

La soldadura eléctrica

SEGUNDA PARTE

5. ESTADO DE LA CUESTION EN ALEMANIA Y BELGICA

En lo que sigue, me refiero al estado de esta materia en el 1.^{er} semestre de 1937. Hago esta salvedad en vista del desarrollo constante y rápido de esta técnica.

Analizaré primero las tendencias y caracteres de las construcciones soldadas ejecutadas en Bélgica; en especial, lo que diga relación con puentes soldados.

En Bélgica, la mayor parte de los puentes soldados son carreteros, fijos; algunos, de alma llena; los más, del tipo Vierendeel. La tendencia actual de la técnica puede resumirse en los siguientes puntos:

Empleo de tan poca soldadura como sea posible (a fin de evitar un recalentamiento innecesario); empleo de perfiles siempre que se pueda; uso de la costura de tope; evitar los cordones frontales; ubicación tal de las juntas, que éstas queden en los sitios menos fatigados; en costuras de ángulo, llenadura del mismo por un electrodo fino, luego, disminución del número de capas mediante electrodos gruesos; evitar el encuentro de cordones laterales divergentes en un mismo punto; menores exigencias para la soldadura en posición difícil; nada de ángulos, sino acordamientos progresivos.

Los belgas aceptan para la soldadura mayores fatigas que los alemanes, siempre que se empleen electrodos de calidad reconocida. Los alemanes calculan siempre la soldadura por emplear, y los cordones resultan gruesos; los ingenieros belgas emplean más la intuición y la experiencia que el cálculo, usan menor cantidad de soldadura, pero insisten en la calidad de ésta.

En puentes ferroviarios, no han pasado en general de luces de 50 m., y han usado poco la viga Vierendeel. Por excepción, se encuentra, cerca de Amberes, una viga Vierendeel, para ferrocarril, de 63 m. de luz.

La luz de los puentes carreteros varía de 35 a 90 metros. Podrían construirse de luces aun mayores, pero este caso no se presenta en el país.

El acero que emplean es el St. 42 con un límite elástico de 24 Kg/mm²; un alargamiento de 20 a 24%; coeficiente de calidad 1,000; fatiga admisible 12 Kg/mm², si no se ha considerado el viento. La tendencia es a emplear sólo aceros de 37 a 44 Kg/mm². Las nuevas normas, limitan la cantidad de carbono del acero, por ser éste un elemento nocivo para la soldadura; exigen por ello análisis químicos.

En los talleres la soldadura no ofrece dificultad, gracias a dispositivos que ro-

tan las piezas, y que permiten ejecutarla en posición horizontal. Los fabricantes tienen también dispositivos para prevenir las deformaciones; éstos constituyen patentes industriales.

Usan la soldadura de tope tanto en V—con el dorso resoldado—como en X. El soldador es un obrero especializado, que no puede soldar antes de rendir sus pruebas. En toda obra de importancia, se ejecutan pruebas de ensayos al recibir los materiales.

En los puentes carreteros, las vigas maestras son del tipo Vierendeel, de 8, 10 o 12 paños. La cabeza superior es una parábola de segundo grado. La flecha es—en general— $1/7$ a $1/8$ de la luz. Este tipo de viga es económico, porque—bajo la acción del peso propio o de sobrecarga uniforme—los diversos elementos quedan solicitados sólo a esfuerzos normales o tangenciales; los momentos son prácticamente nulos. El aspecto estético de estos puentes es muy satisfactorio; recuerdan el arco con tirantes.

Para calcular estos puentes usan alguno de los procedimientos simplificados que permiten el trazado rápido de las líneas de influencia de los M, N y T de los diversos elementos. Los ensayos sobre los puentes en servicio así calculados han dado resultados satisfactorios.

Cuando emplean vigas de alma llena, ésta es delgada y alta.

Para las soldaduras en el montaje usan electrodos con una resistencia de 45 a 55 Kg/mm²; un alargamiento mínimo de 20%; y un límite elástico de 30 Kg/mm². (Nótese que exigen para el electrodo mayor resistencia que para el acero). Las juntas del montaje son colocadas cerca de los puntos de inflexión, en los sitios menos fatigados.

Las dimensiones de los montantes y de sus ensambles son calculados con exceso, ya que las fatigas cambian de signo según la posición de las cargas. Son éstas las piezas más fatigadas. La ejecución de soldaduras en el montaje suele ofrecer dificultades; los perfiles laminados no tienen siempre las mismas dimensiones. Además, la soldadura de las juntas debe hacerse en un orden determinado, estudiado previamente, a fin de evitar deformaciones en las juntas que quedan por soldar.

Los belgas emplean poco el control con rayos X y las pruebas magnéticas; las normas para puentes soldados no los exigen. Controlan más bien la calidad del electrodo, del acero, del soldador, y la ejecución misma, es decir, toman todas las precauciones posibles para obtener una buena costura. A posteriori, se basan más bien en ensayos de laboratorio, de resistencia y deformación. En el taller, usan bastante el sistema de fresa, que consiste en hacer un sacado en la costura en forma de cono invertido, a fin de observar la calidad y aspecto interior de ésta, luego, rellenan con soldadura estos huecos. Es semejante a la prueba de Schmuckler.

Respecto al tiempo que debe soldar un obrero, antes de trabajar en costuras de puentes, no existe un criterio uniforme; varía de una fábrica a otra. Lo que sí es un hecho, es que la soldadura ha desplazado del todo a la remachadura en calderería, construcción de material para ferrocarriles y tranvías, pequeñas estructuras, etc. Todo se suelda en el taller.

Como resumen indican que la soldadura, al igual que el concreto armado, no vale sino por su ejecución. La vigilancia y control, tanto de los materiales como del soldador son fundamentales.

La parte impresa de las normas belgas es pequeña. Se ha publicado sólo un pliego: «Reglamento relativo a las Construcciones Metálicas Soldadas». En ellas es de hacer notar los siguientes puntos; que trata por separado los aceros de alta calidad; que se refiere en especial a los aceros de 37 a 44 Kg/mm²; que para las pruebas de tracción del metal de aporte fija un mínimo de 40 Kg/mm², pero también un máximo de 55; que hace algunas reservas para los aceros de alta resistencia.

Existen también normas para puentes soldados, que aun no han sido publicadas oficialmente. Cuando llaman a propuestas públicas, acompañan a los planos estas normas, que pueden tener modificaciones de un caso a otro. De estos pliegos de condiciones, es de anotar los puntos siguientes:

Que al ensayo de tracción de costuras de tope exige igual resistencia que la del acero empleado; que el espesor de las costuras de ángulo no debe sobrepasar al calculado (para evitar un recalentamiento peligroso e innecesario); que para las costuras de más de 6 mm. recomienda empezar a soldar con alambres delgados.

Señala este pliego también algunas de las causas de fracasos, a saber: acumulación de costuras en un sólo punto; empleo de aceros frágiles demasiado carburados; soldadura de piezas fijadas invariablemente y que no pueden deformarse; calentamiento local violento; ejecución irracional de largos cordones a un sólo lado y en una misma dirección; variación brusca de sección sin acordamientos graduales; empleo de aceros que han sufrido sobre-deformación por plegadura en frío («écrouissage»); soldadura a temperaturas muy frías de piezas no calentadas previamente (este caso no se presenta en Chile); enfriamiento brusco de los cordones; amperaje insuficiente o irregular.

En general, los belgas han sido más aventurados para innovar que los alemanes. Han intervenido en la construcción de puentes soldados en otros países de Europa; en especial, suministrando electrodos. (Se comprende que se trata de electrodos revestidos). En algunos casos, se ha empleado el acero alemán y los electrodos belgas.

El menor empleo de los rayos X se debe al precio de éstos, y a que el volumen de producción es muy inferior al de Alemania. Los resultados obtenidos en la construcción de puentes soldados, han sido satisfactorios, y a ello se debe que el empleo de los rayos no se haya divulgado hasta el presente. Como normas de cálculo usan el pliego alemán para puentes soldados.

Alemania.—No se puede indicar aquí, como en Bélgica, en forma tan concisa, cuales son las tendencias dominantes en esta materia. No existe la centralización que hay en Bélgica, lo que se explica dados su mayor superficie y producción. Las opiniones manifestadas por los ingenieros son a veces discordantes; en especial, respecto a la aplicabilidad de la soldadura a puentes de ferrocarril. Algunos estiman que—dadas las sollicitaciones dinámicas y los esfuerzos alternativos—no debe en el estado actual de la materia, emplearse la soldadura.

Para aplicaciones de menor importancia, el empleo de la soldadura es ya un hecho aceptado en todo el país, y por todas las grandes empresas.

La «Reichs Autobahn» (Oficina Fiscal de Caminos), no usa en la actualidad puentes remachados; si son metálicos, los hacen soldados, por ser más estéticos y livianos. (Usan también puentes de concreto armado). Emplean más las vigas de alma llena que los enrejados; usan poco éstos, para evitar barras que trabajan a

esfuerzos alternados. El costo de los puentes soldados lo estiman inferior al de los remachados, aunque éste depende, en gran parte, de la longitud de los trozos que se puedan llevar listos desde el taller.

En efecto, soldar en el taller no ofrece dificultad, y es más barato que hacerlo en el montaje. Por eso, los constructores sueldan cuanto pueden en el taller, a veces, llegan a soldar en taller el 95% del total. Si se trata de un puente, hacen cada trozo del máximo tamaño posible.

La R. Autobahn tenía en marzo de 1937 más de 100 puentes soldados en servicio. La economía de peso la estiman en un 15 a 20%. Utilizan, dentro de lo posible, el St. 37. El puente de mayor luz que tienen en servicio, y uno de los más largos que existen soldados, es un puente en arco, de 103 m. de luz, totalmente soldado, con tirantes verticales extraordinariamente delgados. En su aspecto, se asemeja a una viga Vierendeel, que tuviera montantes muy esbeltos. Está ubicado en Duisburg; fué construído por la Demag. Todos los puentes son controlados con rayos X, los revisan trozo por trozo, y controlan todas las costuras hechas en el montaje. También emplean pruebas magnéticas.

Hay en Alemania puentes ferroviarios soldados, pero su número es muy inferior al de los puentes carreteros. Los puentes ferroviarios, son todos de alma llena. El «S.-Bahn» (ferrocarril metropolitano de Berlín) ha construído últimamente todos sus puentes soldados. Uno de los puentes ferroviarios de mayor luz que han construído es el «Ruegendammbrücke», viga de alma llena de 52 m. de luz; las vigas maestras son doble T de 3,9 m. de alto si se comprende el espesor de las platabandas. (La exagerada luz de este puente se explica por razones de carácter estratégico).

Las DIN 4100, «Prescripciones para las Construcciones Metálicas Elevadas Soldadas», dan una buena idea del desarrollo de esta materia. Las normas no son sólo una serie de exigencias, sino un guía eficaz para el trabajo mismo, y para las disposiciones constructivas. Han tenido gran influencia en el notable desarrollo de esta técnica. No hay rama de la industria en que no se emplee la soldadura. Los modernos automotores son totalmente soldados. Hasta en la construcción de máquinas herramientas, y en la carcasa de la maquinaria eléctrica (Siemens) se la emplea.

Los técnicos de las grandes empresas (M. A. N., Demag, etc.) recalcan la importancia que tiene el orden que se ejecutan las costuras de una estructura, en vista de la temperatura que alcanza el metal, y que puede producir tensiones de deformación y encogimiento al enfriarse. Un trabajo racionalmente dispuesto evita estas tensiones. Así, por ejemplo, el refuerzo del alma de una T debe soldarse a ésta antes de unirla a la platabanda, y la costura de las platabandas debe hacerse antes de unirla al alma.

Consignaré textualmente algunas frases del ingeniero Dr. O. Kommerell, una autoridad en esta materia, y que figuran en una de sus obras: «Que no hay motivo para no tomar con la misma confianza que los remachados los puentes ferroviarios soldados, cuando: 1) El soldador es un obrero experimentado y cuya capacidad ha sido probada. 2) El acero, las herramientas, máquinas soldadoras, cumplen con las normas. 3) La soldadura es constantemente inspeccionada, y cada costura controlada y probada. Comentando las DIN 4100, el mismo autor hace las siguientes observaciones:

Que el espesor de las costuras no debe ser mayor que el que el cálculo indica. Que las costuras de ángulo débil son favorables en especial en los puntos en que hay sollicitaciones dinámicas. Que las costuras de ranura deben usarse sólo cuando las otras no son posibles. Que debe pensarse al proyectar si la costura podrá o no hacerse cómodamente, y si se va a soldar en el taller o en el montaje. Que el empleo del St. 37 debe ser la regla en «Hochbau». Que es de vital importancia que las superficies por soldar se limpien en forma muy minuciosa. Que dispositivos que en estructuras son corrientes, pueden ser inapropiados para puentes. Y a la inversa, dispositivos empleados en los puentes deben usarse en otros casos sólo cuando no signifiquen un mayor costo.

Respecto a normas, la DIN 1912 contiene los signos convencionales aceptados para los planos y dibujos de las costuras. Las DIN 1913 traen las prescripciones que deben cumplir los electrodos; indica que son normas provisorias en vista del progreso constante de la técnica. Las DIN 1914 contienen recomendaciones sobre la forma de efectuar el control con rayos X y γ . No han sido traducidas al castellano como las DIN 4100.

Las DIN 4100 se refieren a «Hochbau». Traen un pequeño apéndice para puentes. Pero aunque no han sido publicadas oficialmente, existen normas para los puentes soldados ferroviarios de alma llena, que son las que usan los FF. CC. alemanes. Estas normas, aunque provisorias, son muy completas. Y al respecto, conviene hacer un paréntesis.

Las normas recién citadas se basaron en las experiencias del «Kuratorium für Dauerfestigkeitsversuche». Este, realizó un gran número de experiencias, en especial, de vibración (esfuerzos repetidos y alternados), e invirtió en ello la suma de 50.000 marcos. El Kuratorium emitió un extenso informe, que ofrece bastante interés.

Sus conclusiones fueron presentadas al último Congreso de la «Asociación Internacional de Puentes», realizado en Berlín en Octubre de 1936, y aprobadas por él. Estas conclusiones son, muy resumidas, las siguientes:

a) Las costuras solicitadas sólo estáticamente tienen resistencias a la tracción semejantes a las del metal de base (37 a 42 Kg/mm²);

b) Las mismas costuras, sometidas a esfuerzos alternados, dieron como resistencia de base, para 2 millones de alternancias, sólo los siguientes:

13 a 18 Kg/mm². para costuras de tope; 6,5 a 10,3 para cordones frontales; y 8 a 12 para cordones de ángulo laterales. Las costuras de tope se mostraron muy superiores a las de ángulo. (He llamado «resistencia de base» a la que tiene el material para 2 millones de alternancias. Su valor es casi igual al de la «resistencia permanente», que es el valor por debajo del cual la pieza no se rompe para un número infinito de alternancias. Cabe recordar que para un buen fierro de 32 Kg/mm². la resistencia permanente es de unos 12 Kg/mm²., lo que representa poco más de la mitad de su límite elástico, que es 21 Kg/mm². En la práctica se ha aceptado el valor para 2 millones de alternancias, que se considera más que suficiente, ya que la obra no alcanzará en su vida útil a sufrir este número de alternancias).;

c) En estas pruebas, la ruptura se produjo, en general, en el metal de base, y tuvo su origen en pequeñas fisuras superficiales, en la zona de paso (zona de transición entre la costura y el metal de base no afectado por la temperatura);

d) En costuras de tope, cuya raíz no ha sido resoldada, baja la resistencia a vibración a 0,7 de los valores dados en b);

e) En las barras tendidas, fueron las costuras de tope, con ángulo de 45° respecto al eje de la barra, las que dieron mejores resultados. La resistencia de base subió de 18 a 22 Kg/mm²;

f) En un ensayo en que se reemplazó una costura de tope por una cubrejunta con costuras de ángulo, la resistencia base bajó de 13 a 10 Kg/mm²;

g) En todas las costuras de ángulo bajó mucho la resistencia, cuando no se soldó bien el fondo del diedro;

h) En el ensayo de los cordones frontales, dieron mejores resultados los de ángulo débil con una zona de paso uniforme entre la costura y la teja, que los de ángulo lleno;

i) La forma de la costura, en especial la zona de paso de ella a la plancha, tiene gran importancia; aun mayor que la del electrodo empleado;

j) Ya que a menudo la prueba de vibración, da como resistencia de base valores muy bajos, mientras que las pruebas estáticas, de tracción por ejemplo, dan valores altos, se deduce que para los puentes no se puede prescindir de las primeras;

k) No se encontró una diferencia esencial entre el St. 37 y el St. 52 a los ensayos de vibración.

l) Mientras que en un comienzo, para el cálculo de los puentes soldados, se creyó que bastaba tener costuras de dimensiones suficientes para conseguir una buena ejecución, las experiencias han mostrado la importancia de la construcción misma; ya que las más de las veces no es la costura la que se rompe, sino las barras, en general, en la zona de paso;

m) En los sitios en que hay costuras de ángulo para unir las piezas, o, en general, donde comienzan o terminan cordones laterales o frontales, la fatiga admisible debe reducirse a

$$\sigma = \alpha \sigma_{ad}.$$

El valor α depende de la razón $\min. M / \max. M$, y del signo de ésta ($\alpha \leq 1$);

n) Si en el caso anterior la unión de la pieza agregada se hace mediante un acordamiento gradual, aumenta bastante la resistencia de base.

En el último tiempo, después de publicado el informe del Kuratorium, costuras de ángulo, solicitadas longitudinalmente, dieron una resistencia de base tan alta como las de tope (16 a 18 Kg/mm²).

p) Contra lo que se usó en un comienzo, se ha visto la superioridad de las costuras de tope respecto a las de ángulo. La causa estriba en la fácil transmisión de esfuerzos en las primeras, mientras que en las segundas, al transmitir el esfuerzo, deben cambiar, a menudo, su dirección origen.

q) En las experiencias se mostraron equivalentes las soldaduras al arco y a gas.

Nótese que el valor obtenido como resistencia de base para una costura de

tope dispuesta a 45° (con respecto al eje de las barras que une), es superior al límite de resistencia permanente del St. 37.

El punto *d*) se refiere en especial a costuras de tope en V. En ellas, después de efectuada la costura, debe invertirse la pieza, de tal modo que el dorso de la V, quede hacia arriba. Luego se limpia cuidadosamente el metal, se escarifica un poco y se deposita un cordón de soldadura cubriendo el dorso de la V. Esto es lo que llaman «resoldar la raíz».

El punto *k*) del informe muestra la inconveniencia del empleo de St. 52. Cuando la fatiga inferior en el ensayo era 0, se obtenían valores casi iguales para el St. 37 y el St. 52. Sólo a medida que la fatiga inferior crecía, se obtenían valores más altos para el St. 52. El coeficiente α , que es específico de la soldadura, puede bajar hasta 0,55 para el St. 52.

El punto *n*) relativo a costuras de ángulo se presenta siempre que hay una platabanda adicional. En tal caso, tanto el espesor de la plancha adicional, como su ancho, como la costura misma, deben decrecer en forma gradual, a fin de tener una buena ejecución. En las costuras de tope, es permitido el uso del esmeril, a fin de obtener una zona de paso uniforme de la costura al metal de base

Las «Prescripciones para Puentes Soldados de Ferrocarril de Alma Llena» contienen muchos párrafos idénticos a las DIN 4100. Indicaré algunas diferencias, que tomo—en su mayor parte—de publicaciones del Dr. Kommerell.

Estas normas exigen al contratista instalaciones de rayos X, o alguna equivalente, que le permita controlar las costuras de mayor importancia; y dispositivos que le permitan ejecutar las costuras del taller en posición horizontal, o cercana a ella.

La inspección puede exigir pruebas especiales de esfuerzos alternados del metal de los electrodos.

Para una construcción no tiene ningún valor el que la soldadura misma tenga una resistencia más alta que la del metal de base, ya que esta mayor resistencia no puede ser aprovechada.

La soldadura debe parecerse químicamente al metal de base, y no debe contener—en ningún caso—más de 0,03% de P o S.

En las zonas tendidas, debe hacerse las costuras de tope a 45° .

Al proyectar, debe buscarse que las costuras sean hechas en horizontal.

Las juntas deben evitarse en lo posible, usando perfiles de mayores dimensiones, siempre que se justifique económicamente. Costuras interrumpidas y de ranura no deben emplearse en puentes. En las planchas gruesas, puede emplearse la costura de tope en forma de U.

Los párrafos anteriores, tomados unos de las normas, y originales de Kommerell otros, indican algunas diferencias entre la soldadura en puentes y los demás casos. Pero la diferencia esencial entre estas normas y las DIN 4100 estriba en el cálculo de la construcción en general y de la soldadura en particular. El cálculo, en el caso de las DIN 4100 no ofrece dificultad, pero esto no ocurre en el caso de puentes.

Los ingenieros que en Alemania no aceptan el empleo de la soldadura en puentes de ferrocarril, reconocen que su no aceptación es temporal, mientras se perfeccione lo suficiente este nuevo procedimiento, es decir, mientras no tengan una seguridad absoluta de la calidad de la unión soldada.

En esqueletos metálicos de edificios, no se ha divulgado mucho la soldadura debido a que gran parte de las uniones debe hacerse en el montaje. La economía de peso en este caso se acentúa, porque las fatigas admisibles no se reducen como para los puentes, y se tiene carencia de escuadras y esquineros de unión. Lo más frecuente es que se emplee, tanto la remachadura como la soldadura; la segunda, de preferencia, en el taller.

6.—VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SOLDADURA

Trataré de resumir a continuación las principales ventajas y desventajas de la soldadura con respecto a la remachadura. Las ventajas son las siguientes:

1. Desaparece el trabajo de taladrar huecos para remaches y la remachadura de éstos.

2. No hay debilitación de la sección debido a huecos para remaches; por esta causa, y por el hecho de suprimir las escuadras y esquineros de unión, se tiene una economía en el peso de 15 a 20%.

3. Si se trata de puentes en, o cerca, de una ciudad, los puentes soldados tienen la ventaja de ser más estéticos. (Este factor se tomó en cuenta en la construcción de los puentes del metropolitano de Berlín).

4. Desde el punto de vista estático, las construcciones soldadas se comportan en forma más satisfactoria que las remachadas.

5. Los marcos, que son a menudo empleados en construcción remachada, pueden ejecutarse más fácilmente mediante la soldadura.

6. En la construcción soldada se puede cambiar con mayor facilidad el espesor de las planchas (por ejemplo, el espesor del alma de una T y de sus platabandas).

7. Hay casos en que se puede soldar en puntos en que la remachadura sería notablemente difícil.

8. En las vigas de alma llena puede llegarse fácilmente a luces que en las remachadas serían imposibles.

9. La conservación de la soldadura es buena, en contraposición a la mala conservación de la remachadura.

Las principales desventajas son las siguientes:

- 1) La unión soldada es más cara que la remachada. La obra de mano por tonelada de construcción cuesta más para la soldadura.

2. La soldadura requiere obreros e ingenieros especializados, cosa que no ocurre en la remachadura.

3. La soldadura requiere un control riguroso, tanto de los materiales como de la ejecución de las costuras. Los medios de control son caros, cuando no se les utiliza en gran escala (control en serie).

4. En el caso de puentes de ferrocarril, la soldadura exige disminución de las

fatigas admisibles en el acero, lo que contrarresta en parte la ventaja de la economía de peso.

5. Soldar en el montaje es difícil.

6. Si bien una buena unión soldada tiene mayor resistencia que una remachada, un defecto en la primera tiene mucho mayor gravedad que un defecto en la segunda. En otras palabras, la soldadura no vale sino por su ejecución.

7. Es más difícil reducir el tiempo de ejecución de una construcción soldada.

8. La soldadura puede provocar tensiones residuales.

Si consideramos el caso de Alemania, vemos que las desventajas números 2, 3 y 5 carecen actualmente de importancia, pues existe ya en el país el personal especializado, tanto de obreros como ingenieros, y porque las grandes empresas, lo mismo que las Oficinas Fiscales disponen de los elementos de control. Tampoco tiene allí gran importancia el punto 5, porque las grandes empresas disponen, en general, de puertos de embarque propios, lo que les permite armar en el taller grandes trozos del puente, que son luego transportados al lugar del montaje. La red de canales del país facilita este transporte. A veces, las vigas de alma llena se llevan listas desde el taller. Estos factores explican el desarrollo de la soldadura en el país, además del bajo costo del acero.

En el caso de Bélgica, ocurre una cosa parecida. En cuanto al punto 3, ya hemos visto como lo han solucionado.

El punto 1 tiene menor importancia, ya que—si bien la obra de mano por tonelada de construcción cuesta más—el número de toneladas es menor.

En el costo del puente, tiene gran importancia la ubicación que tendrá éste, y la del taller en que se le construye. Si no hay facilidad de transporte, no podrán armarse grandes trozos en el taller, donde la soldadura y su control son más sencillos. Y éste es por ahora el caso de nuestro país.

El punto 7 se puede solucionar mediante el empleo de máquinas automáticas para soldar al arco, pero ésta se justifica sólo para trabajos en serie o para cordones de gran longitud. De todos modos, la máquina requiere un obrero que la maneje; al menos, un obrero para dos máquinas, si hay más de una.

Además, las ventajas y desventajas de la soldadura variarán según las condiciones locales de cada país. Nótese que en Alemania y Bélgica la comparación de costo se hacía entre un puente remachado y uno soldado, y se prefería el segundo. En nuestro país ocurre con frecuencia que un puente no metálico resulta más económico que uno metálico, y tanto el puente remachado como el soldado serían inaceptables. Influye en este caso la condición especial en que se encuentra nuestra moneda, lo que hace que el costo del acero sea muy subido.

La soldadura ha sido muy usada en refuerzo de puentes. Las ventajas del procedimiento son las siguientes:

1. El costo de un refuerzo mediante la soldadura es muy inferior al costo de un puente nuevo.

2. Técnicamente parece superior este refuerzo al de un parche remachado.

3. El trabajo por la soldadura presenta gran elasticidad; se le puede aplicar, tanto a trabajos de importancia como a refuerzos muy pequeños.

4. El trabajo se ejecuta sin interrumpir el tráfico y sin tocar los remaches ya existentes.

Las desventajas son las generales de la soldadura.

7. APLICACIONES DIVERSAS

Refuerzo de puentes.—Esta aplicación de la soldadura se ha desarrollado mucho, debido a la necesidad de reforzar los puentes ferroviarios, para el empleo de locomotoras de mayor peso y velocidad. En Europa, se han reforzado puentes mediante la soldadura en casi todos los países.

En la R. Argentina se ha verificado ya el refuerzo de numerosos puentes de ferrocarril; el primero de ellos, en 1933. La empresa del Ferrocarril Central de Córdoba tiene normas propias sobre la materia, que reglamentan, a más de la soldadura misma, la forma de efectuar los refuerzos. Han empleado sólo electrodos revestidos.

Cabe mencionar aquí las conclusiones de uno de los trabajos presentados al último Congreso de «Ponts et Charpentés» relativo a este tema. Dice: «1) El refuerzo de puentes de acero soldable por medio de la soldadura, es del todo admisible desde el punto de vista técnico. 2) Los elementos de construcción que tienen huecos de remaches rellenos con metal depositado por soldadura, pueden considerarse como no debilitados. 3) Los elementos de construcción que llevan pernos fijados por soldadura, pueden igualmente ser considerados como no debilitados. Este modo de ensamble puede emplearse a la vez con costuras de tope, de ángulo o de ranura.

Material rodante.—Todas las fábricas de vagones para ferrocarril emplean la soldadura. En Alemania, estiman la economía de peso en 10% en los boggiés, y 20% en la caja y chasis. Según la «Wagonfabrik», A. G., el máximo de economía obtenido en un chasis es de 27%. La soldadura ha permitido el empleo de perfiles que antes no se podían usar, por la imposibilidad de colocar los remaches. En las piezas muy solicitadas, sometidas a choques, esfuerzos repetidos, etc., se dimensiona la costura de tal modo que su resistencia sea por lo menos igual a la del metal de base. Las deformaciones, que tendrían aquí gran importancia, son evitadas o atenuadas por diversos medios o dispositivos prácticos. (Éstos están descritos en las revistas técnicas europeas).

Casi todos los automotores en servicio en Europa son totalmente soldados. Como ejemplo de ellos, el «Hamburgués Volante», con una velocidad máxima de 160 Km/h. Se comprende la importancia que tiene, para adquirir estas velocidades, la inercia del coche, lo que involucra su peso. Además, la disminución del peso disminuye las solicitaciones de los puentes, aún para velocidades mayores que las acostumbradas.

Estructuras metálicas.—Un buen ejemplo del empleo de la soldadura en estructuras lo constituye el Palacio de la Exposición de Bruselas, terminado en Marzo de 1937. En él se empleó en lo posible la costura de tope.

Como dato ilustrativo, doy las características y fatigas aceptadas para la soldadura en la construcción de hangares en Praga. Se usaron electrodos de dos tipos:

Cuando la luz del elemento era menor de 15 m. se usaba el tipo I, con una resistencia a la tracción de 38 Kg/mm², y un alargamiento de 12%. Cuando era mayor, el tipo II, con 42 Kg/mm², y 20% de alargamiento. Se usó St. 38; con fatigas admisibles de 12 Kg/mm². para tracción y compresión, y 8,5 para cizalle. Para los electrodos tipo I se aceptó 9 Kg/mm². para tracción, 11,4 para compresión, y 5,1 para cizalle y para los del tipo II, 10,2, 12 y 5,5 Kg/mm². respectivamente. Las costuras fueron hechas parte en taller y parte en montaje.

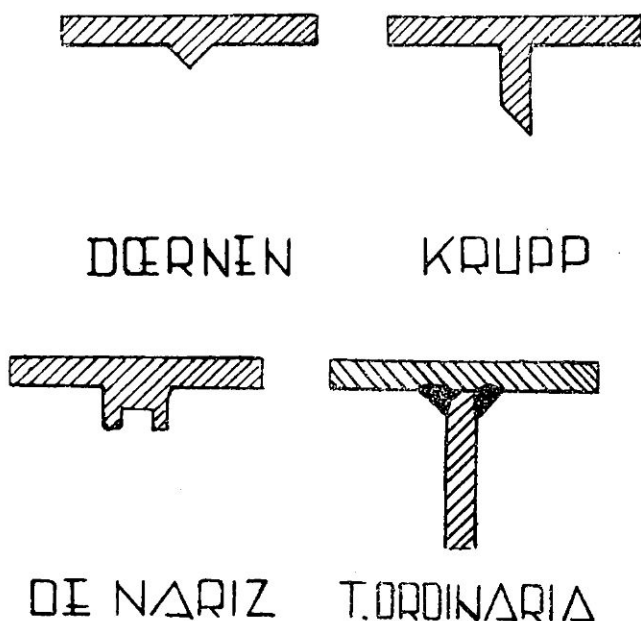


Figura 5.

Puentes.—A lo ya dicho sobre puentes soldados cabe agregar algo.

La preferencia que se ha dado en Alemania a las vigas de alma llena se debe a su gran sencillez, a que para ellas están resueltos en mayor grado todos los problemas técnicos, y a la dificultad que significa en los enrejados la tensión de encogimiento de la soldadura, y su mayor sensibilidad a las cargas no centradas.

Se han construido también puentes en los cuales todas las uniones del taller han sido soldadas; en cambio, en el montaje, se ha usado la remachadura. Al respecto las normas recomiendan en vigas soldadas de alma llena el empleo de la remachadura para aquellas uniones en que ésta ofrezca ventaja; por ejemplo, en la unión de los contravientos a las vigas maestras.

Mediante las costuras en x se puede variar con facilidad el espesor del alma de las vigas. Debe cuidarse que el paso de la costura al metal de base, y de un espe-

sor a otro del alma, sea gradual. El uso del esmeril es permitido para tener un paso más uniforme del cordón al metal.

En el comercio hay perfiles especiales para las platabandas, a fin de tener una fácil unión de ésta con el alma, y que se ven en figuras a), b) y c). Si la costura se ejecuta como en d), resulta la juntura en T ordinaria, cuya resistencia es baja.

En la unión de platabandas sometidas a tracción mediante costuras de tope, suelen usarse cubrejuntas de seguridad, aun cuando las normas no las exigen, capaces de absorber el esfuerzo en el caso de que se abriera la costura. Con un buen control del trabajo y de los electrodos, las cubrejuntas no son necesarias. Además, las normas prescriben fatigas menores para las zonas traccionadas.

En las costuras de ángulo debe evitarse el defecto de ángulo mediante el empleo de un electrodo más delgado para soldar la primera capa.

En las costuras de tope de planchas gruesas, se recomienda el empleo de la costura en X, soldando por capas alternadas a uno y otro lado del centro de la X. (Dos o tres capas a cada lado).

El empleo de la viga Vierendeel, en Bélgica especialmente, elegida a veces por razón de estética, presenta para la soldadura algunas ventajas. En primer término, la simplicidad y rigidez de los nudos. Además, las tensiones secundarias son nulas, mientras que en los sistemas triangulados pueden ser de 10 a 15% de las tensiones principales, debido a las grandes dimensiones de los esquineros o escuadras en los nudos, y al procedimiento de cálculo de estos sistemas. Por eso, para una misma fatiga admisible, la seguridad es superior en la viga Vierendeel, y a causa de la gran rigidez de los nudos, son menos flexibles que los puentes enrejados.

Como un buen ejemplo de este tipo de puente, puede darse el Puente Michalovce en Checoslovaquia. Es una viga Vierendeel de 52 m. de luz, de acero St. 38. Las fatigas aceptadas para el acero, en Kg/cm², fueron: tracción, $t = 850$; compresión, $c = 850$; y cizalle, $n = 700$; y para la soldadura 0,75, 0,90 y 0,50 respectivamente de estos valores. Esto, para las piezas del tablero. Para la viga maestra las fatigas admisibles para el acero fueron: $t = 870$; $c = 1150$; y $n = 700$; y para la soldadura 0,85, 1,00, y 0,60 respectivamente. Puente controlado por rayos X. Se emplearon electrodos belgas Arcos. La obra fué construída por Oficinas Fiscales. El trazado de las líneas de influencia se hizo por un procedimiento simplificado.

8. EL CALCULO DE LA SOLDADURA EN PUENTES

Aunque el procedimiento de cálculo en el caso de la soldadura no presenta una diferencia esencial con el de la remachadura, el Pliego de Puentes Soldados ha introducido algunos conceptos nuevos, que son de interés para los puentes metálicos en general, tanto soldados como remachados.

A base de las experiencias del «Reichs Kuratorium» sobre soldadura, el Pliego de Puentes Soldados ha introducido dos coeficientes, γ y α ; debido a los esfuerzos repetidos y alternados el primero; y específico de la soldadura, el segundo.

El coeficiente γ toma en cuenta la acción de los esfuerzos repetidos y alternados, de tal modo, que, una vez que se ha multiplicado por γ el máximo momento de flexión (máx. M) en la sección en estudio, se puede calcular, cual si se tratara de una sollicitación estática. Como se comprende γ será siempre mayor o igual que 1. El coeficiente α considera el tipo de costura, la calidad de la ejecución, y la influencia que en su resistencia tienen los esfuerzos repetidos o alternados. Al verificar las fatigas de una unión soldada, el máx. M debe dividirse por α ($\alpha < 1$). Por lo tanto, la fórmula de Navier, en el caso de puentes soldados, se transforma en

$$\sigma = \frac{\gamma}{\alpha} \frac{\text{máx } M}{W} \quad 1)$$

El valor de M es el debido a la carga fija, a la móvil considerando el ϕ , y a la fuerza centrífuga cuando ella existe. (Análogamente, al verificar el esfuerzo de corte, el valor de Q debe multiplicarse por γ/α). Para los esfuerzos secundarios (viento, frenaje, etc.) se considera γ igual 1).

El coeficiente γ fué introducido hace algunos años por el Pliego para Puentes Remachados. El valor de γ se dedujo de las experiencias del «Reichs Kuratorium» para los casos de $\alpha = 1$, que se presenta, por ejemplo, para los trozos sin uniones soldadas, y para las costuras de tope muy bien realizadas (calidad 1). Los valores obtenidos para el St. 37 coincidieron con los ya fijados para el caso de puentes remachados. Para el St. 52 hubo ligeras diferencias en los valores de γ , diferencias que no nos interesa analizar, dada la poca aplicación del St. 52 en soldadura.

Por lo tanto, el coeficiente γ , para St. 37 es el mismo ya fijado para puentes remachados (y que vino a reemplazar a la antigua fórmula $\sigma = \frac{\text{máx. } M - 0,3 \text{ min. } M}{W}$).

Los valores de γ dependen de la razón y del signo de $\frac{\text{min } M}{\text{máx } M}$ y se obtuvieron dividiendo el σ máx. admisible (14 para St. 37) por el σ_b obtenido experimentalmente para el caso en estudio. De las experiencias se dedujo que varía linealmente con la razón $\frac{\text{min } M}{\text{max } M}$, razón que designaremos en lo sucesivo por x . Se tiene así para γ la ecuación de una recta:

$$\gamma = a + bx \quad 2)$$

Basta aplicar esta ecuación a dos casos límites para fijar los valores de a y b . A saber:

Para min. $M = 0$ $\gamma_0 = 1$. Luego, $a = 1$ (Esfuerzos repetidos).

Para min. $M = -\text{máx. } M$ $\gamma_{-1} = 1,3$. Luego, $b = -0,3$ (Para este caso, la experiencia dió $\sigma_b = 10,8 \text{ Kg/mm}^2$ $\gamma_{-1} = 14/10,8 = 1,3$).

Así, pues, la ecuación que da los valores de γ , válida, tanto para puentes soldados como remachados, para St. 37 es:

$$\gamma = 1 - 0,3 x \quad 3)$$

Como la fórmula se dedujo para esfuerzos alternados, $\gamma \geq 1$. Para esfuerzos repetidos $\gamma = 1$, cosa que no ocurre para St. 52, en que se tienen fórmulas diversas según sea la intensidad del tráfico.

No es este coeficiente, sino α , el que introduce una diferencia real en los preceptos de cálculo. Si se hubiera basado directamente el cálculo en los resultados de las experiencias, se habría debido introducir un gran número de fatigas admisibles, dependientes del tipo de costura, de la calidad de la ejecución y de la razón x . Esta complicación se evitó con la introducción del coeficiente α . Mediante la introducción de los coeficientes α y γ , todas las fatigas se comparan con $\sigma = 1\,400 \text{ Kg/cm}^2$. El Pliego de Puentes Soldados no tiene así sino una sola fatiga admisible ($\sigma_{\text{ad}} = 1\,400 \text{ Kg/cm}^2$).

Para aclarar las ideas, es oportuno hacer notar aquí los conceptos de fatiga «efectiva», y fatiga «considerada». Si para una costura cualquiera se obtiene, mediante la fórmula de Navier, por ejemplo, una fatiga σ , ésta es la fatiga efectiva. La fatiga considerada, σ_{d} , se relaciona con la σ por la ecuación:

$$\sigma_{\text{d}} = \frac{\gamma}{\alpha} \sigma \quad 4)$$

Si para dicho punto la fatiga efectiva es 700 Kg/cm^2 , y el pliego da para dicho caso $\gamma = 1,2$ y $\alpha = 0,65$ la fatiga considerada será:

$$\sigma_{\text{d}} = \frac{1,2}{0,65} \cdot 700 = 1\,290 \text{ Kg/cm}^2$$

Y a la inversa, si para este caso se desea conocer la máxima fatiga efectiva que la costura puede sufrir, siendo $\sigma_{\text{ad}} = 1,400$ para todos los casos, se tiene:

$$\sigma_{\text{ef.}} = 1\,400 \cdot \frac{0,65}{1,2} = 760 \text{ Kg/cm}^2$$

Los resultados de las numerosas experiencias verificadas con uniones soldadas, fueron resumidos en un gráfico, del cual—a su vez—se obtuvieron los valores de α , que fueron tabulados para facilitar su uso.

Los valores de α se fijaron de tal modo que a las partes sin uniones soldadas, o con cordones laterales continuos correspondiera $\alpha = 1$. Comparando los valores que da el gráfico para cada costura, con la fatiga admisible que da para el caso de $\alpha = 1$, se obtuvieron todos los valores de α . Con gran aproximación, se tiene para α la misma fórmula general que para γ :

$$\alpha = a + bx \quad 5)$$

Esta ecuación es la de una recta, pero los valores de a y b cambian según el tipo y calidad de la costura, y según el signo y valor de x . Se comprende que para los casos en que—por definición— $\alpha = 1$, $a = 1$ y $b = 0$.

Si en la ecuación 4 hacemos $\alpha = 1$, se obtiene la fórmula: $\sigma_b = \sigma / \gamma$ fijada hace algunos años por el Pliego para Puentes Remachados.

Para las costuras de ángulo, el coeficiente α es constante, y vale 0,65. Para las costuras de tope es mayor, cosa que se podía decir a priori, basándose en los resultados del Informe del R. Kuratorium.

Las costuras de tope de primera calidad, sometidas a tracción, tienen $\alpha = 0,8$. Sometidas a compresión, tienen $\alpha = 1$ para esfuerzos repetidos, y $\alpha = 1 + 0,2x$ para esfuerzos alternados.

Para la verificación al esfuerzo de corte de las costuras de tope del alma, α vale 0,65 en todos los casos.

Los valores de α son siempre mayores o iguales para esfuerzos repetidos que para esfuerzos alternados. De aquí se induce que el empleo de la viga continua ofrece menores ventajas en el caso de soldadura que en el de remachadura (esfuerzos alternados en la viga continua; esfuerzos repetidos en la viga isostática). Para el St. 52 resulta—en general—inadmisibles el uso de la viga continua, pues requeriría un W mayor que la viga simplemente apoyada, ya que los valores de α pueden bajar hasta 0,55 y γ es con frecuencia igual o mayor que 1,5.

En los cálculos, basta con tomar α y γ con dos cifras decimales. De la correcta elección del coeficiente α depende la seguridad de la obra. Y, a la inversa, el conocimiento previo de los valores de éste, indica la disposición a emplear, a fin de mejorar su valor.

Una novedad del Pliego de Puentes Soldados, es la exigencia de verificar las fatigas principales para algunas costuras, de acuerdo a fórmulas prescritas por él, y con valores de α que pueden llegar a $\alpha = 1,1$. Se explica aquí este valor de α mayor que 1, ya que se trata sólo de una fatiga de comparación.

Las costuras de tope, (unión de las platabandas, uniones del alma, etc.), se realizan sin cubrejunta alguna, y son las de mayor importancia en la obra. En ellas, el cálculo se reduce sólo a una verificación de la fatiga. Si ésta resulta mayor que la admisible, debe cambiarse el lugar de la unión, o el espesor de las planchas. Como el valor de α baja a 0,8 para las costuras de tope tendidas, ello implica un menor aprovechamiento del acero en ese punto. Sin embargo, con una buena disposición de las uniones; es decir, eligiendo para ellas los sitios menos fatigados, no hay un recargo de material por este concepto. Y al respecto, la tendencia actual es al empleo de platabandas largas y gruesas (una sola gruesa en lugar de dos o más delgadas), a fin de disminuir el número de costuras.

Las costuras de ángulo (uniones de los contravientos, platabandas adicionales, etc.), son de importancia secundaria. El cálculo en ellas no es de verificación de fatigas, sino de determinación del cordón necesario. Por ejemplo, para la unión de un contraviento que trabaja a tracción, si la sección de éste es F , la soldadura de unión deberá tener una sección F_s dada por:

$$F_s = F/0,65 \quad (\alpha = 0,65 \text{ y } \gamma = 1 \text{ para elementos secundarios}).$$

Si el perfil trabaja a pandeo, para un esfuerzo de S tons., la sección necesaria de soldadura será:

$$F_s = \frac{S}{0,65 \cdot 1,4} \quad (\alpha = 0,65 \quad \sigma = 1,4 \text{ T/cm}^2).$$

Como el largo de los cordones queda en general fijado por razones constructivas, es fácil determinar el espesor de éstos, a fin de tener la sección F_s necesaria.

De esta exposición relativa al cálculo de la soldadura, exposición que necesariamente debió ser muy resumida, se deduce que es inadmisibile calcular los puentes soldados de acuerdo a las D. I. N. 4,100 como se hizo en un comienzo. En las D. I. N. 4,100 no existe el coeficiente α . Recíprocamente, no se justifica económicamente el cálculo de una estructura soldada de acuerdo al pliego de puentes.

El coeficiente α no se ha introducido para el Pliego de Puentes Remachados; pero, experiencias recientes han demostrado que el hueco del remache (al igual que la soldadura), significa un punto débil de la obra, ya que tiene influencia como punto de partida para ruptura motivada por esfuerzos alternados. Así, pues, en el estado actual de la cuestión, son mucho más rigurosos los preceptos de cálculo en el caso de la soldadura que en el de la remachadura. No sería raro que en breve, el coeficiente α sea también introducido en el Pliego para Puentes Remachados.

BIBLIOGRAFIA

- O. KOMMERELL.—«Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweisste Stahlbauten».
LINCOLN ELECTRIC CO.—«Procedure Handbook of arc welding design and practice».
Revista Arcos, «Revue des applications de la soudure a l'arc». Bruselas.
Revista «Electric Welding». Londres.
Informes presentados al Congreso Internacional de Puentes de Octubre de 1936
por los ingenieros O. KOMMERELL y G. DE CUYPER.
Normas alemanas y belgas para soldadura eléctrica y para puentes soldados.
Publicaciones sobre soldadura eléctrica de los ingenieros K. KLOPPPEL, R. BERTHOLD,
y G. BIERETT (Berlín); y G. DE CUYPER y D. ROSENTHAL (Bruselas).