

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A FRACTURA DE CHAPAS DE ALUMINIO UNIDAS MEDIANTE SOLDADURA

F. Gálvez Díaz-Rubio, D. Cendón Franco, V. Sánchez-Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid

Resumen. En el presente trabajo se presenta un estudio de la resistencia de uniones de chapas de aluminio soldadas de un vehículo de transporte comercial. Se ha realizado un estudio de los cordones de soldadura mediante técnicas de metalografía para estudiar la microestructura del material en la zona del cordón, del material base, y de la zona entre ambas. También se ha llevado a cabo un análisis de las durezas en las diferentes zonas para evaluar las diferencias entre el material base y el cordón de soldadura. Para medir la resistencia mecánica de las uniones soldadas se ha diseñado un programa experimental de ensayos mecánicos que revele las tensiones máximas que la estructura es capaz de soportar. Los resultados muestran que las soldaduras son capaces de soportar las cargas de diseño, sin embargo se ha demostrado que la fractura que aparece es de tipo frágil y está ocasionada por defectos localizados en zonas próximas a las uniones y que actúan como concentración de tensiones. Para reproducir el comportamiento de las uniones con y sin incluir el debilitamiento del material por la presencia de defectos se ha utilizado un modelo basado en la tensión máxima obtenida de los ensayos mecánicos. Finalmente se ha reproducido de forma numérica el comportamiento de las uniones mediante una modelización por diferencias finitas. Los resultados muestran que la estructura no falla al no considerar la presencia de defectos, sin embargo cuando estos son incluidos el fallo que aparece es por fractura frágil.

Abstract. In this work, a study of the failure of a commercial vehicle structure based on welded aluminum plates is presented. The study of the welds has been done using metallographic techniques to analyze the microstructure of the weld fillet, the plates and the joints. A hardness study has also been done to evaluate the differences between the fillet and the aluminum plates. To measure the mechanical strength of the joints, an experimental testing program has been designed to reveal the maximum stresses that the structure is capable to maintain. The results show how the structure is capable to support, however it has been demonstrated that brittle failure appears, and it is initiated at defects localized near the joints acting as stress concentrators. To reproduce the joints behavior including the weakness due to the presence of defects, a maximum stress failure model has been used, from the data obtained from the mechanical tests. The failure of the structure has been reproduced using a finite differences code. The results show that the vehicle do not fails when the absence of defects is considered. However, the failure appears when the weakening introduced by the presence of defects is included.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudian las causas que han provocado el fallo en determinados vehículos de transporte contruidos con un chasis autoportante. La fabricación se ha realizado por unión de chapas gruesas de aluminio 7017-T6 mediante uniones soldadas.

El diseño de dicha estructura se ha llevado a cabo para soportar un nivel de cargas estáticas determinado. Sin embargo, al someterla a un nivel de cargas dinámicas equivalente, la estructura ha presentado diversos fallos iniciados por fractura frágil en los cordones de soldadura.

2. ANÁLISIS DE LAS SOLDADURAS

Para analizar el estado de las soldaduras se realizaron cortes de las chapas perpendiculares a la dirección del cordón. De esta forma es posible apreciar la

profundidad alcanzada por el cordón así como la existencia de defectos y la transición entre el material base y el material de aporte.

La primera inspección visual de las probetas mostró que las soldaduras no son de tipo penetrante, sino mediante chapas colocadas “a tope”, por lo que el cordón no une la totalidad de la sección de las chapas. Además se observó la existencia de diversos defectos macroscópicos. Estos defectos se pueden clasificar en diversos tipos. El primero de los tipos de defectos son aquellos que corresponden a los extremos de las chapas como consecuencia del proceso de soldadura, y que están únicamente en contacto y no soldados. Este tipo de defectos se muestra en la Fig. 1 como defecto A. El tamaño medio de defecto fue de unos 10 a 15mm de longitud y espesores de hasta 1mm. Son consecuencia del proceso de fabricación que se ha llevado a cabo y están siempre presentes.

El segundo tipo de defectos encontrado no está asociado a las soldaduras pero se encuentra cercano a ellas. Son de tipo variable y su presencia es más escasa aunque no menos importante. Este tipo de defectos se ha marcado en la Fig. 1 como defectos B y C. Son por ejemplo poros, agujeros roscados, o fisuras en las chapas.

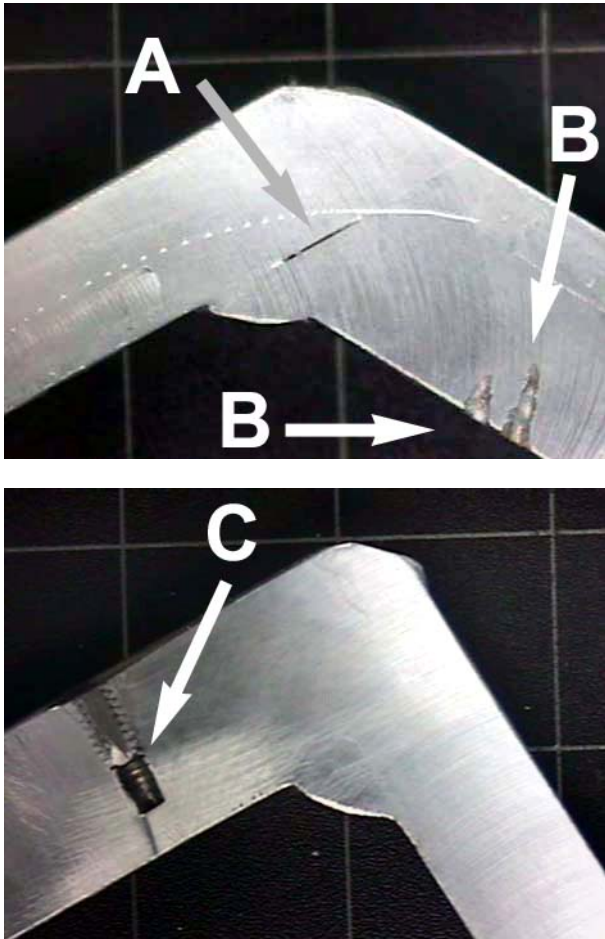


Fig. 1. Sección de las soldaduras después del corte y pulido de las probetas, en las que se revela la presencia de los diversos defectos encontrados.

La presencia de estos defectos encontrados es muy importante en los mecanismos de fractura del material, más acentuado en este caso, pues el aluminio 7017 es un material considerado como frágil, con una tenacidad de fractura baja. Estos defectos actúan como concentradores de tensiones y puntos de iniciación de la fisuración del material.

Para analizar el comportamiento mecánico de las soldaduras se realizaron ensayos de dureza Vickers desde el material base hasta las soldaduras. El objetivo fue evaluar la pérdida de propiedades mecánicas en los cordones y en la zona afectada térmicamente respecto al material base.

Los resultados (véase Fig. 2) muestran un descenso de 70 puntos Vickers en el cordón respecto a la dureza de

las chapas. La amplitud de la zona afectada térmicamente parece ser pequeña, pues no se aprecia una disminución de dureza importante en la zona próxima al cordón respecto a las chapas. En consecuencia, puede afirmarse que la soldadura no parece afectar una zona extensa en el material base que haga decrecer las propiedades mecánicas. Es posible relacionar la dureza Vickers con el límite elástico del material [1] mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_y = \frac{H_v}{3}$$

lo que permite deducir que el material base presenta un límite elástico de 570 MPa, el cual es coherente con la aleación estudiada, mientras que en el cordón desciende a 360 MPa.

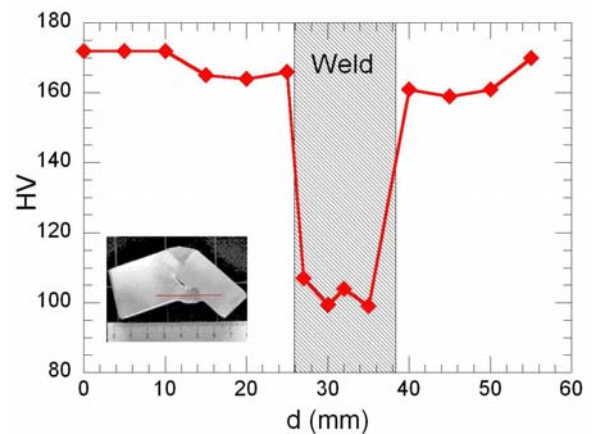


Fig. 2. Dureza medida en el cordón de soldadura y en el metal base. Se aprecia una debilitación en el cordón.

Para determinar la posible debilidad introducida en el material como consecuencia del proceso de soldadura se realizó un estudio metalográfico. Esta técnica posibilita determinar la existencia y extensión de la zona afectada térmicamente en el material base, la presencia de defectos o inclusiones. Todos estos factores son importantes pues tienen una influencia directa en la calidad de las uniones soldadas.

Para observar la microestructura se pulió una cara de las probetas, cortadas en sentido normal a la dirección del cordón de soldadura, mediante lijados con tamaño de grano decreciente y finalizando con pasta de diamante de 1 μ m. Para poner de manifiesto el grano del material y diferenciar entre soldadura y material base se llevó a cabo un ataque químico sobre las superficies pulidas mediante el reactivo Kellers [2].

El análisis metalográfico revela claramente las diferencias entre el material base y el cordón de soldadura, así como la presencia de la zona blanca o zona afectada por el calor. En primer lugar, el material

base presenta una microestructura de granos orientados y alargados en la dirección de las chapas, de acuerdo con el proceso de laminación durante su fabricación (Fig. 3). Esto es coherente con el material empleado, y también puede observarse la presencia de precipitados de endurecimiento. La densidad de cavidades o defectos encontrada es prácticamente nula

La microestructura del cordón de soldadura se muestra en la Fig. 4. En ella el material presenta ahora un aspecto claramente isotrópico con una estructura de solidificación típica. Debido a ello, y por tanto a la ausencia de mecanismos de endurecimiento por deformación, las propiedades mecánicas son inferiores a las del metal base. También se observa un cierto grado de porosidad.

La tercera zona estudiada corresponde a la frontera entre el metal base y el cordón. Su microestructura se muestra en la Fig. 5, y presenta una estructura de recrystalización, con un cierto crecimiento del tamaño de grano y en consecuencia unas propiedades más débiles frente al material inicial. Sin embargo esta zona es pequeña.



Fig. 3. Micrografía del metal base.

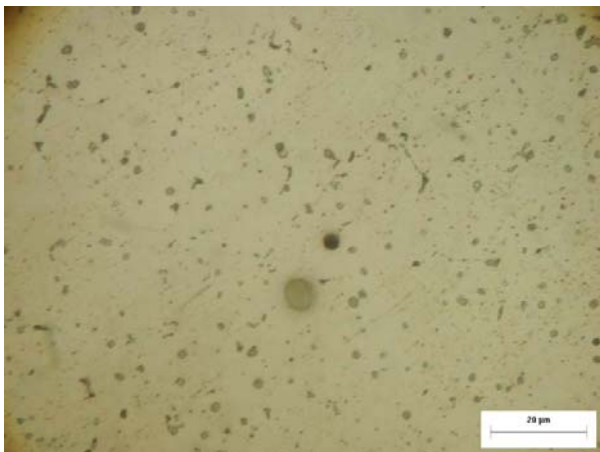


Fig. 4. Micrografía del cordón de soldadura.

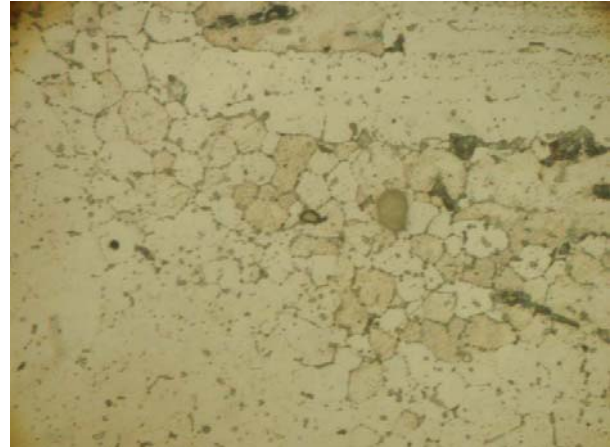


Fig. 5. Zona de transición entre el cordón y el metal base. Se aprecia una microestructura de recrystalización debida al aporte térmico.

3. ENSAYOS MECÁNICOS

Para determinar la resistencia mecánica global de las uniones soldadas se realizaron ensayos mecánicos sobre las uniones. Se mecanizaron probetas con la geometría especificada en la Fig. 6 para tres configuraciones diferentes, correspondientes a tres partes de la estructura. Las dimensiones se adjuntan en la Tabla 1.

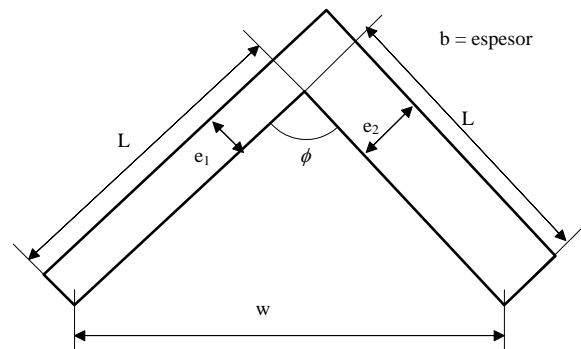


Fig. 6 Geometría de las probetas.

Tabla 1. Geometría de las probetas.

| Probeta | b (mm) | w (mm) | L (mm) | e ₁ (mm) | e ₂ (mm) | ϕ (°) |
|--------------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|---------------|
| A01 A02 A03 A04 | 35.5 29.4 29.3 35.4 | 248 | 166 | 205 | 25.4 | 96 |
| B01 B02 B03 B04 | 31.0 32.0 36.2 35.9 | 360 | 247 | 20.5 | 25.4 | 93 |
| C01 C02 C03 C04 | 45.7 45.2 44.2 43.4 | 304 | 176 | 20.5 | 30.5 | 120 |

Los ensayos se llevaron a cabo mediante una máquina de ensayos servohidráulica convencional INSTRON 1275, según se muestra en la Fig. 7, mediante una configuración de flexión en tres puntos. La carga se aplica sobre la unión soldada mientras que los extremos de las chapas descansan sobre dos guías lineales provistas de rótulas, permitiendo giro y desplazamiento de los extremos.

El sistema de medida se basa en la medida de la carga aplicada a través de una célula de carga, el desplazamiento vertical se sigue mediante la medida del desplazamiento de la máquina y los desplazamientos horizontales de las chapas se midieron mediante dos transductores inductivos según se aprecia en la Fig. 7.

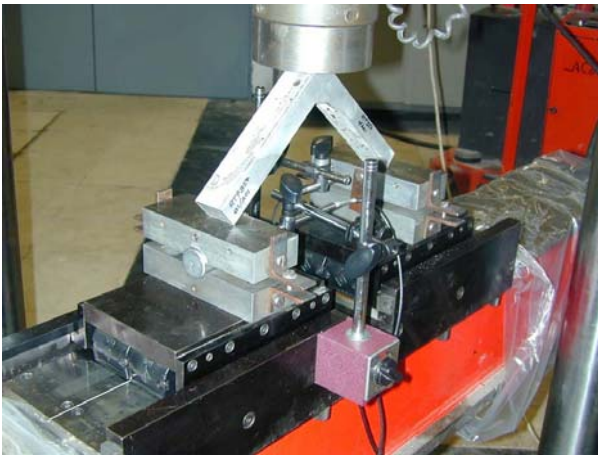


Fig. 7. Detalle del dispositivo experimental empleado en los ensayos mecánicos.

Se ensayaron cuatro probetas de cada una de las tres zonas estudiadas. En la Tabla 2 se muestran los valores de la máxima carga soportada y sus correspondientes desplazamientos. Los resultados de las curvas carga – desplazamiento se muestran en la Fig. 8 para la zona A, en la Fig. 9 para la zona B y en la Fig. 10 para la zona C.

Tabla 2. Resultados de los ensayos mecánicos.

| Probeta | F_{\max} (N) | Δy (mm) a F_{\max} | ΔL_1 (mm) a F_{\max} | ΔL_2 (mm) a F_{\max} |
|---------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| A01 | 10750 | 8.6 | 8.8 | 8 |
| A02 | 20654 | 9.2 | 8 | 8 |
| A03 | 19983 | 12.8 | 12.4 | 12 |
| A04 | 8013 | 2.4 | 2.3 | 2.3 |
| B01 | 13689 | 17.9 | 16.6 | 16.4 |
| B02 | 14334 | 15.0 | 15.1 | 12.8 |
| B03 | 14397 | 24.8 | 24.4 | 20.0 |
| B04 | 16312 | 16.7 | 16.9 | 14.0 |
| C01 | 26472 | 7.5 | 5.3 | 3.4 |
| C02 | 25678 | 9.8 | 5.8 | 4.3 |
| C03 | 26861 | 7.6 | 5.2 | 3.2 |
| C04 | 26885 | 8.4 | 5.8 | 2.7 |

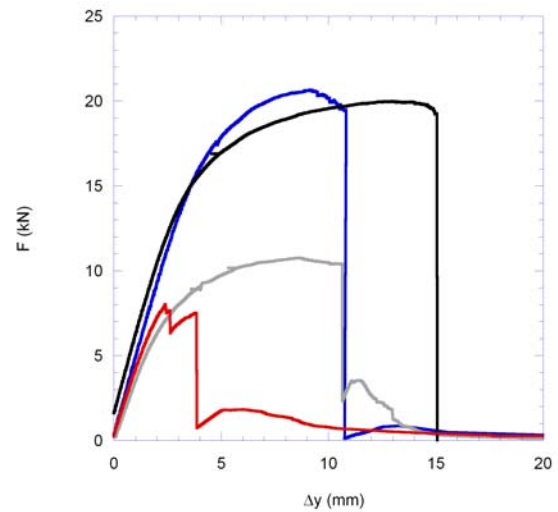


Fig. 8. Resultados de la zona A, en los que se observan claramente dos tipologías de fallo diferentes.

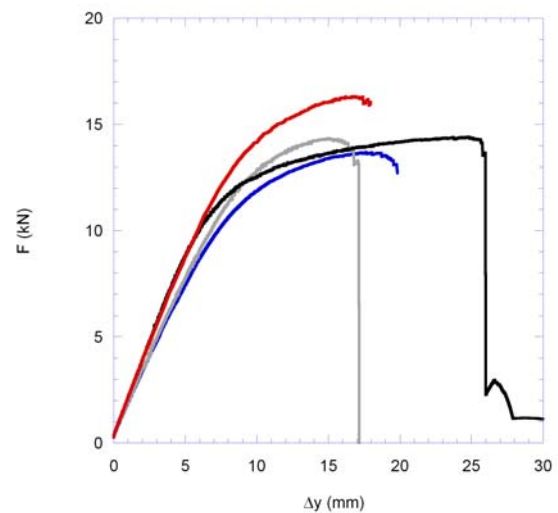


Fig. 9. Resultados de las probetas de la zona B. Todas las probetas presentaron un comportamiento similar.

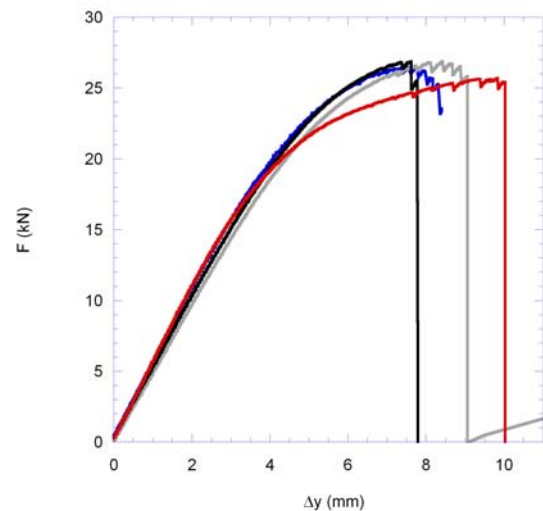


Fig. 10. Resultados de las probetas de la zona C. Todas las probetas presentaron un comportamiento similar.

Los resultados de las probetas extraídas de la zona A mostraron dos tipologías de fallo muy diferentes, mientras que los resultados de las zonas B y C fueron todos ellos comparables. Dos de las cuatro probetas ensayadas de la zona A fallaron a cargas con un valor aproximadamente la mitad que las otras dos, como puede observarse de los resultados de los ensayos en la Fig. 1 y en los valores de la Tabla 2. Las tipologías de fallo encontradas se muestran en la Fig. 11.



Fig. 11. Imágenes de las roturas producidas por diferentes mecanismos de fallo. A la izquierda las probetas que soportaron mayores cargas y a la derecha las que presentaron un fallo prematuro.

En la mayoría de los casos las probetas fallaron por agotamiento plástico de la sección soldada, correspondiente a todas las probetas de las zonas B y C y a la mitad de las de la zona A. Este comportamiento de fallo es el esperado a priori, y para el que la estructura fue diseñada. El fallo es consecuencia del límite de las tensiones alcanzado en las soldaduras y en su proximidad, donde el momento es máximo. Un mejor proceso de fabricación, con soldaduras más penetrantes podría haber mejorado algo el comportamiento, aunque el momento máximo capaz de soportar la estructura hubiera sido parecido. Sin embargo, en términos de mecánica de fractura, la presencia de soldaduras no penetrantes deja dos bordes de chapa en contacto que son capaces de actuar como fisuras. Estas fisuras acaban en los cordones de soldadura donde el material es más dúctil, lo que beneficia desde el punto de vista de la propagación, pues el cordón es más tenaz que el material de las chapas. Aún así, la concentración de tensiones en los extremos de estas fisuras son los responsables de la localización del fallo mecánico de la estructura.

Sin embargo el fallo prematuro de dos probetas de la zona A, y el consecuente colapso de la estructura debido a las menores cargas alcanzadas es más crítico. En este caso la fractura ocurre a cargas mucho más bajas que en el caso anterior. El motivo de este comportamiento es la presencia de defectos importantes

en el material base, con una tenacidad de fractura baja, y en zonas próximas a los cordones de soldadura. El mecanismo de fallo se describe en la Fig. 12, en el que se representa la propagación de las fisuras encontradas, y un detalle de las probetas puede apreciarse en la Fig. 13. En ellas el mecanismo de fisuración se inicia en el fondo de un agujero roscado, donde los filetes de soldadura actúan como puntos de concentración de tensiones. Estos puntos están sobre el material base de las chapas, que presenta un comportamiento más frágil que los cordones y por tanto menos tenaz desde el punto de vista de la mecánica de fractura.

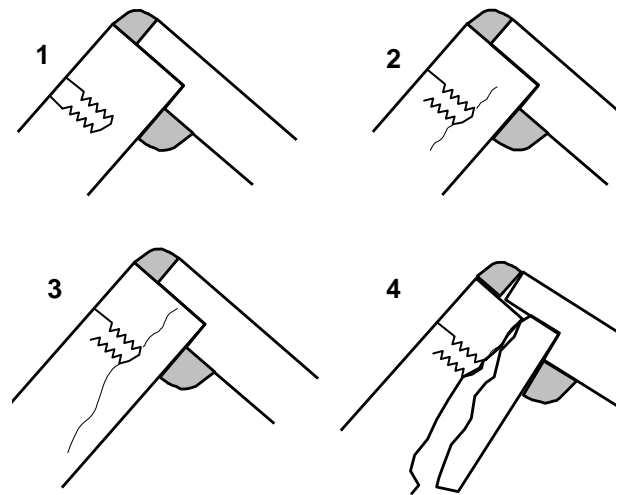


Fig. 12. Descripción del proceso de rotura ocasionado por la concentración de tensiones en una entalla.

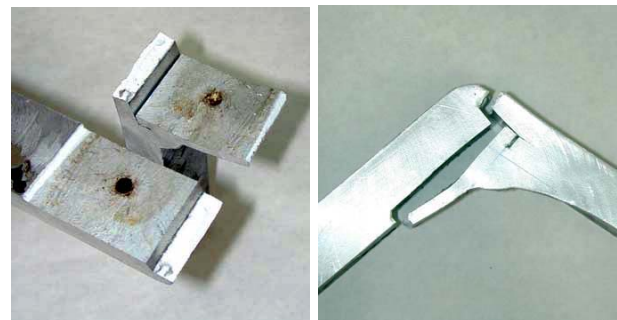


Fig. 13 Imágenes de una probeta que presentó un fallo prematuro. La figuración se inicia en el fondo de un agujero roscado debido a la concentración de tensiones.

5. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Para simular el comportamiento de la estructura mediante un modelo numérico es preciso modelizar el comportamiento del material e implementarlo en el código numérico. Para ello se decidió recurrir a un criterio de fallo tensional, a través de las tensiones máximas soportadas en las uniones en los ensayos mecánicos.

La tensión máxima soportada se calculó mediante el momento máximo en las uniones. Puesto que en todos los casos es $L_1 = L_2$, es $F_1 = F_2$ y por tanto el máximo momento está dado por:

$$M_f = F_1 \frac{w}{2} = F_{\max} \frac{w}{4}$$

en consecuencia

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_f}{be^2}$$

donde es

$$e^2 = e_1^2 + e_2^2$$

En la Tabla 3 se resumen los resultados de tensión máxima obtenidos. Según se aprecia, en las probetas que presentaron el fallo esperado las tensiones máximas presentan valores que rondan los 200 MPa. Sin embargo aquellas probetas que presentaron un fallo prematuro las tensiones máximas son claramente inferiores, con valores de 106 y 79 MPa debido a la debilitación por concentración de tensiones antes comentada.

Tabla 3. Tensiones máximas en las uniones, obtenidas de los resultados de los ensayos mecánicos.

| Specimen | F_{\max} (N) | M_f (Nm) | σ_{\max} (MPa) |
|----------|----------------|------------|-----------------------|
| A01 | 10750 | 666 | 106 |
| A02 | 20654 | 1280 | 245 |
| A03 | 19983 | 1238 | 238 |
| A04 | 8013 | 497 | 79 |
| B01 | 13689 | 1232 | 224 |
| B02 | 14334 | 1290 | 227 |
| B03 | 14397 | 1296 | 201 |
| B04 | 16312 | 1468 | 230 |
| C01 | 26472 | 2012 | 196 |
| C02 | 25678 | 1951 | 192 |
| C03 | 26861 | 2041 | 205 |
| C04 | 26885 | 2043 | 209 |

Para simular el comportamiento de la estructura ante las cargas de diseño se modelizó la estructura mediante el programa de diferencias finitas LSDYNA. Para reproducir el comportamiento de las uniones se utilizó un criterio de fallo de rotura en las uniones de las chapas soldadas basado en tensión máxima.

Como puede apreciarse, se trata de un criterio muy sencillo, no en la línea de la Mecánica de la Fractura clásica [3]. Sin embargo, dado que la sollicitación en la

pieza e incluso de los defectos son muy uniformes, nos ha parecido un criterio acertado. Hay que tener en cuenta que la pieza a modelizar, así como la sollicitación, son bastante complejas por lo que ha sido necesario adoptar bastantes simplificaciones para poder abordar los cálculos con éxito.

Se simularon dos situaciones distintas, la primera ajustando el valor máximo de las tensiones en las soldaduras en 200 MPa, y un segundo cálculo rebajando este valor a 100 MPa. De esta forma se reproducen los dos casos considerados, sin incluir e incluyendo la presencia de defectos debilitadores.

Los resultados mostraron que el fallo no aparece en la primera de las simulaciones. Este es el caso ideal del vehículo en el que no existen defectos en las zonas próximas a las soldaduras. Sin embargo en la segunda de las simulaciones la estructura falló bruscamente en las zonas de las soldaduras

5. CONCLUSIONES

El fallo prematuro de la estructura está ocasionado por la presencia de defectos en las zonas próximas a las uniones soldadas. Se ha demostrado que en el hipotético caso de no existencia de dichos defectos, la estructura no presentaría fallo alguno.

No es posible asegurar la no existencia de defectos en la estructura, sin embargo si es posible prevenir la inclusión de defectos artificiales como uniones roscadas en las proximidades de las soldaduras.

Así pues, se pueden concebir diferentes soluciones al problema. El reforzar las uniones soldadas cuando se detecten o introduzcan modificaciones en la estructura debería ser tenido en cuenta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comunidad Autónoma de Madrid por la financiación recibida a través del proyecto 07N/0120/2002 y al Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto MAT2002-3538.

REFERENCIAS

- [1] Calladine C. R., "Plasticity for engineers", Ellis Horwood Series, Engineering Science, Great Britain, 1986, pág. 176.
- [2] Metals Handbook Vol, 8. "Metallography, Structures and Phase Diagrams" American Society for Metals, 1973
- [3] Elices M., "Mecánica de la Fractura", ETSI Caminos Canales y Puertos, UPM, 1995