

ROTURA GENERALIZADA DE UN ENREJADO DE ACERO PERTENECIENTE A UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

E.J. HERRERA, L. SORIA Y J.M. GALLARDO

Universidad de Sevilla
Grupo de Metalurgia e Ingeniería de los Materiales
E.T.S.I. Industriales, Avda. Reina Mercedes s/n, 41012 Sevilla.

Resumen. Las rejas de los tubos de aspiración de las turbinas-bombas de la central de bombeo de una planta hidroeléctrica se habían destruido a los ocho años de su puesta en servicio. Para conocer el origen de este deterioro prematuro, se nos aporta un trozo de pletina en el que hay varios restos de la soldadura con los redondos de acero desaparecidos. Las observaciones visuales y los ensayos, principalmente metalográficos, realizados han llevado a la conclusión de que la rotura de la reja debe atribuirse a una deficiente ejecución de la soldadura de ensamblaje, unido al empleo de un acero de baja soldabilidad y a un diseño poco conveniente de la estructura. Esto ha dado lugar a la aparición de grietas. La reja, originalmente provista de microfisuras, situada en un medio acuoso natural (pantano) y sometida a vibraciones, ha fallado por fatiga con corrosión. Se hacen recomendaciones relativas a una nueva concepción de las uniones, del diseño del conjunto y de la ejecución de las soldaduras

Abstract. Total failure of the grills used in a hydroelectric power-plant for holding back solids in the dam water had occurred after eight years of service. The grills were immersed and placed just at the entrance of the tubes employed to force in the water by pumping. A piece of plate with various remains of welded joints with disappeared steel bars was the only material available for examination. Failure analysis, especially using metallographic techniques, has been carried out. It is concluded that the grills failed by corrosion fatigue. Fatigue was promoted by the presence of cracks originated by the combined effect of an inappropriate welding procedure, including the use of a low-weldability material, and a poor design of the grill. Recommendations concerning detail design of welded joints, welding procedures and design of the structure are made.

1. INTRODUCCIÓN

En una inspección industrial realizada a los ocho años de su puesta en servicio, se había detectado que las rejas de los tubos de aspiración de las turbinas-bombas de la central de bombeo de una planta hidroeléctrica se encontraban destruidas. En la figura 1 se presenta un esquema del diseño original de una de las rejas. En un marco constituido por perfiles en U se disponen pletinas horizontales de acero de dimensiones 20x160 mm, separadas entre sí 200 mm; para el arriostamiento vertical se sueldan, entre cada dos pletinas adyacentes, redondos de 20 mm de diámetro y longitud nominal de 180 mm, separados entre sí por una distancia de 200 mm. Las rejas de acero habían sido galvanizadas en caliente.

Para conocer el origen de este deterioro prematuro, juzgado, de entrada, por los técnicos de la empresa como ocasionados por corrosión acuosa, se nos aporta un trozo de pletina en el que hay restos de la soldadura

con los redondos desaparecidos de acero (Figs. 2 y 3).

2. ENSAYOS DE CORROSIÓN

En una primera observación, la causa de la destrucción de las rejas no parecía ser un simple fenómeno de corrosión. Sin embargo, dada la presencia de un polvo oscuro en las cercanías de los restos de soldadura (Figs. 2 y 3), se ensayó la posible presencia de bacterias sulfuroductoras. Existía, por otra parte, entre el personal técnico de esta planta, una cierta hipersensibilidad hacia el tema de la corrosión microbiana, ya que se habían detectado casos en otros lugares de las instalaciones. El ataque ácido no revela la existencia de sulfuros, por lo que, en principio, puede aceptarse que el resultado del ensayo es negativo.

La observación microscópica permite poner de manifiesto que el recubrimiento de zinc ha sufrido alteraciones (Fig. 4), distando de ser una capa

compacta, llegando en algunos puntos a quedar el acero desnudo. No obstante, no existen señales de que este hecho haya influido en la rotura de las rejas.

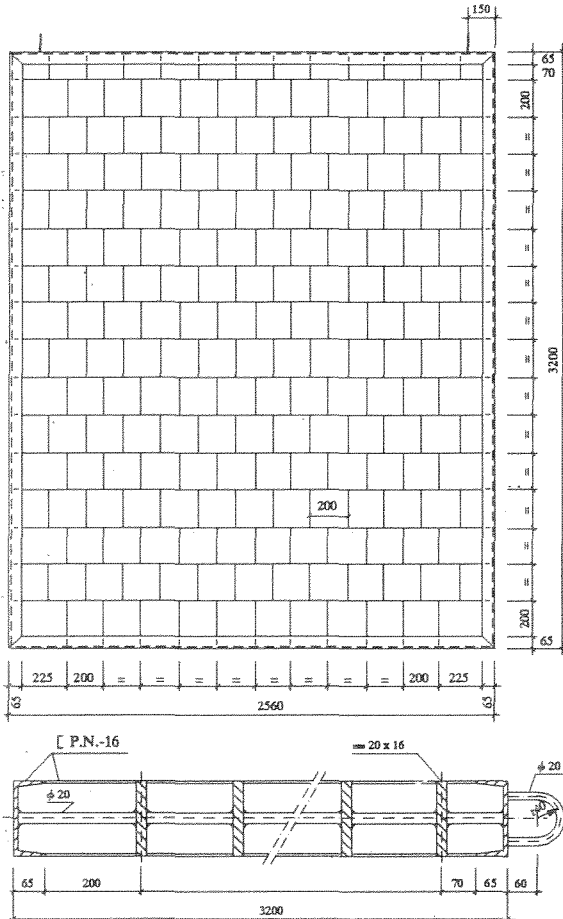


Fig. 1. Dibujo esquemático de un elemento de reja del enrejado destruido.

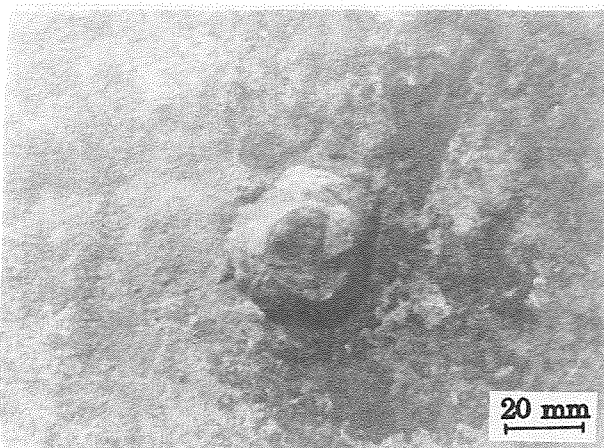


Fig. 2. Resto de soldadura pletina-redondo. El redondo parece haberse desprendido por rotura.

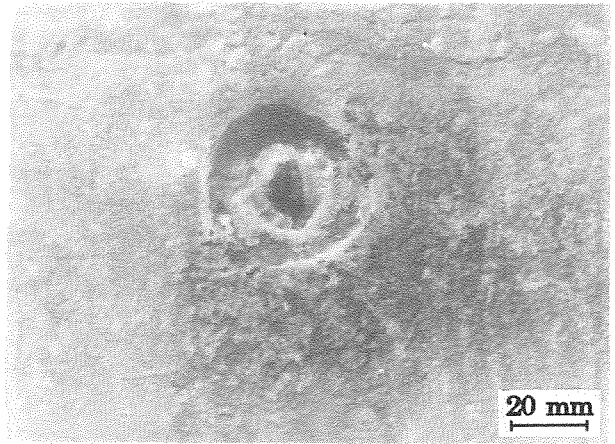


Fig. 3. Otro resto de soldadura pletina-redondo. El redondo da la impresión de haberse desprendido por arranque de la raíz.

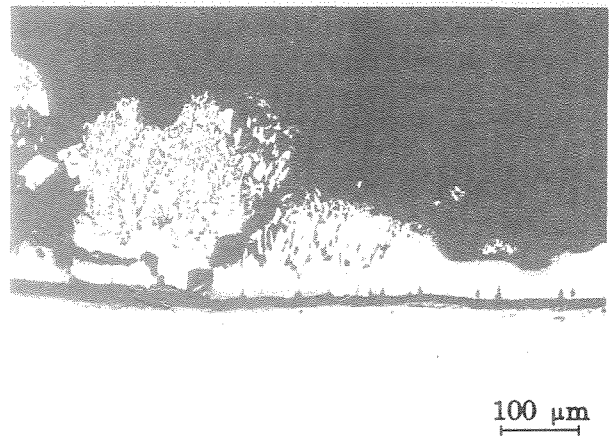


Fig. 4. Aspecto de la capa de zinc con claros síntomas de deterioro.

3. METALOGRAFÍA DE LA UNIÓN SOLDADA

El estudio metalográfico revela que la ejecución de la soldadura ha sido incorrecta. En las macrográficas de la figura 5 (a, b y c) puede observarse que se han utilizado redondos cortos, sin preparación, y que, en general, existen grietas (señaladas con flechas), tanto en los redondos como en las pletinas, las cuales se inician en los talones de los cordones de soldadura. También hay alguna porosidad y/o escoria (Fig. 5c).

El examen microscópico permite ver, con mayor detalle, las grietas, señaladas en el párrafo anterior, tal como se muestra en las figuras 6 y 7, correspondientes a la fisura que aparece en la parte superior del cordón de la figura 5a. En la figura 7 puede observarse que la grieta se encuentra inmersa en una estructura típica de la zona afectada por el calor (ZAC). Por su parte, la figura 8 muestra una grieta situada en la pletina. Se trata de la

misma grieta señalada en la parte inferior derecha del cordón de la figura 5a. En este caso, la grieta, que comienza en la zona afectada por el calor, ha llegado a penetrar hasta un lugar donde se encuentra la estructura propia del metal de base.

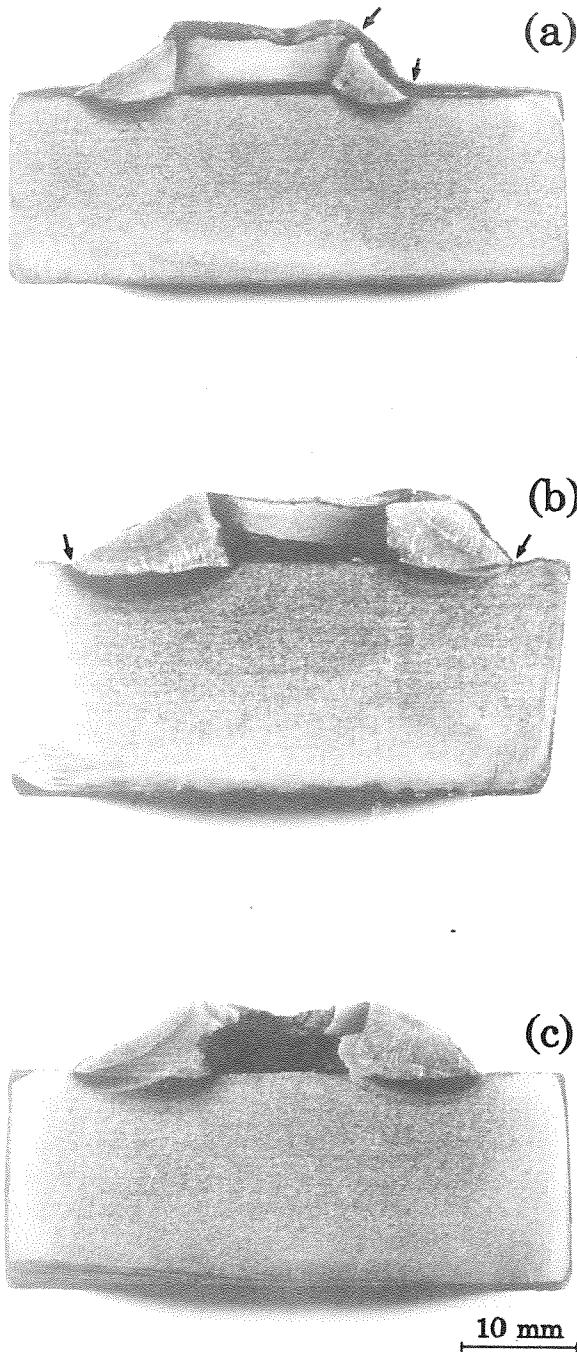


Fig. 5. Tres macrografías (a, b y c) de uniones soldadas donde se aprecia una ejecución defectuosa.

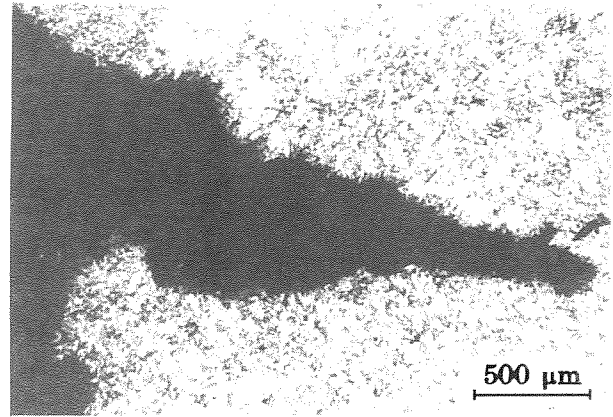


Fig. 6. Aspecto, a mayor tamaño, de la fisura de la parte superior del cordón de la figura 5a.

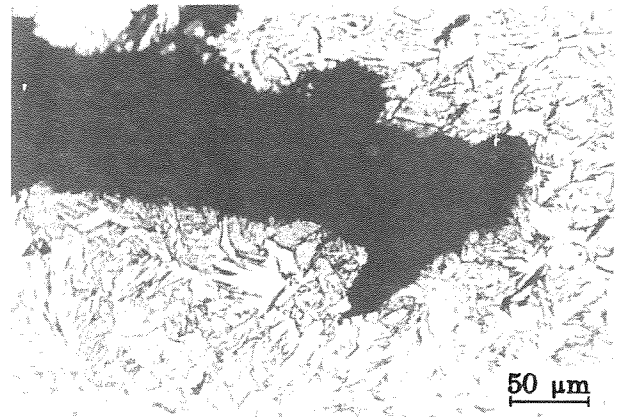


Fig. 7. Extremo de la fisura de la figura 6, totalmente inmerso en la ZAC.

Además de las grietas visibles macroscópicamente, que se inician en los talones de la soldadura, una inspección metalográfica cuidadosa permite poner de manifiesto la presencia de microgrietas internas, tanto en la zona afectada por el calor de los redondos (Fig. 9), como en el metal fundido (Fig. 10). Existen, además, en las pletinas, grietas formadas en regiones con inclusiones alargadas (stringers) de sulfuros o siguiendo pasos intergranulares (Fig. 11).

4. CAUSAS DE LA ROTURA

Las rejas, originalmente provistas de grietas, situadas en un medio acuoso natural y sometidas a esfuerzos periódicos (vibraciones), han fallado por fatiga con corrosión, por corrimiento de las grietas existentes sobre los redondos.

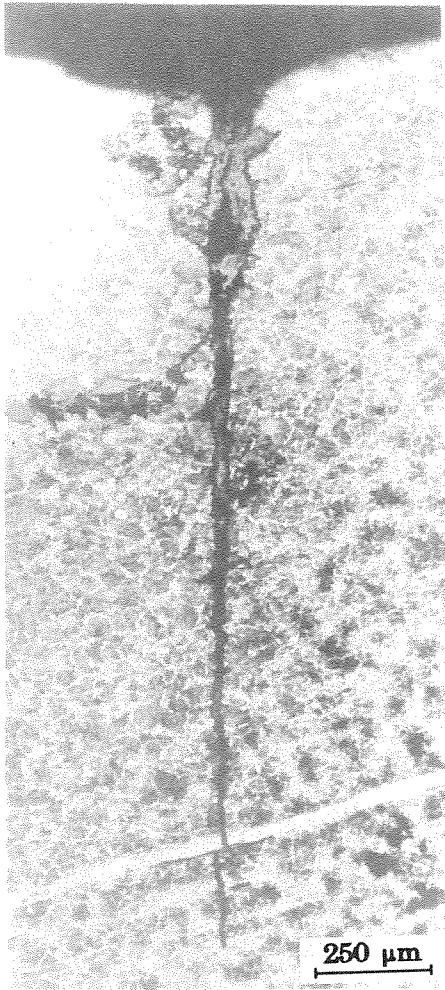


Fig. 8. Montaje micrográfico mostrando la grieta que aparece en la parte inferior derecha del cordón de la figura 5a. La grieta nace en la ZAC y penetra hasta el metal base.

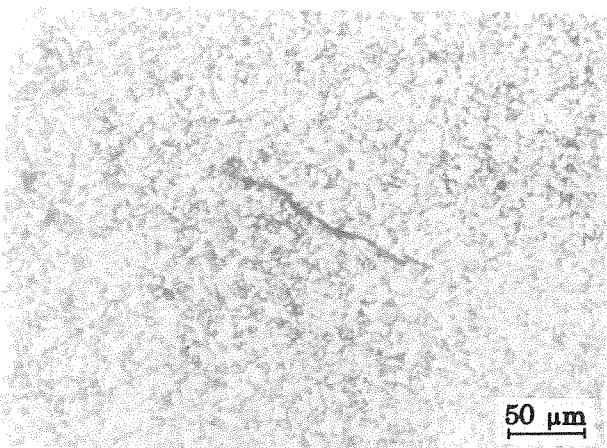


Fig. 9. Microgrieta en una estructura de grano fino de la ZAC. Podría haberse originado por agrietamiento en caliente o, más probablemente, por fisuración por hidrógeno.

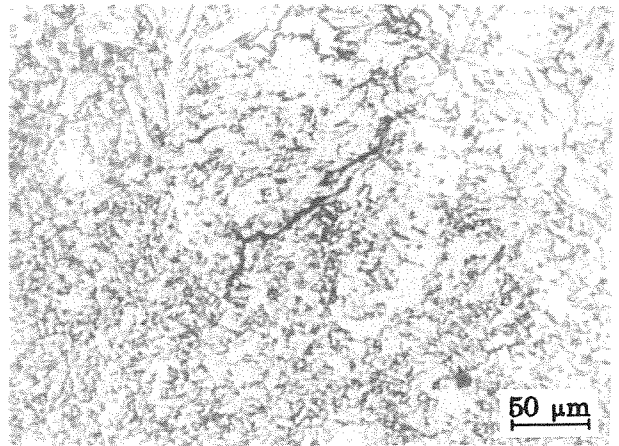


Fig. 10. Microgrieta en la región del metal fundido fronteriza con la ZAC (agrietamiento en caliente).

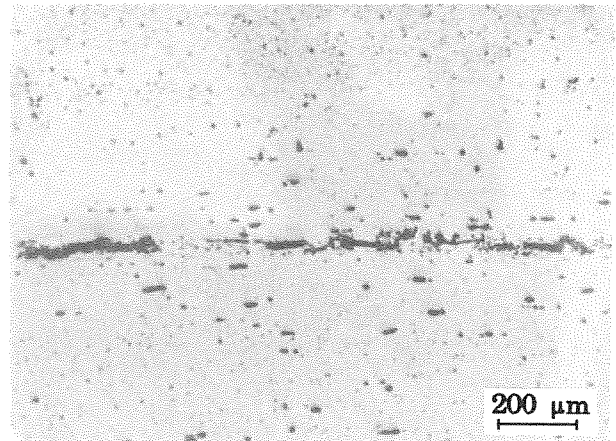


Fig. 11. Agrietamiento a lo largo de stringers, con aspecto de desgarre laminar.

En la aparición de las grietas han contribuido varios factores, a saber: (a) un diseño poco conveniente de la estructura, (b) una deficiente ejecución de la soldadura de ensamblaje y (c) la utilización de un material con baja soldabilidad.

La reja fué diseñada de forma incorrecta, ya que abundan las uniones soldadas en T. Estas soldaduras en ángulo favorecen la aparición de concentración de tensiones, si no se toman las debidas precauciones operatorias. A este efecto, los cordones convexos, que forman un ángulo vivo y originan una peor transmisión de los esfuerzos, facilitan la iniciación de grietas, con la consiguiente disminución del límite de fatiga [1 y 2], por lo que no son recomendables en piezas sometidas a sollicitaciones alternadas. Las uniones en T con cordones convexos han generado grietas en los redondos y en las pletinas en los puntos de máxima concentración de tensiones (Figs. 5a y 5b), que corresponden precisamente con zonas afectadas por el calor, de mayor fragilidad (Figs. 6, 7 y 8). Los cordones de soldadura cóncavos permiten una mejor transmisión de los

esfuerzos y no presentan ángulos vivos, lo que les hace más aconsejables en estas circunstancias (Fig. 12).

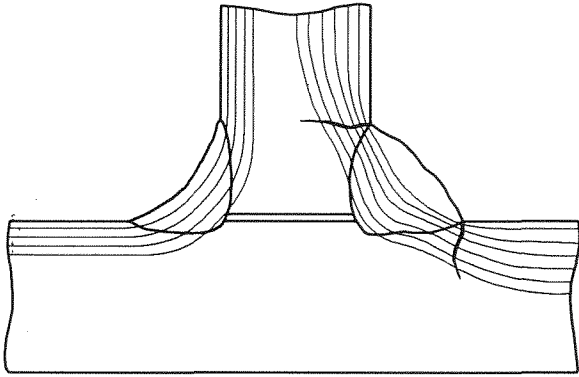


Fig. 12. Aparición de grietas en los talones del cordón de una unión soldada. Los cordones convexos, que forman un ángulo vivo y dan lugar a una peor transmisión de los esfuerzos, no son recomendables en piezas sometidas a sollicitaciones de fatiga.

Otra causa generadora de zonas de concentración de tensiones, y, por consiguiente, de grietas, en el caso estudiado, es la amplia separación entre la pletina y los redondos soldados en T [3]. Esta separación en la raíz de la soldadura, causada por la corta longitud de los redondos, posibilita el agrietamiento en la zona afectada por el calor (Fig. 13). Este efecto parece haber sido la causa del desprendimiento del redondo en la figura 5c. La separación excesiva entre los dos miembros soldados reduce, además, la sección de la garganta del cordón, con lo que los esfuerzos que actúan en esa zona serán proporcionalmente mayores.

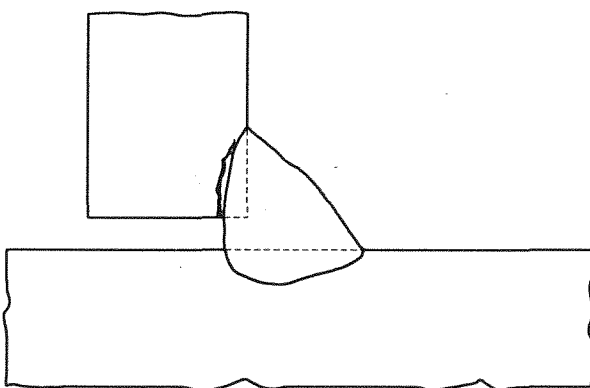


Fig. 13. La concentración de tensiones en la raíz de la soldadura, en la entalla existente entre ella y el redondo, debido a la amplia separación redondo-pletina, puede originar grietas en la ZAC.

Por otra parte, la porosidad y escorias (Fig. 5a) presentes en la soldadura también disminuyen la resistencia a la fatiga de los cordones.

Finalmente, las microgrietas internas a que se hizo referencia en el apartado 3, y que se ilustran en las figuras 9, 10 y 11, presentan las características de una fisuración en caliente, fenómeno muy ligado a la presencia de sulfuros. A este respecto, el contenido de azufre de los elementos soldados es cercano al 0,04% S. La grieta de la figura 9, en una estructura de grano fino (más fino que ASTM 8), podría deberse a la presencia de hidrógeno (fisuración por hidrógeno). A su vez, el agrietamiento de la figura 11 es típico del desgarre laminar.

5. RECOMENDACIONES

La resistencia de un ensamblaje soldado se debe a una elección juiciosa del metal de base, de la concepción de las uniones, del diseño del conjunto y de las condiciones de soldadura (procedimientos, metal de aporte, secuencia de soldadura, etc). Dado que la rotura de la reja del tubo de aspiración ha estado causada por una soldadura incorrecta, tanto en diseño como en ejecución (a lo que hay que añadir la baja calidad del acero utilizado), se proponen dos soluciones: una (A), conservando un diseño relativamente parecido al original, y otra (B), con un cambio más notable del mismo.

5.1 Solución A

Diseño

Perforar las pletinas o llantas de 160x20 mm y pasar a su través redondos de 20 mm de diámetro, según la modificación mostrada en la figura 14. La modificación consiste simplemente en sustituir los redondos cortos por otros largos cuya longitud abarcase la totalidad de la altura de la reja.

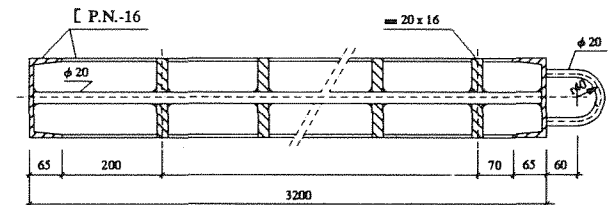


Fig. 14. Sección modificada del elemento de reja, consistente, principalmente, en el uso de redondos largos que atraviesan las pletinas.

Ejecución de la soldadura

La secuencia de la soldadura sería: (a) puntear las barras a las llantas con un electrodo dúctil, (b) soldar los extremos de las barras a los marcos superior e inferior, (c) soldar los redondos a las llantas, de forma

que quede estanco el pasante y evitar así corrosión en el interior y (d) soldar las llantas al marco lateral. En todos los casos emplear electrodos básicos (o eventualmente soldadura semiautomática MAG), siguiendo una secuencia desde el centro hacia la periferia.

5.2 Solución B

Diseño

La distribución de los redondos de 20 mm sería análoga a la del proyecto original, con la diferencia de que los redondos no se soldarían normales a las llantas. Con objeto de disminuir las tensiones residuales, se daría a los redondos una inclinación de 80° , variando el ángulo hacia la derecha o hacia la izquierda de forma alternativa (Fig. 15).

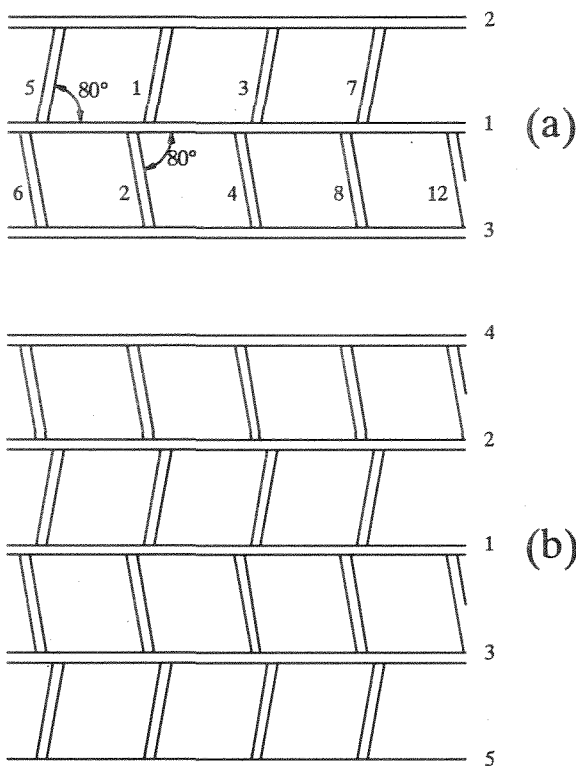


Fig. 15. Croquis correspondiente a la solución B propuesta en cuanto a diseño y secuencia de la soldadura.

Ejecución de la soldadura

La secuencia de soldadura sería la siguiente:

- (a) Preparar tres llantas y soldar a ellas los redondos de acuerdo con la figura 15a, en el orden indicado,
- (b) continuar montando y soldando a uno y otro lado de este componente, y con la misma secuencia (Fig. 15b), y así sucesivamente hasta soldar toda la reja,

(c) soldar las últimas filas de redondos a los marcos superior e inferior y

(d) soldar los marcos laterales a las llantas. En todos los casos se soldará siempre desde el centro hacia los extremos.

5.3 Observaciones generales

(a) Los electrodos deben secarse siempre para evitar la formación y difusión de hidrógeno que podría originar agrietamiento en frío.

(b) Deben tomarse todas las precauciones conocidas [4,5 y 6] para mejorar la resistencia a la fatiga de la unión soldada tales como evitar la existencia de grietas, cualquier tipo de entallas, rugosidad o mordeduras. A este respecto, los cordones de soldadura cóncavos son preferibles.

(c) Se recomienda que una vez terminada la rejilla sea galvanizada en caliente.

6. REFERENCIAS

- [1] Richards, K.G., "Fatigue strength of welded structures", The Welding Institute, Cambridge (1969).
- [2] Maddox, S.J., "Designing against fatigue failure", *Metals and Materials*, 727-731 (1989).
- [3] Richards, K.G., "Weldability of Steels", The Welding Institute, Cambridge (1980).
- [4] Gurney, T.R., "Fatigue design rules for welded steel joints", *The Welding Institute Research Bulletin*, 17, 115-124 (1976).
- [5] Radaj, D, "Design and analysis of fatigue resistant welded structures", Abington Publishing, Cambridge (1990).
- [6] "Conseils pour obtenir des aspects de soudure plus favorables à la tenue en fatigue", Institut de Soudure/OTUA, Paris (1989).