

La soldadura eléctrica

1.—GENERALIDADES

Como no existe aún en castellano una definición precisa de los términos que con la soldadura se relacionan, conviene definirlos previamente. En lo que sigue, se entenderá por soldadura a esta técnica en general; por costura o cordón, a la unión soldada misma; por electrodo, a la barra o alambre conductor eléctrico que sirve para soldar; por metal de aporte, al depositado por el electrodo (que los franceses llaman «metal d'apport», y que las normas alemanas han traducido por «metal de aportación»); por metal de base, al de las piezas que se van a unir; por barras o planchas los elementos que se van a unir; por soldador, al obrero que ejecuta la soldadura; y por montaje, al lugar en que—en definitiva—quedará la construcción soldada.

Aunque esta técnica cuenta ya con muchos años, las aplicaciones que interesan a la ingeniería no datan de más de unos doce años. A partir de 1927 comenzó a usarse la soldadura en reemplazo de la remachadura en las obras de ingeniería. Fueron EE. UU. y Alemania los países que primero la emplearon en la construcción de puentes. Como ventaja principal se indicaba una economía en el peso de 10 a 20%; como desventajas, el mayor costo de la unión soldada respecto a la remachada, su mayor dificultad de ejecución, y la inseguridad que esta innovación significaba. El año 1929 se construyeron también en Bélgica puentes soldados, de luces cercanas a 30 metros. Este mismo año en Estados Unidos, y el año siguiente en Alemania, se publicaron por primera vez un conjunto de normas y recomendaciones relativas al empleo de la soldadura en las construcciones de acero. El año 1931 se dió a conocer en Alemania el pliego de prescripciones oficiales para las construcciones soldadas, que indicaba algunos preceptos de cálculo. Desde ese momento, se produce un desarrollo muy rápido de esta técnica, hasta el día de hoy, en que se la emplea en todas las ramas de la grande y pequeña industria; la construcción por la «Reichsautobahn» (Oficina Fiscal de Caminos) de un gran número de puentes soldados, terminó por vencer toda desconfianza. Actualmente, —y ahora como en todo lo que siga me referiré al estado de la cuestión en Abril de 1937—hay normas definitivas para construcciones metálicas elevadas, soldadas «Hochbau», y provisorias para puentes soldados de ferrocarril de alma llena.

En general, la introducción de las uniones soldadas en las construcciones entraña modificaciones en los métodos de cálculo. Debe evitarse, en lo posible, el empleo simultáneo de la soldadura y la remachadura en las construcciones nuevas.

Los procedimientos de soldadura aceptados por las normas son:

- 1) Por el arco voltaico (con corriente continua o alterna).
- 2) Eléctrica de resistencia.
- 3) Con gas.
- 4) Combinadas de gas y electricidad.

La primera que se conoce con el nombre de soldadura eléctrica es la que ofrece mayor interés.

En la soldadura eléctrica por resistencia, las piezas se calientan por efecto Joule y de acuerdo a su resistencia óhmica (de ahí el nombre); un buen ejemplo de ella es la soldadura de rieles de tranvía y ferrocarril llamada «a tope y fusión por resistencia».

La soldadura a gas, o autógena, pierde cada vez más su importancia en relación a la eléctrica; para el obrero, ofrece mayor dificultad que ésta. La más empleada es la oxi-acetilénica.

Hay otros tipos de soldadura a los cuales no me referiré. Esta materia es ya demasiado amplia para una exposición de carácter general.

El acero de 37 a 44 Kg/mm², es perfectamente soldable por todos los procedimientos conocidos. Los aceros de alta calidad tienen composición muy variable, y requieren un estudio especial en cada caso. Su soldabilidad depende de su composición. Es muy perjudicial el contenido de más de 0,3% de carbono. El azufre y el fósforo no deben pasar de 0,04% cada uno, ni de 0,06% en total. El fósforo, por debajo de ese límite, no daña la soldabilidad; el azufre es siempre dañino, pues favorece la absorción de oxígeno cuando el acero está al rojo. El silicio, sobre 0,3% puede producir soldaduras porosas. Níquel, cromo, vanadio, wolframio y molibdeno aumentan la soldabilidad y la resistencia del acero a los ataques químicos. Zinc, aluminio y titanio disminuyen la soldabilidad.

El St. 52 (acero cuya resistencia a la ruptura es de 52 Kg/mm²), no suelda tan bien como el St. 37. Cuidando que el electrodo tenga una composición semejante a la del acero, y que la soldadura no sufra un enfriamiento brusco, se obtienen costuras tan buenas como con el St. 37.

No entraré en detalles sobre otros tipos de soldadura que existen, ni sobre la soldadura de otros metales, porque no tienen interés para nosotros.

En lo que siga, al hablar de soldadura, me referiré a la soldadura al arco por el sistema llamado de Slawianof, que es el universalmente empleado. En él, el arco se produce directamente entre el electrodo—que deposita la materia que lo constituye—y la barra por soldar; el obrero, emplea una mano para soldar y la otra para sostener la pantalla de protección. En corriente continua, el polo negativo se

conecta al porta-electrodo y el positivo a la plancha, aunque también se puede soldar usando la polaridad inversa.

Para soldar, se necesita un transformador de soldadura. Estos tienen en su secundario un voltaje de 65 a 90 volts, en vacío. Durante el trabajo, el voltaje cae a unos 25 volts, que representa la tensión en los extremos del arco. El coseno φ de estos transformadores es muy bajo, lo que ha hecho que algunas empresas de electricidad recarguen el precio de venta de la energía que ellos consumen. El rendimiento depende del tipo, pero no pasa de 80%, y puede bajar hasta 55%. La corriente tiene valores muy variables que dependen de las condiciones de la costura. Si se trata de una costura vertical, la corriente no pasa de 150 amperes; en las costuras en posición horizontal es, con frecuencia, mucho mayor. El consumo de energía es mayor para la costura en posición vertical.

Cuando el caso lo requiere, los fabricantes venden el grupo motor-generator, que da directamente el voltaje adecuado.

2.—DISPOSICION Y CALCULO DE LAS COSTURAS

Hay sólo dos disposiciones de importancia: la costura de tope y la de ángulo. Según el pliego alemán «Prescripciones para las construcciones metálicas elevadas soldadas», que tiene la designación DIN 4100 hay también un tercer tipo: las de ranura.

En la figura 1 pueden verse los dos tipos de costuras.

El empleo de la costura de tope (que los franceses designan con el nombre muy gráfico de «bout a bout») se inició en calderería. Su cálculo se limita a una simple comparación entre su resistencia específica y la de las piezas que une, ya que la sección es la misma para la barra que para la costura. Si ésta se hace con electrodos de calidad, su resistencia será igual o superior a la de las barras o planchas, y se obtendrá así la llamada «juntura a 100%».

La costura de tope puede hacerse en forma de V, de X o de U. Si las planchas son delgadas, y no se hace chaflán alguno se tiene la costura en I.

La costura de tope es de empleo mucho más reciente que la de ángulo. Se la usa cada vez más en la construcción soldada, porque resiste muy bien los esfuerzos repetidos y alternados.

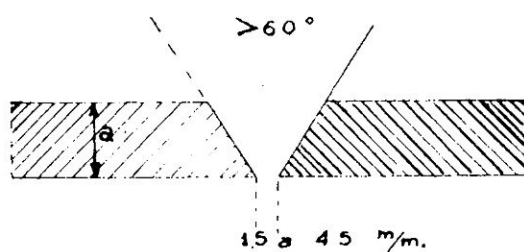
La costura de ángulo es aquélla hecha según el ángulo natural de las piezas por soldar. El perfil más empleado es el cordón isósceles plano o ligeramente bombeado; el soldador tiende naturalmente a él, y es el más económico. Hay peligro de que se presente el llamado «defecto de ángulo», que se debe a la no penetración de la soldadura en el fondo del diedro. (Debido a ello, las DIN 4100 omiten para los cálculos de resistencia las costuras de ángulo, cuyos lados forman entre sí un ángulo menor de 70 grados).

Las costuras de ranura carecen de importancia.

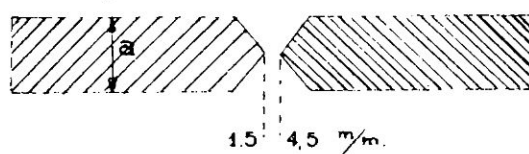
Los cordones mismos, con respecto a la dirección del esfuerzo que los solicita, pueden clasificarse en tres grupos:

- a) El cordón frontal, cuya dirección es perpendicular al esfuerzo de sollicitación.
- b) El cordón lateral, cuya dirección es paralela al esfuerzo.

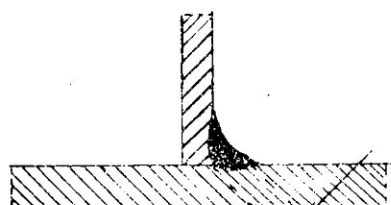
COSTURA DE TOPE EN V.



COSTURA DE TOPE EN X.



COSTURA DE ANGULO DEBIL



COSTURA DE ANGULO BIENO

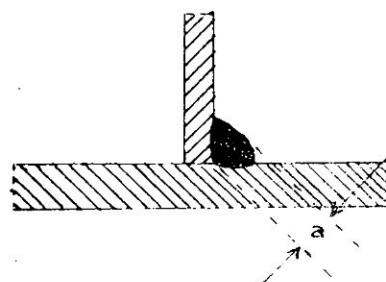
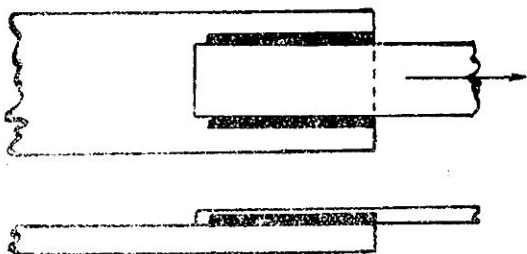
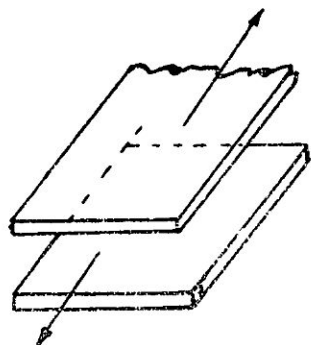


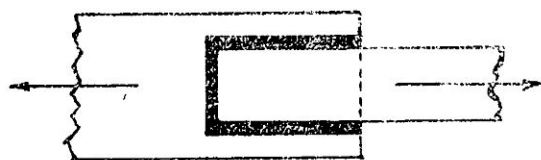
Figura . 1 .

c) El cordón oblicuo, que es intermedio entre ambos.

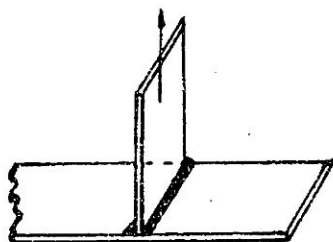
En la figura pueden verse, en esquema los diversos tipos de cordones. Todas las costuras son de ángulo.



CORDONES LATERALES



CORDONES COMBINADOS



CORDON FRONTAL

Figura 2.



Figura 3.

Cálculo de los cordones. (*Solicitaciones estáticas*).—La repartición de tensiones en los cordones frontales que forman parte de ensambles que trabajan a tracción, ha sido estudiado por foto-elasticidad y por experiencias directas. El estudio mostró que la carga se reparte uniformemente en forma de tensiones normales en la sección bisectriz del ángulo formado por las piezas. Por lo tanto, se pueden calcular los cordones frontales como si trabajaran a tracción en la sección bh , bajo una tensión uniformemente repartida. Así, la resistencia del cordón se reduce al caso simple de una barra tendida. Nótese que la resistencia de la costura es proporcional a la altura ab del cordón. El triángulo abc es en general isósceles.

Para los cordones laterales, no ha sido posible reducir su sollicitación a un caso tan simple; pero, en la prueba de ruptura todo ocurre como si el cordón cediera a un esfuerzo de cizalle en el plano bisector del ángulo diedro de las piezas soldadas.

Las experiencias directas de cordones laterales han establecido las resistencias específicas de ellos, para las dimensiones corrientes de cordón, y para electrodos conocidos. La resistencia por unidad de largo del cordón crece menos rápidamente que la altura de éste. Ello puede observarse en la tabla siguiente, tomada de la revista «Arcos» (Bruselas), y en que se trata de cordones isósceles planos o ligeramente bombeados.

RESISTENCIAS A LA RUPTURA DE SOLDADURAS PARA ESTRUCTURAS

Espesor del cordón en mm.	Altura del cordón en mm. medida paralelamente a la pieza	Cordón frontal	Cordón lateral	α en gr. y en minutos
I	II	III	IV	V
1,5	2,1	560	439	38,05
2	2,8	745	581	37,59
3	4,2	1115	863	37,45
4	5,6	1485	1136	37,25
6	8,4	2230	1644	36,24
8	11,2	2970	2050	34,37
10	14	3720	2350	32,17

Las cifras están en Kg. por cm. de largo de cordón.

Se emplearon electrodos Arcos.

De los valores de la tabla se pueden deducir fácilmente las resistencias de ruptura en Kg/cm². Así, por ejemplo, para el cordón de 1,5 mm. de espesor, se tiene como resistencia en el caso de cordón frontal 3730 Kg/cm². (560:0,15), y 2930 Kg/cm². en el caso de cordón lateral (439:0,15).

El caso de los cordones oblicuos no se puede reducir a una forma tan simple como los dos anteriores. En la sollicitación intervienen la tracción y el cizalle, que no pueden evaluarse con certeza. El cálculo se hace según la hipótesis que sigue,

y que deja un margen de seguridad, pues no representa la utilización del máximo de la resistencia.

Los cordones inclinados de O hasta un cierto ángulo α con respecto a la dirección del esfuerzo, se consideran como cordones laterales, cuyo largo es la proyección del cordón sobre la dirección del esfuerzo. Los cordones inclinados de α a 90 grados se calculan como cordones frontales, cuyo largo es igual a la proyección del cordón sobre una normal al esfuerzo. El ángulo α es tal que se encuentre la misma resistencia con uno u otro método, para un cordón que tenga esta inclinación especial. El ángulo α varía con los espesores de cordón, según puede verse en la tabla. Sólo para el valor α se encuentra utilizada al máximo la resistencia del cordón.

Nótese en la tabla y dibujos anteriores que el espesor del cordón es la dimensión bh , altura del triángulo rectángulo; y su altura, la dimensión ab . Sí—como es el caso más corriente—el triángulo es isósceles, se tiene que ab es igual a $bh \sqrt{2}$, relación que se observa entre las columnas I y II de la tabla.

Cuando se emplean simultáneamente cordones frontales y laterales se habla de cordones combinados, y es necesario reforzar el conjunto para compensar una cierta merma. Esta es más sensible para los perfiles y puede despreciarse para las planchas. Esta merma proviene de que los dos tipos de cordones tienen diferentes capacidades de deformación a la ruptura, y no absorben una parte del esfuerzo total proporcional a su resistencia. Los cordones frontales, a causa de su mayor rigidez son los más solicitados y conviene reforzarlos de 10 a 20% ; o—si sus dimensiones están impuestas por las de la barra misma (caso frecuente)—hacerlos trabajar menos, lo que equivale a alargar los cordones laterales en la misma proporción.

Respecto a las resistencias dinámicas, los ensayos de choque han mostrado que, cuando se emplean las costuras que tienen igual resistencia estática que las piezas que sueldan, la resistencia dinámica de la junta es mayor que la de la pieza soldada. Al hacer el cálculo de una unión soldada, debe darse, en lo posible, a la junta una resistencia a la ruptura al menos igual a la de las piezas que une. De este modo, se tiene el mismo coeficiente de seguridad para el ensamble que para la barra; y si para ésta se han considerado los efectos de choque, vibración, etc., ellos quedan incluidos implícitamente en el cálculo de la soldadura. Para determinar el espesor del cordón, sirven las tablas análogas a la indicada más arriba.

Nótese que para unir dos planchas es más económico el empleo de cordones largos y finos en lugar de cordones cortos y gruesos de igual resistencia. En efecto, la resistencia de los cordones frontales crece linealmente con el espesor de éste; en cambio, el volumen de la soldadura (lo que involucra el número de electrodos, la corriente y el tiempo de ejecución) crecen con el cuadrado del espesor. Se comprende que esto se acentúa en el caso de cordones laterales. De aquí que, por regla general, los cordones laterales se calculan con el máximo de recubrimiento que se puede dar a las barras. Por la misma razón se prefiere, en el caso de vigas de alma llena formadas por varias planchas, las soldaduras largas finas y continuas a las gruesas y discontinuas.

Para dimensionar la costura de unión de dos planchas, se sabe que su resistencia debe ser igual a la de éstas. Con ello queda fijado el esfuerzo que la costura debe transmitir por cm. de largo; la tabla da el espesor del cordón.

En el caso de unir dos planchas, se puede elegir a voluntad cordones frontales o cordones laterales, y el cálculo no ofrece dificultad. Si la plancha más pequeña tiene una sección en corte S y su resistencia a la ruptura es σ , y que se la une mediante dos cordones de largo l , la resistencia que debe tener el cordón por cm. de largo será;

$$\rho = \frac{S \sigma}{2l}$$

Conocido ρ , la tabla da el espesor.

Este es el caso de la figura 2 c, en que la plancha II va unida a la plancha I mediante dos cordones laterales de largo l . En este caso, se entra en la columna IV de la tabla con el valor de ρ y en la I se tiene el espesor de cordón necesario.

Si se trata de unir un perfil ángulo, por ejemplo, no se puede asegurar el empleo de un solo tipo de cordón, ya que no sabemos si el desarrollo de éstos será suficiente para tener la misma resistencia de la barra: esto ocurre en especial si se quiere emplear sólo cordones frontales. Si se emplean en este caso dos cordones laterales, debe tratarse que éstos absorban esfuerzos en una proporción tal que la resultante de los esfuerzos quede en el eje neutro del perfil. Y no debe olvidarse, al dimensionar, que la altura del cordón al borde del perfil no puede ser superior al espesor de éste. (Si el espesor de un cordón es a , su altura es $a/\sqrt{2}$).

El cordón frontal de la figura 2 d, podrá tener como máximo una longitud igual al ancho de la plancha 2, y como altura máxima, el espesor de la plancha II.

Para el caso de compresión el cálculo es análogo, pero debe tomarse para las barras comprimidas su sección reducida, si hay peligro de pandeo.

En el caso de costuras que sirven para unir las platabandas al alma de una doble T, (viga de alma llena, por ejemplo), se suelda sin necesidad de fierros ángulos o escuadras. Como el cálculo da cordones de muy pequeño espesor, en la práctica se da a éstos la misma sección de cizalle que el alma. Por ejemplo, para unir un alma de 2 n mm. de espesor a su platabanda, se usan dos cordones de n mm. cada uno.

Las soldaduras trabajan al cizalle como cordones laterales, y pueden calcularse al esfuerzo cortante del mismo modo que se calculan los remaches de las vigas remachadas.

El modo de calcular expuesto, que podríamos llamar directo, válido sólo para estructuras, es útil para los casos sencillos, y se uso en especial cuando no había normas oficiales que fijaran las fatigas admisibles para cada caso. Es el que recomiendan hasta hoy día algunas revistas belgas.

Al dimensionar, el problema es, en general, indeterminado, y hay que darse, según el caso, la parte del esfuerzo que absorbe cada cordón; o su largo, o su espesor. Fijado el uno, el otro queda determinado. En los cordones frontales, el alto

suele quedar fijado por el espesor de una de las barras (caso del cordón frontal de la fig. 2 y el largo, por el ancho de la barra.

Actualmente para estructuras, el cálculo es aún más simple: si la costura tiene un largo l , y un espesor a , y la fatiga admisible fijada por las normas es σ , es capaz de transmitir un esfuerzo P dado por

$$P = al\sigma$$

Las normas fijan los valores de σ según el tipo de costura y de sollicitación, y—en algunos casos—los de l que pueden ser menores que el l real.

En la práctica, se da el nombre de cordones a las costuras que tienen la posición que se ve en la fig. 2 d. pero no se emplea esta designación para el caso de la fig. 2 a. Todas las costuras que aparecen en fig. 2. son de ángulo.

Al proyectar, puede ocurrir que sirvan para la soldadura las mismas formas constructivas que se emplean en remachadura, pero existen diferencias. Por ejemplo, debido al menor peso, se puede admitir para vigas de alma llena soldadas una mayor luz. Y a la inversa debido a la facilidad para obtener empotramientos perfectos, las vigas sin diagonales del sistema Vierendeel, pueden llegar a ser económicas para luces inferiores a las que se aceptan en remachadura.

Los esfuerzos en las barras se calculan del modo habitual. O sea, se acepta para los enrejados la hipótesis de articulación en los nudos. (Las experiencias del Prof. Dustin, de la Universidad de Bruselas, demostraron que no se podían considerar estas barras como encastradas en los extremos, pese a la rigidez del conjunto).

Para las barras tendidas, el cálculo es muy simple, ya que no hay agujeros. Se comprende la economía de peso que deriva del hecho de considerar toda la sección de la barra como sección útil.

Para las barras comprimidas, que deben calcularse al pandeo, se admite también la hipótesis de articulación en los extremos; o sea, se toma la distancia de nudo a nudo como largo de pandeo. En verdad, hay cierto empotramiento.

Para las piezas flexionadas, los I y los W (momentos de inercia y de resistencia) se calculan para la sección plena. En los casos de vigas fijadas sobre columnas, se pueden considerar las piezas como empotradas, siempre que se calculen los ensambles y las columnas de acuerdo con ello. De igual modo, si se trata de longuerinas de puentes, se las puede considerar como vigas continuas sobre varios apoyos, siempre que se tenga en cuenta este hecho al calcular sus ligazones.

Actualmente, todos los cálculos se hacen siguiendo las prescripciones oficiales de cada país. Las *DIN 4100* fijan las fatigas admisibles de las costuras, como una fracción de las del material que unen. Para las costuras de tope prescriben: para tracción 0,75; para compresión 0,85; para flexión 0,8; y para cizalle 0,65 de la fatiga admisible en cada uno de estos casos para el metal de base.

Para costuras de ángulo (que incluye cordones frontales y laterales) y para cualquier clase de esfuerzo, la fatiga admisible es 0,65 de la del metal de base.

Esto, para estructuras. Más adelante se aludirá al procedimiento de cálculo en el caso de puentes.

Tensiones de deformación y encogimiento.—Cabe mencionar aquí las tensiones residuales que puede motivar la soldadura al arco. Lo que interesa al constructor es saber si se debe o no tomar en cuenta estas tensiones en el cálculo de una construcción soldada. El Ing. D. Rosenthal, Bruselas, ha hecho estudios detenidos sobre este tema; como conclusión indica que se puede prescindir de estas tensiones para el cálculo.

Si a una construcción soldada se la somete a una sollicitación exterior estática, las tensiones que ella produce se suman algebraicamente a las tensiones residuales de encogimiento. Estas últimas son puntos de tensión locales. Ahora bien, el autor demuestra que el límite elástico de estas fibras más sollicitadas baja. Si el esfuerzo total que sollicita esta fibra sobrepasa este límite elástico, la fibra se alargará plásticamente. Si la sollicitación exterior sigue creciendo, llegará un momento en que todas las fibras pasarán al período plástico, y las tensiones de encogimiento desaparecerán. En efecto, al cesar la tensión exterior las fibras anteriormente fatigadas debido a la tensión de encogimiento, conservan una deformación plástica y no sufren ya de parte de las fibras vecinas ninguna tensión interna.

Esto ha sido verificado experimentalmente. Hay una disminución importante de las tensiones residuales (que los franceses llaman «tensión de retrait» y que los alemanes llaman «Schrumpfspannungen») después de la puesta en carga de probetas soldadas. Así se explica que ciertos autores hayan indicado la conveniencia de someter las construcciones soldadas, antes de entregarlas al servicio, a una sollicitación que pase el límite elástico, para hacer desaparecer las tensiones residuales. En la práctica, esta medida no parece necesaria; las sollicitaciones que la construcción sufre durante el montaje disminuyen estas tensiones a valores no peligrosos. Y con la primera sobrecarga desaparecen del todo.

El autor demuestra que también se puede prescindir de las tensiones residuales en el cálculo de la soldadura para el caso de esfuerzos alternados.

El caso más conocido de deformación es el de la unión del alma a la platibanda de una T: si no se toma precaución ninguna la platibanda se curvará hacia el alma.

El autor enumera la forma de remediar las deformaciones, con remedios aplicados antes, durante o después de la soldadura y que tienden—según el caso—a compensar, impedir o localizar este defecto. Todos ellos son dispositivos prácticos. El autor recalca que los métodos que expone (que se encuentran reproducidos en la revista «Arcos», 1936), son sólo cualitativos, y que la complejidad, en casi todos los casos de la práctica, del estado de tensiones y deformaciones de encogimiento, hace casi imposible la evaluación cuantitativa del esfuerzo y, por lo tanto, del remedio que se va a emplear.

Como recomendaciones generales para disminuir estas tensiones se tienen:

1) Efectuar las costuras según un plan determinado. Las costuras de mayor importancia deben ser las últimas en ejecutarse.

- 2) Evitar el uso de espesores de cordón innecesarios (por ejemplo, en los travientos de un puente).
- 3) No emplear corrientes muy altas.

3.—LOS ELECTRODOS

Hay electrodos desnudos y revestidos. Los primeros no son recomendables, sobre todo en estructuras soportantes.

Los electrodos desnudos sueldan con facilidad en cualquier posición, pero dan un arco menos estable, mayores pérdidas de material al soldar y una costura de calidad deficiente para solicitaciones dinámicas.

Los revestidos satisfacen bien todas las exigencias; tienen el inconveniente de hacer difíciles las soldaduras que no sean en posición horizontal o con un ángulo cercano a ella. El objeto del revestimiento es evitar que el metal fundente se ponga en contacto con el oxígeno y el nitrógeno del aire. Además, el revestimiento protege el metal vecino a la costura y evita un enfriamiento demasiado rápido de ésta. Al soldar, el revestimiento se va depositando en forma de una escoria que cubre la soldadura y que luego se retira sin dificultad. En los EE. UU., para estructuras soldadas, se usan exclusivamente electrodos revestidos.

Hay un tercer tipo de electrodos, los llamados de alma. Tienen propiedades intermedias entre los anteriores. Las normas alemanas los agrupan entre los desnudos. Son ligeramente revestidos.

Se sabe que para obtener una buena soldadura se requieren, entre otras, las siguientes condiciones: Que no haya un calentamiento excesivo del metal de base; que el metal fundente no se ponga en contacto con el aire; que el metal de aporte sea depositado en forma uniforme (lo que exige estabilidad del arco). Los electrodos revestidos cumplen estas condiciones.

En aplicaciones de poca importancia son muy empleados los electrodos desnudos, porque su precio es sólo una fracción del de los revestidos. (En Chile, hasta ahora se han usado casi exclusivamente los electrodos desnudos). El metal de base junto a la costura, puede quedar quebradizo. Estos electrodos requieren mayor corriente para fundirse.

Si se conecta el polo negativo al electrodo, los electrones pasarán de éste a la plancha. Si se usa la polaridad inversa, no habrá un haz concentrado de electrones, ya que éstos irán de la plancha a cualquier punto del electrodo: hay mayores pérdidas de calor y se requieren corrientes más altas. Debido a ello, no conviene usar los electrodos desnudos con corriente alterna, ni usar corriente continua con polaridad inversa. Con electrodos revestidos, la polaridad no tiene influencia.

Un buen electrodo debe tener un bajo punto de fusión, para poder usar corrientes más bajas y evitar recalentamiento del metal de base. Su escoria debe poderse retirar con facilidad, cuando se enfría. Con frecuencia el revestimiento va en espiral, a fin de que se deposite en forma correcta y uniforme.

La composición del electrodo y del revestimiento son secretos de fabricación. El fabricante indica las características de resistencia de cada tipo de electrodo, la corriente en amperes que debe usarse al soldar y la clase de trabajo para el cual el electrodo es adecuado. Como ejemplos de electrodos daré a continuación las características de dos electrodos «Arcos», de calidad:

Arcos Stabilend, para acero de 37 a 44 Kg/mm.²

Resistencia: 46 Kg/mm.²

Límite de elasticidad: 34 Kg/mm.²

Estricción de ruptura: 56%.

Alargamiento: A5d. 33%.

Resiliencia Charpy: 10 Kgm./cm.²

Corriente: 200 a 280 amp. (para 5 mm. de diámetro).

Arcos, para acero de 60 a 100 Kg/mm.²

Resistencia: 60 a 75 Kg/mm.²

Alargamiento: 9 a 15%.

Resiliencia Charpy: 4 a 8 Kgm./cm.²

Dureza Brineel: 200 a 350 grados.

Corriente: 200 a 220 amperes.

El alargamiento se mide sobre una probeta de longitud igual a 5 veces el diámetro.

Como se ve, las características cambian según el acero. Un acero especial requiere un electrodo especial. Hay electrodos para aceros al cromo, al manganeso, al níquel, etc. El último de los indicados más arriba es para aceros altamente carburados.

La velocidad con la cual un electrodo permite ejecutar un trabajo de soldadura tiene gran influencia en el precio de éste. Este factor queda dado mediante el coeficiente de fusión, que es característico de cada electrodo. El coeficiente de fusión de un electrodo es el depósito de metal por ampere y se le mide en cm. por ampere y por hora (o por 1,000 amperes y por minuto).

En la determinación del tiempo interesa también el rendimiento. Si se funde un electrodo, no se aprovecha el total del metal que éste contiene; hay una serie de pérdidas. El rendimiento depende de una serie de factores; pero, experimentalmente, se han deducido como valores medios los siguientes:

Para costuras en posición horizontal, 86%. En posición vertical, 75% subiendo y 64% bajando. Esto, con un buen soldador; con un obrero inexperto, el rendimiento en vertical puede bajar a 50%.

Al determinar el tiempo de trabajo, hay que considerar—como lo muestra la práctica—que los $\frac{2}{3}$ del tiempo se pierden en labor improductiva y que sólo $\frac{1}{3}$ del tiempo el obrero está soldando. Esto para un obrero con práctica, cuando se acepta como tiempo de fusión el que da el fabricante por medio del Cf del electrodo.

Por último, cabe observar que el tiempo necesario de fusión de un electrodo es proporcional al diámetro, en cambio, el volumen depositado crece con el cuadrado de éste. Por lo tanto, hay ventaja en usar electrodos lo más gruesos posibles, ya que el volumen depositado por unidad de tiempo aumenta en razón directa del diámetro. Hay por otro lado factores que limitan el diámetro. En cualquier caso, no puede éste ser mayor que el espesor de las planchas que se unen.

Una costura en posición difícil (techos, costuras verticales por encima de la cabeza, etc) puede demorar dos o tres veces más que la misma costura en horizontal.

En los electrodos más modernos, se ha buscado no ya el aumento de su resistencia mecánica, sino facilitar la soldadura. En los mejores electrodos, la escoria regula la velocidad de trabajo: si el obrero avanza demasiado rápido con el electrodo, la escoria no lo sigue; si demasiado lento, la escoria tiende a precederlo y a ahogar el arco.

4.—CONTROL DE LA SOLDADURA

En rama alguna de la técnica había dependido su desarrollo en tan alto grado como en la soldadura, de la posibilidad de controlar la calidad del trabajo. En esta materia, de importancia fundamental para su futuro desarrollo hay, hasta el momento, divergencias notables entre los técnicos.

Los medios de control más conocidos son:

- 1) Por rayos X.
- 2) Con limaduras, o de Roux.
- 3) Magnético-acústica.
- 4) De Schmuckler.

A esto hay que agregar los ensayos de laboratorio (tracción, flexión, etc.).

La prueba mediante los rayos X se basa en las propiedades conocidas de éstos de atravesar los cuerpos. Puede observarse directamente la costura o tomar una radioscopia de ella. Las diferencias de espesor hacen variar la penetración de los rayos. Sirve igualmente para soldadura a gas y por resistencia.

Las instalaciones de rayos X de las grandes empresas son fácilmente transportables; así pueden controlar las costuras del montaje. Atraviesan planchas de hasta 8 cm. de espesor. En puentes, controlan todas las costuras de tope y un cierto tanto por ciento de las de ángulo.

Las DIN 1914 exigen que en las radioscopías sea visible una diferencia en el espesor de 1,5%, cuando éste es menor de 5 cm., y de 2%, cuando el espesor es mayor de 5 y menor de 10 cm.

La prueba con limaduras de hierro se basa en la desviación que sufren las líneas de fuerza de un campo magnético debido a burbujas de gas o grietas en el interior de un cuerpo magnético. Esta prueba se usa también para localizar defectos en órganos de máquinas. El cuerpo en estudio se coloca entre dos polos magnéticos, y en su superficie se esparce una mezcla de limaduras de hierro y aceite. Por la orientación que tomán las limaduras se hace visible en la superficie cualquiera falla interior, siempre que no se encuentre muy alejada de ella. Los resultados que se obtienen dan poca indicación de la calidad de la falta, pero el método es muy sensible a grietas que se encuentran cerca de la superficie. (Un estudio detallado sobre esta prueba puede verse en «El progreso de la ingeniería», enero 1937).

La prueba magnético-acústica (que los alemanes llaman «Abhoerverfahren»). tiene una base semejante a la anterior; en ella, la variación del campo magnético es acusada por un fono que el operador tiene junto al oído, en forma de ruido.

Son las variaciones de la reluctancia magnética debidas a fallas o inclusiones las que detecta el instrumento. Este método es sensible, en especial para soldaduras planas en horizontal. Es poco empleado.

La prueba de Schmuckler consiste en hacer un sacado, mediante una fresa, en varios puntos de la costura, hasta su raíz, y atacar luego con ácidos o con cloruro-cupro-amónico. La observación a simple vista, o con lupa da idea de la calidad de la soldadura. Los huecos deben luego rellenarse. Se comprende la desventaja que significa, en esta prueba, el tener que romper la costura; en cambio, es de gran sencillez y poco costo.

En Estados Unidos han usado también la inspección que llaman del «estetoscopio». Generalmente, ella es previa a la de rayos X, para analizar con éstos sólo los sitios dudosos. El operador escucha con el estetoscopio, mientras golpea trozo por trozo la soldadura con un matillo liviano, y nota una diferencia en el sonido, cuando golpea cerca de una falla. Requiere un operador de gran experiencia y de buena capacidad auditiva.

De estos medios de control, sólo el control por rayos X ha alcanzado, en Alemania, gran desarrollo. El mayor uso de las costuras de tope, le da cada vez mayor difusión, ya que es especialmente apropiado para este tipo de costura.

Los gastos de establecimiento de los rayos X hacen que el método sea útil para control en serie, es decir, para los casos en que se les emplee con frecuencia. De otro modo resultarían muy caros.

Los técnicos que objetan el control por rayos X, indican que éstos no revelan nada que no pueda ser evitado por un buen control del trabajo del obrero; que el defecto debe tener una cierta dimensión en la dirección de los rayos para ser visible, y que—como la placa tiene dos dimensiones—no se puede saber en que plano vertical se encuentra la falla. De cualquier modo, la práctica ha demostrado que el control por rayos X da indicaciones bastante seguras, y que su sensibilidad es muy superior a la del control visual.

Al emplear los rayos X, la dificultad estriba en determinar cuando se debe rechazar una soldadura a base de las radioscopías, y si basta la sola radioscopia para rechazarla, considerando que aun soldaduras con sopladuras, dan, al ensayarlas, buenos resultados (No hay que olvidar que en una prueba de deformación plástica del metal, interviene la ductilidad de la materia, que tiende precisamente a atenuar las desigualdades de sollicitación provocadas por las sopladuras). También debe observarse el aspecto exterior de la soldadura, para no tomar por sopladuras (en la radiografía), las mordeduras que dependen en gran parte de la técnica de la soldadura, y que no significan—en verdad—un defecto.

Los rayos X, revelan, cuando existe, el grado de porosidad de una costura, en forma cualitativa. Pero no se sabe aún como relacionar éste, con los ensayos de fatiga. Se encuentra en estudio (Mons, Bélgica), el problema de definir y medir el grado de porosidad revelado por los rayos, para relacionarlo, cuantitativamente con los ensayos de fatiga. La porosidad, además de significar una reducción de sección, engendra sobretensiones locales, que son un punto de partida para ruptura por esfuerzos repetidos.

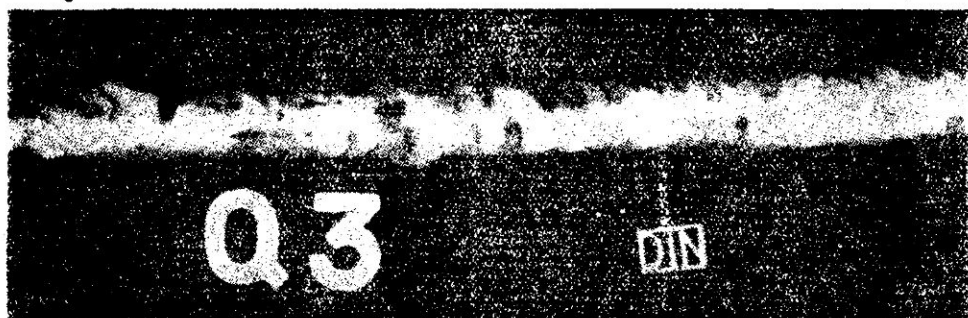
Se han usado también los rayos γ en forma análoga a los rayos X. Se obtiene como emanación de los minerales del radio. Son más penetrantes que los rayos X, y por eso se les han empleado para controlar trabajos pesados que hacen inaplicables los rayos X, o cuando se quiere reducir el tiempo necesario de exposición para obtener la radioscopia.

En la figura 4, se ven dos radioscopías tomadas con rayos X. La de la figura 4 a nos muestra el aspecto que presenta en la radioscopía una costura de tope de calidad irreprochable. La ejecución de esta costura es perfecta, la falta de puntos oscuros en ella indica que el espesor es uniforme. En la figura 4 b se ve la radioscopía de una soldadura defectuosa. Se ven inclusiones de escoria. En los puntos en que la costura tiene alguna falla los rayos han impresionado en mayor grado la placa, y a ello se deben los puntos más oscuros.

Figura 4



a



b

Ensayos de laboratorio.—Estos ensayos carecen de valor si no son hechos en buenas condiciones, y si no se define con precisión la forma en que fueron hechos. Hasta hoy se han realizado de una manera empírica; la prueba de ello está en que las normas prescriben, con frecuencia, métodos diferentes de control.

Los ensayos de tracción, ductilidad, resiliencia, etc., son análogos a los que se ejecutan para el acero. La medida de la ductilidad tiene importancia, ya que la ductilidad permite a los elementos muy solicitados adaptarse a sobretensiones locales. Los electrodos de alta resistencia tienen una ductilidad menor que la del acero.

El ensayo de mayor importancia es el de vibración.

Esta prueba puede ser de esfuerzos repetidos (sin cambio de signo) o alternados (con cambio de signo en las fatigas).

Presenta grandes dificultades de realización; requiere laboratorios bien montados y personal técnico capaz de interpretar correctamente los resultados. Por esto queda fuera del dominio de la industria corriente. La menor fisura tiene gran influencia, y puede llevar a interpretaciones erróneas. Si la soldadura se comporta bien, es índice seguro de buena calidad; en ninguna otra prueba son tan importantes los resultados como en ésta. En general, se hace una serie de ensayos para poder establecer el diagrama de Woehler.

Las experiencias han mostrado que la resistencia de las costuras de tope es casi el doble de la de los cordones frontales y laterales, (13 a 18 Kg/mm² para dos millones de alternancias).

Esta prueba no es del todo necesaria para estructuras soldadas que no estén sometidas a esfuerzos alternados. Para puentes soldados, es absolutamente necesaria.

Las normas prescriben los ensayos de laboratorio que deben efectuarse, tanto para el control de los electrodos, como para el examen del soldador.

En la construcción de buques, con aceros de 40 a 47 Kg/mm², las normas exigen como resultados de los ensayos: en tracción, un 90% de la resistencia del metal de base; un alargamiento mínimo de 18%, y un ángulo de pliegue mínimo de 120 grados sin ruptura del cordón.

En todas las normas oficiales, se encuentra, como prueba para el soldador, una costura de tope que es ensayada a tracción. Cabe recordar aquí que una buena soldadura sólo puede obtenerse cuando el metal de aporte es parecido al metal de las barras, tanto desde el punto de vista mecánico como del químico.

En el capítulo siguiente, volveré sobre algunos puntos relacionados con el control de la soldadura.

(Continuará)