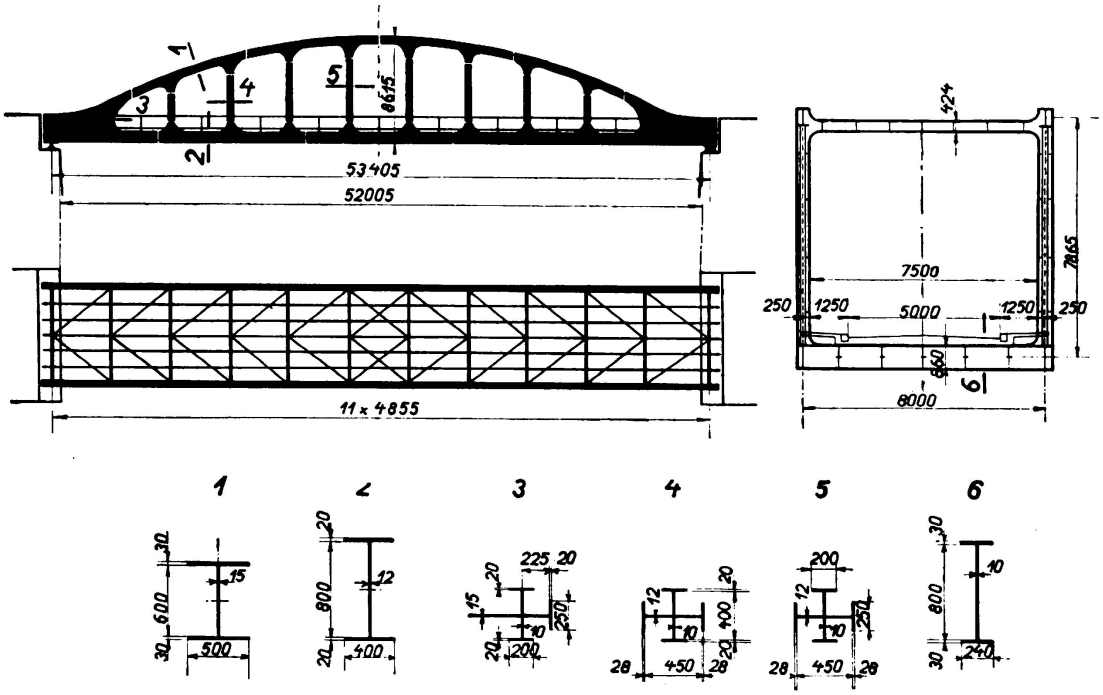


Fig. 8.

L'avantage de ce procédé réside dans le fait qu'il n'est plus nécessaire de recourir à des hypothèses simplificatrices et que l'on tient naturellement compte de la rigidité complémentaire de l'empattement des montants.

L'allure des lignes d'influence peut être déterminée en n'importe quel point avec précision, et par la suite, vérifiée aisément sur la base des conditions de stabilité.

La poutre, telle qu'elle a été choisie, est 33 fois hyperstatique.

Par mesure de sécurité, les résultats obtenus ont été contrôlés par un calcul approximatif. Dans ce calcul, on a admis que les moments d'inertie des membrures étaient constants dans tous les panneaux et dépendaient de la longueur des barres.

Au surplus, on a supposé que les charges ne s'appliquaient qu'au droit des montants.

Ainsi, le degré d'hyperstaticité se ramenait à 11, et le calcul devenait plus aisé.

[1] Assoc. Intern. des Ponts & Charpentes, 1er Congrès, rapp. fin. p. 709.

Toute cette construction a été réalisée en acier ordinaire C 37 et entièrement soudée, tant à l'atelier qu'au montage. Pour la soudure, on a employé exclusivement les électrodes Arcos Stabilend.

Les tensions admises, tant pour l'acier de base que pour les soudures, sont indiquées dans le tableau VI:

Tableau VI.

Tensions admissibles	Pièces de la voie		Poutre maîtresse	
	Métal de base	Métal d'apport	Métal de base	Métal d'apport
Traction	$\sigma = 850$ kg/cm²	0,75 σ	870 + 3 l — au maximum 1150 kg/cm² (1350 kg/cm²)	0,85 σ
Compression		0,90 σ		1,00 σ
Cisaillement	$\tau = 700$ (800) kg/cm²	0,50 σ	700 (800) kg/cm²	0,60 σ

Remarque: Les valeurs entre parenthèses correspondent au cas où les calculs tiennent compte de toutes les forces extérieures (pression du vent).

Pour toutes les soudures d'assemblages, on a préféré les soudures bout à bout en éliminant par principe, les assemblages en croix soumis à un effort de traction. Les entretoises ont été assemblées aux montants par soudure bout à bout. Pour éviter l'accumulation des soudures, les raidisseurs des entretoises, des membrures et des montants ont été évidés dans les angles, ce qui facilite aussi l'écoulement de l'eau.

Le poids de la partie métallique est de 154 Tonnes. Les joints de montage ont été déterminés de manière à permettre l'expédition de pièces aussi grandes que possible (fig. 8). Les extrémités des poutres maîtresses, d'une longueur de 9,293 m et d'un poids de 6,7 Tonnes, ont été expédiées d'une seule pièce sur le chantier de construction (fig. 9).

Comme le montage du pont devait se faire au printemps, c'est-à-dire à l'époque des grandes eaux, on avait tout d'abord prévu de pointer les pièces par soudure immédiatement après leur fixation provisoire par boulons, de manière à ce que ces points de soudure puissent, éventuellement, supporter le poids propre de la construction, au cas où les échafaudages viendraient à être entraînés par les eaux.

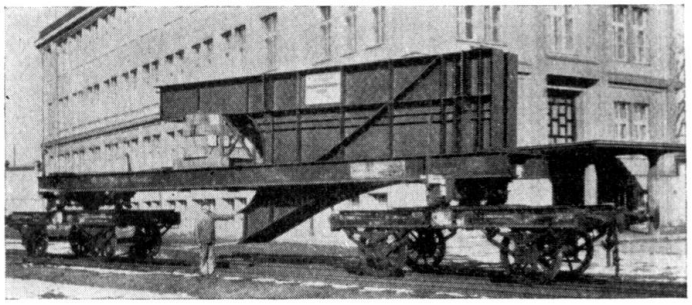


Fig. 9.

Ensuite, on avait prévu de souder le tablier en 3 tronçons séparés de manière à réduire les tensions dûes à la soudure.

Le temps favorable dont on a disposé a permis de modifier ces dispositions: le tablier a, tout d'abord, été soudé aux membrures inférieures. Cette façon de procéder a empêché la transmission, dans les poutres principales, des tensions

causées par la soudure du tablier. Ensuite, on est venu appliquer les montants et les membrures supérieures qui ont aussitôt été soudés (fig. 10—12).

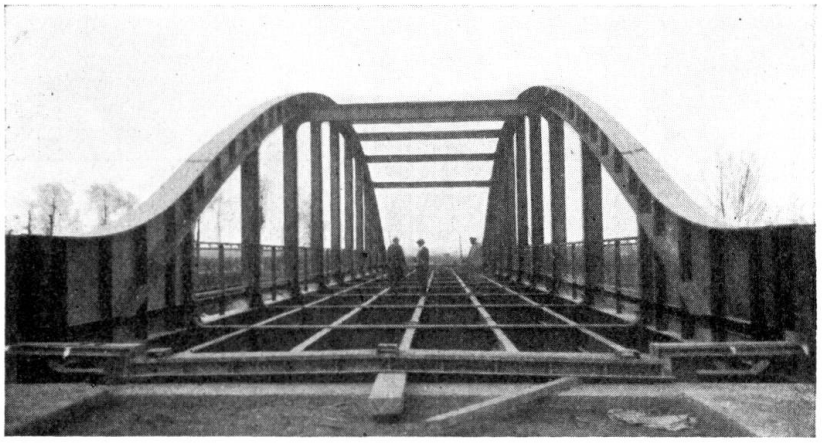


Fig. 10.

On a donné, aux poutres maîtresses, une contre-flèche de montage de 15 mm correspondant à la flexion causée par la charge permanente et la moitié de la surcharge accidentelle.

Outre les épreuves habituelles de l'acier, des électrodes, des soudures et des soudeurs, des essais à la fatigue ont aussi été entrepris. La limite de fatigue des soudures a été fixée d'après la courbe de *Wöhler* déterminée à l'aide de 8 essais exécutés à 2 millions d'alternances à 22,5 kg/mm², et à 10 millions d'alternances à 20,5 kg/mm². Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes de forme cônique dans un appareil de fatigue *Amsler*.

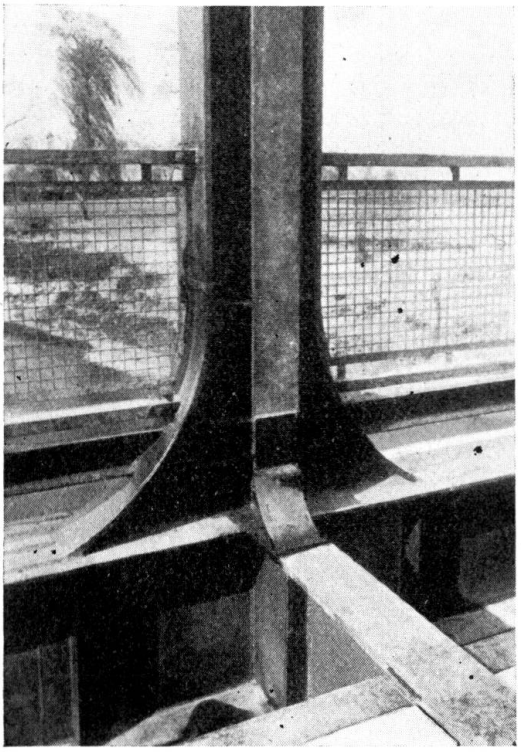


Fig. 11.

On a estimé utile d'étudier aux rayons Röntgen les soudures d'une partie de la membrure inférieure des poutres maîtresses (fig. 13).

En outre, on a soumis à des essais statiques un modèle de noeud de la membrure inférieure. Ces essais exécutés dans le laboratoire pour l'étude et l'essai des matériaux et des constructions de l'Ecole Tchèque de Prague ont permis de déterminer les tensions provoquées par la charge permanente et la surcharge mobile supposée uniformisée. Ultérieurement, un noeud analogue sera soumis à des essais de fatigue.

Quand la construction sera complètement achevée, on déterminera aussi,

à l'aide de fleximètres, les flèches prises par les entretoises et les maîtresses-poutres pour des charges fixes et mobiles.

La disposition d'ensemble de la construction de ce pont avait été élaborée par le Département des Ponts du Ministère des Travaux Publics. L'étude com-

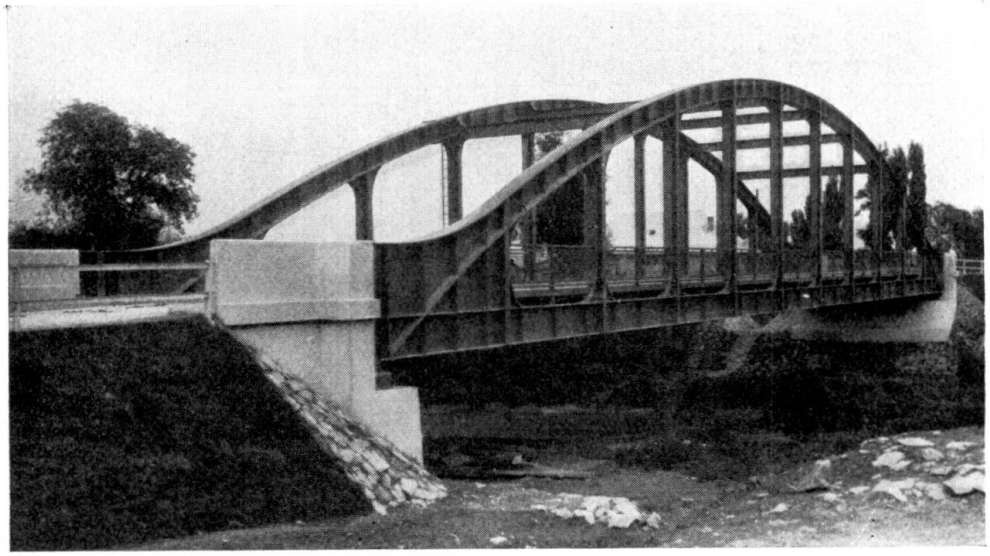


Fig. 12.

plète du projet définitif et la construction de l'ouvrage ont été confiées à la S.A. des Anciens Etablissements Škoda à Plzeň qui s'est acquittée de cette tâche à l'entière satisfaction du Ministère. Le contrôle de l'exécution a été effectué par le Département des Ponts du Ministère des Travaux Publics.

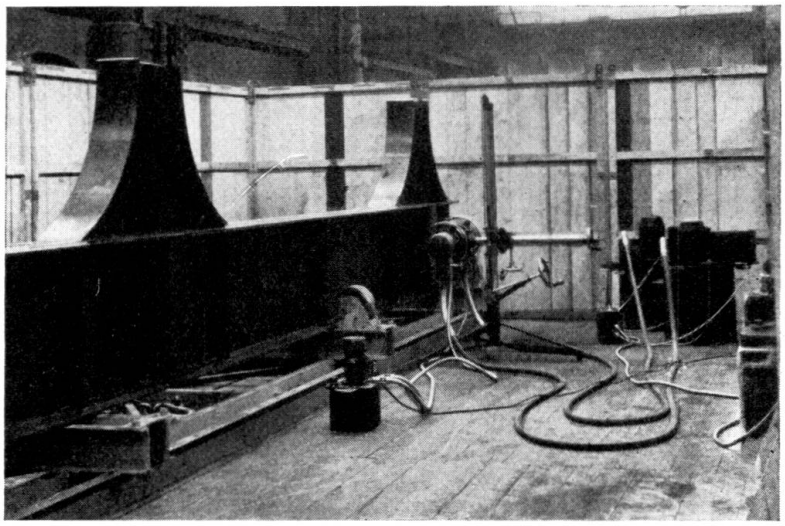


Fig. 13.

Pour terminer, la fig. 14 et le tableau VII donnent un aperçu des principaux ponts routes soudés en Tchécoslovaquie à l'heure actuelle:

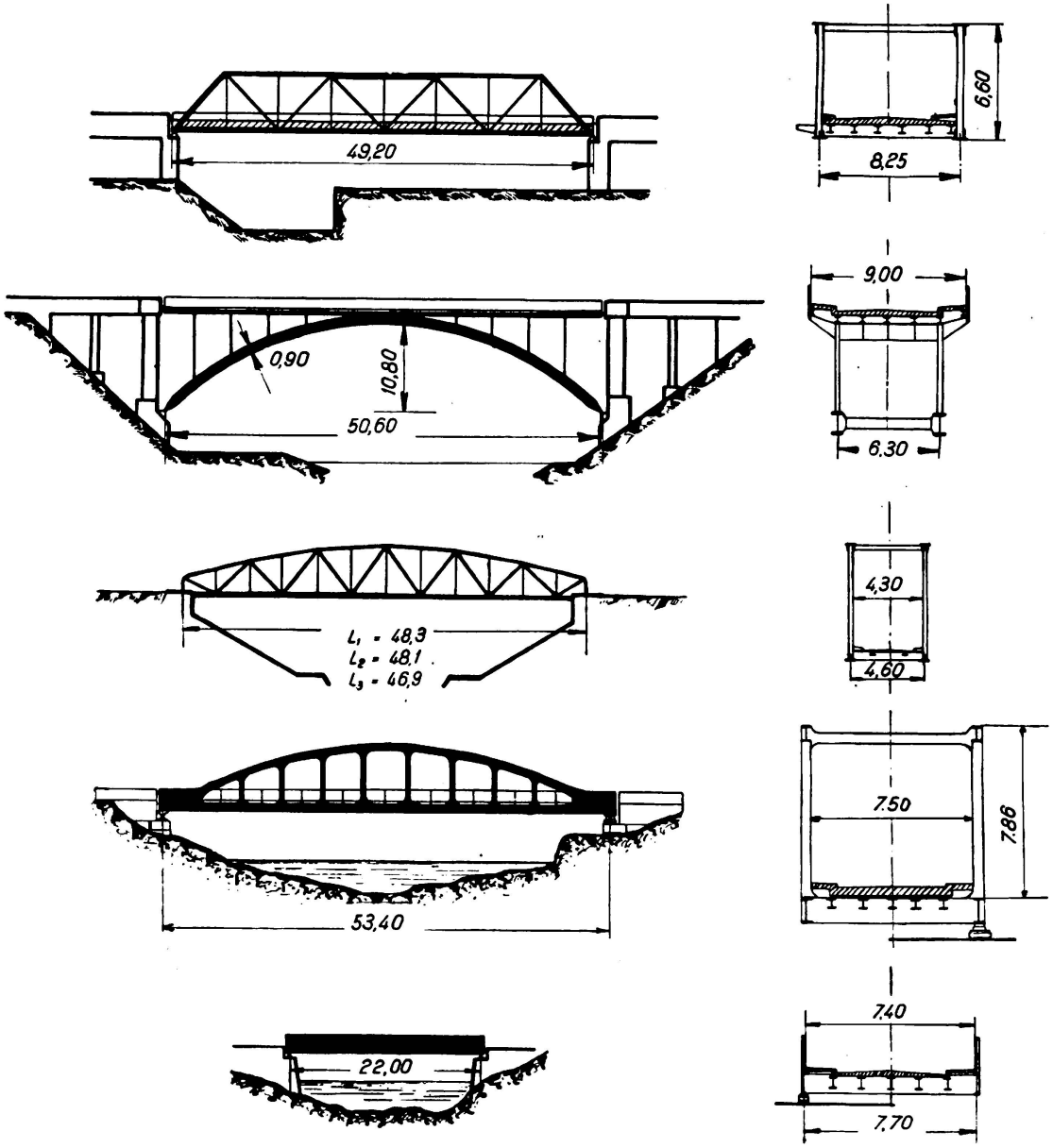


Fig. 14.

Tableau VII.

Pont No	Année de Construct.	Portée en m	Charge*	Poids en Tonnes	Constructeur
1.	1931	49.20	Klasse I	145.0	Etbl. Škoda, Plzeň
2.	1933	50.60	» I	111.0	» » »
3.	1933	22.00	» I	37.6	» » »
4.	1934	48.30	» III	52.0	Českomoravska-Kolben Daněk
		48.10	» III	52.0	Brno-Kralovopolská
		46.90	» III	49.1	Etbl. Škoda, Plzeň
5.	1936	53.40	» I	157.0	» » »

Remarque: La classe I correspond à une surcharge uniformément répartie de 500 kg/m² ou à un rouleau compresseur de 22 tonnes.

La classe III correspond d'autre part à une surcharge uniformément répartie de 340 kg/m² ou à un chariot de 4 tonnes.

III c 8

Le calcul des soudures.

Berechnung der Schweißnähte.

The Calculation of Weld Seams.

Ir. N. C. Kist,
Professor an der Technischen Hochschule in Delft, Haag.

L'auteur résume brièvement son rapport sur le «Calcul des soudures basé sur la conservation de l'énergie de déformation» et fait remarquer que la direction de la force supportée par une soudure doit se calculer sur la base de la théorie de la plasticité pour tous les assemblages hyperstatiques.

Leere Seite
Blank page
Page vide