

## ANÁLISIS DE LA ROTURA DE UN PERNO DE SUJECCIÓN DE UN SISTEMA DE ANDAMIAJE

R. Lacalle, J.A, Álvarez y D. Ferreño

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales  
E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria  
Avenida de los Castros s/n 39005 Santander

**Resumen.** Este trabajo pretende esclarecer las causas que condujeron a la rotura del perno de sujeción de un andamiaje. Para ello la superficie de rotura de este componente ha sido exhaustivamente analizada empleando microscopía electrónica. El material ha sido caracterizado desde un punto de vista mecánico y de fractura. Finalmente, el fallo fue analizado siguiendo las recomendaciones del procedimiento europeo para la evaluación de la integridad estructural, FITNET.

**Abstract.** This paper aims to clarify the causes which led to the collapse of the fastening bolt of a scaffolding. To do this, the fracture surface of this component has been exhaustively analysed by means of electronic microscopy. The material has been characterised from mechanical and fracto-mechanical points of view. Finally, the failure was analysed following the recommendations of the European structural integrity procedure FITNET.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el momento en el que un operario procedía al desmontaje de un andamio, el único perno que actuaba como sujeción del módulo que el obrero se disponía a retirar falló de forma súbita, cuando únicamente soportaba el peso del propio obrero. Como consecuencia, el trabajador se precipitó al nivel de suelo desde una altura aproximada de 4 metros, resultando herido de consideración. La Fig. 1 muestra el perno en el instante de su recepción en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Cantabria.

Este trabajo se plantea, por lo tanto, el esclarecimiento de las causas que motivaron el fallo del componente.



Fig. 1. Perno en el momento de su recepción

### 2. TIPOLOGÍA DEL SISTEMA DE ANDAMIAJE

La tipología de andamiajes en que se enmarca la estructura accidentada es comúnmente empleada para

facilitar las operaciones de vertido y vibrado del hormigón del encofrado del muro al cual se adosa el andamio (Fig.2). Esta misión principal no impide que la citada estructura sea empleada también como pasarela para facilitar el tránsito entre diferentes puntos de la obra.



Fig. 2. Sistema de andamiaje

Debido a la función de auxilio a las labores de hormigonado, los procesos de montaje y desmontaje han de repetirse con elevada frecuencia, lo cual motiva que estas operaciones deban presentar la mínima complejidad posible. De esta forma, una pasarela de tabloncillos de madera reposa en módulos o consolas metálicas, equidistantes entre sí con un único perno como sujeción al encofrado adyacente, lo que facilita en gran medida su colocación y retirada. Esta disposición puede contemplarse también en la Fig.2

Por otro lado, el perno que actúa como sujeción está constituido por una barra roscada, de diámetro nominal 14,65 mm, con una cabeza soldada actuando como tope (Fig.3). Habitualmente, tras su colocación, los pernos son fijados mediante una tuerca, sin embargo, la barra fracturada carecía de la misma



Fig.3. Tipología del perno fracturado

### 3. CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

El peso del mencionado andamio, así como las cargas de servicio que soporta descansan sobre idénticas consolas metálicas espaciadas una distancia de 2 metros. Ante la actuación de una carga  $P$  en el punto más desfavorable posible para la sujeción que es el extremo más alejado del encofrado, el perno estaría sometido a un esfuerzo cortante de valor precisamente  $P$  (Fig. 4).

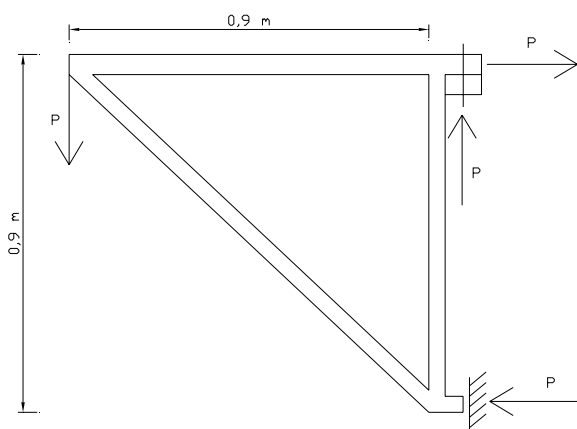


Fig. 4. Esquema estructural

Del mismo modo, para la sección de rotura, localizada concretamente en el contacto entre consola y encofrado,

el perno estaría sometido a momento flector, bajo la actuación de la mencionada carga  $P$ , igual a  $30 \cdot P$  (mm-unidades de carga).

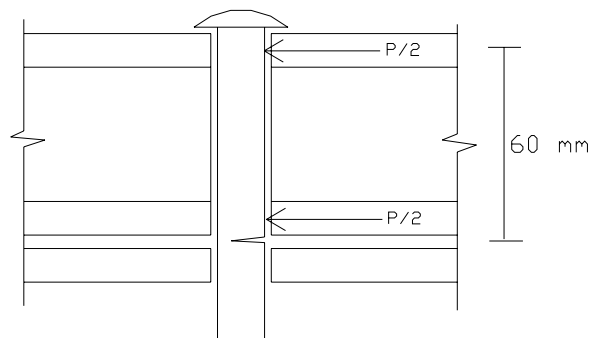


Fig. 5. Solicitaciones en el perno fisurado

### 4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Para la determinación de las propiedades mecánicas del material constituyente del perno, se llevó a cabo un ensayo de tracción sobre una probeta normalizada [1], mecanizada a partir de una de las mitades del perno fracturado. La curva tensión-deformación obtenida de este ensayo se muestra en la Fig. 6, siendo sus parámetros representativos los que se resumen en la Tabla 1.

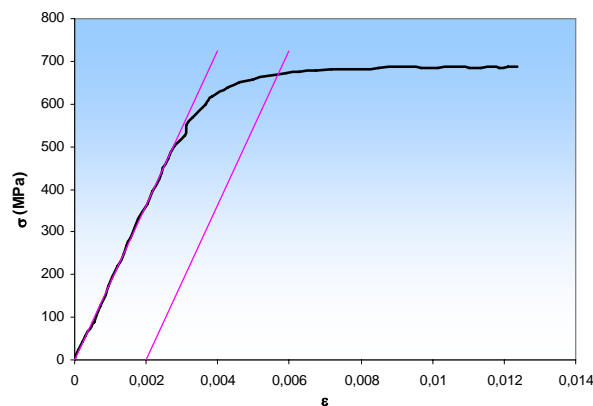


Fig.6. Curva Tensión-Deformación

Tabla 1. Parámetros representativos del ensayo tracción

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| Límite de proporcionalidad | 550 MPa.    |
| Límite elástico (0,2%)     | 670 MPa.    |
| Tensión de rotura          | 689 MPa.    |
| Módulo de Young            | 181000 MPa. |

Se realizó también un ensayo de tenacidad sobre una probeta PCCv (Charpy prefisurada) mecanizada a partir de un perno del mismo lote que el accidentado, no obteniéndose un resultado válido para la determinación de  $K_{Ic}$  de acuerdo con [2], pero que sin embargo puede ser empleado en el análisis de una forma conservadora ya que representa una cota inferior del valor real de

tenacidad a fractura. El valor obtenido en este ensayo fue  $K_{mat} = 55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

### 5. ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE ROTURA

Han sido tomadas varias macrografías de la superficie de rotura y se ha llevado a cabo un microanálisis de la misma al objeto de determinar a) la forma y tamaño de la fisura crítica que condujo a la fractura del componente y b) los mecanismos que han provocado la iniciación y propagación de la fisura y el posterior desgarro.

Las observaciones macrográficas (Fig. 7) revelan la existencia de tres zonas bien diferenciadas. Una primera zona correspondiente a una fisura inicial que se ajusta a la forma que se puede contemplar en la Fig. 7. La tipología de esta fisura, semejante a otras encontradas en trabajos previos para componentes trabajando en parecidas condiciones de carga [3-5], así como el estudio micrográfico de esta primera zona (Fig. 8), certificar, como cabía esperar, que la fisura se ha generado por efecto de la actuación de un esfuerzo cortante, sin poder descartar tampoco la posible presencia de un momento torsor.



Fig. 7. Macros de la superficie de rotura

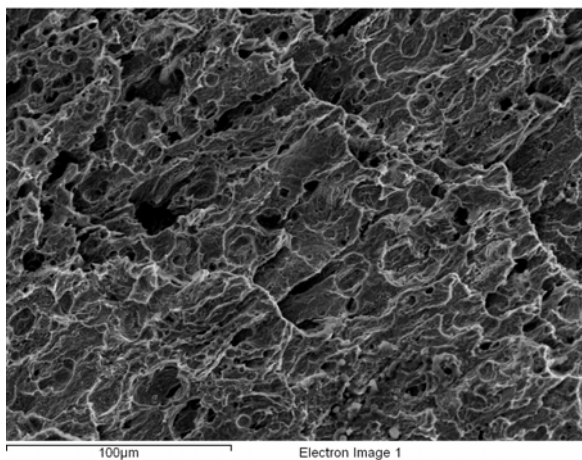


Fig.8. Micrografía zona 1

Más allá de esta fisura, (zona 2) las micrografías han detectado, entre otros mecanismos, la presencia de

clivajes (Fig.9), indicadores del fallo frágil a partir de la existencia de una fisura crítica.

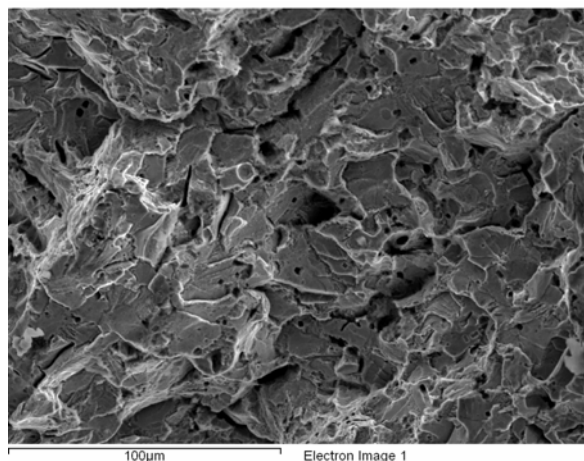


Fig.9. Micrografía zona 2

Finalmente puede diferenciarse una tercera zona correspondiente al desgarro dúctil, que provocó el fallo en última instancia. Las micrografías tomadas en esta región, como cabía esperar, desvelan la presencia de microhuecos (Fig. 10).

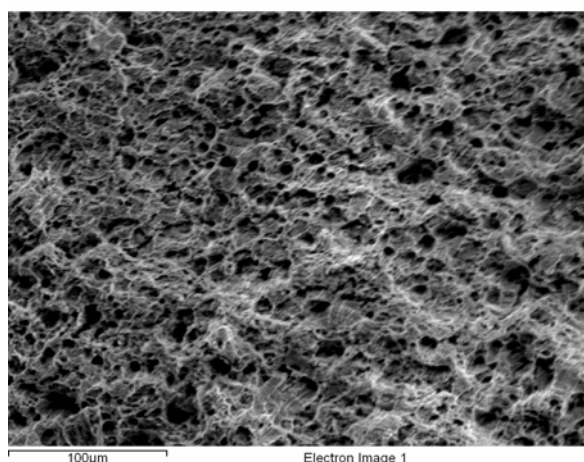


Fig 10. Micrografía zona 3

### 6. ANÁLISIS DE FALLO

El estudio de la superficie de rotura permite realizar algunas hipótesis sobre el proceso que condujo al fallo final del componente:

1. En un primer periodo se generó una fisura inicial, coincidente con la zona 1, debido a la actuación de cargas torsoras o cortantes. Este proceso se vio seguramente acelerado por la presencia de agentes favorables para la corrosión, tales como el agresivo ambiente de la obra y que la sección de rotura se localiza en el contacto entre consola y encofrado, que es

una zona propicia para el depósito de material corrosivo.

2. Tras alcanzar la fisura un tamaño crítico se produjo el fallo generalizado del componente estructural, avanzando rápidamente la fisura hasta alcanzar toda la zona 2, presumiblemente debido a la actuación de alguna carga de magnitud importante.
3. Finalmente tuvo lugar el accidente reseñado, en el que el componente culminó su fractura. En virtud de las observaciones realizadas sobre la superficie de rotura, y de la pequeña magnitud de la carga que causo el fallo en último término (peso del operario), se puede postular que en ese momento únicamente la zona 3 actuaba como ligamento resistente en la sección fisurada.

Con la ayuda del procedimiento europeo para la evaluación de la integridad estructural FITNET [6], se realizó un análisis conducente a determinar la magnitud de las cargas que produjeron el fallo del componente (etapa 2).

Para la realización de este estudio, la fisura inicial fue idealizada de acuerdo a la forma de la Fig. 11. Para esta geometría, el momento flector capaz de causar el colapso plástico de la sección fisurada es de 137 N·m. Recurriendo al compendio de soluciones del procedimiento FITNET, se obtiene igualmente la expresión del Factor de Intensidad de Tensiones correspondiente a la geometría idealizada de la sección fisurada. Con estos datos, junto con los extraídos de la caracterización del material, es posible analizar la fractura del componente con la ayuda de un Diagrama de Fallo (FAD), tal y como propone el mencionado procedimiento FITNET. El FAD reproducido en la Fig.12 representa la situación analizada.

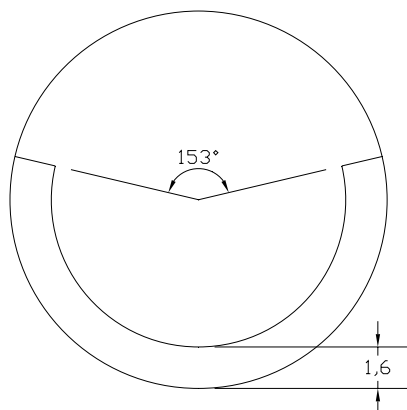


Fig. 11. Idealización de la fisura

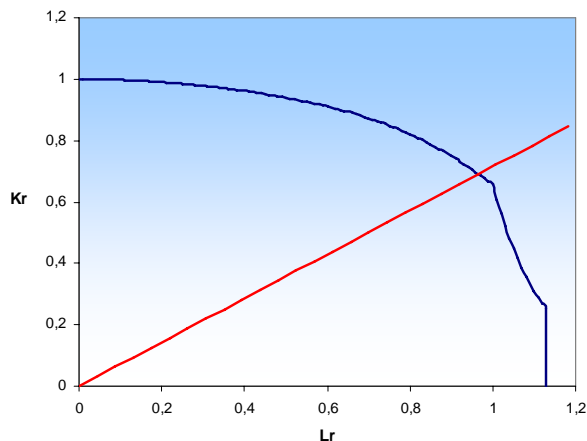


Fig. 12. FAD correspondiente al caso analizado

El punto de intersección entre la Línea de Fallo y la recta correspondiente a la evolución del componente representa la situación crítica que da paso a la rotura del perno. Esta situación viene caracterizada por unos valores de los parámetros adimensionales del FAD que son:

$$K_r = \frac{K_{Ic}}{K_{mat}} = 0,69 \tag{1}$$

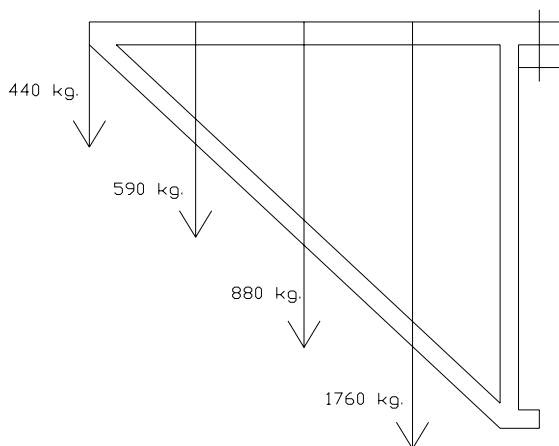
$$L_r = \frac{M}{M_y} = 0,96 \tag{2}$$

A partir de estos valores es inmediato tener una estimación de la magnitud del momento flector que condujo al fallo de la estructura:

$$M_{cr} = 132 \text{ N}\cdot\text{m}$$

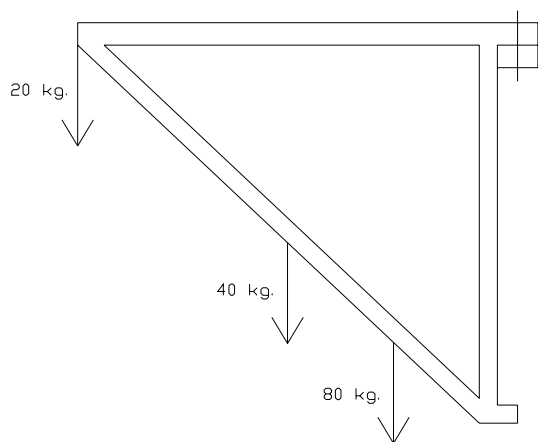
Teniendo en cuenta la configuración de la estructura (Fig. 4 y 5), este momento crítico pudo alcanzarse mediante diversas situaciones de carga. A modo orientativo aquí se analizan dos posibilidades: carga uniformemente distribuida por toda la pasarela y actuación de una carga concentrada.

Para la primera de las hipótesis (carga uniforme), el valor capaz de producir el fallo sería 440 kg./m<sup>2</sup>. Para el caso de la actuación de una carga concentrada, se han analizado diversas ubicaciones, resumiendo los resultados en la Fig.13



**Fig.13.** Análisis de la carga de rotura

Se ha analizado igualmente la carga capaz de producir el colapso plástico del ligamento remanente tras la fractura (zona 3), y, de nuevo, considerando diferentes ubicaciones para la actuación de una carga concentrada, han sido hallados, a modo orientativo, los valores capaces de producir el fallo en último término. Estos resultados se muestran en la Fig. 14, donde se pone de relieve que los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud que el peso de una persona, confirmando las hipótesis de partida realizadas.



**Fig.14.** Análisis colapso plástico del ligamento remanente

**8. CONCLUSIONES**

Teniendo en cuenta los análisis llevados a cabo, la secuencia de fallo del componente puede explicarse atendiendo a la existencia de tres etapas o sucesos bien diferenciados:

- Formación de la fisura inicial. Los factores que condujeron al desarrollo de dicha grieta fueron la actuación de importantes cargas cortantes o torsoras, favorecidas por la presencia de agentes

ambientales agresivos, al ubicarse la fisura en una región de depósito de material corrosivo.

- Propagación frágil. Presentando el componente la fisura inicial anteriormente descrita, la acción de una carga de importante magnitud hizo propagar rápidamente la grieta inicial, hasta dejar al perno con un ligamento remanente de muy reducidas dimensiones. De acuerdo con los análisis practicados parece más razonable la hipótesis de que el fallo estuvo motivado por la actuación de una carga concentrada más que por efecto de una carga uniformemente distribuida dado lo improbable de que se dispusiese una carga cercana a los 500 kg/m<sup>2</sup> sobre la estructura accidentada. Esta etapa constituyó la fractura propiamente dicha del perno. Sin embargo no supuso la ruina de la estructura debido probablemente al arriostamiento que, sobre la consola con el perno dañado, realizaron las consolas adyacentes.
- Fallo final. En último término, tuvo lugar el conocido accidente, cuando un operario se colgó literalmente de la consola sujeta exclusivamente por el componente fisurado. Los análisis corroboran la hipótesis de que, en este momento, la sección resistente era un ligamento de reducidas dimensiones.

**7. REFERENCIAS**

[1] ASTM E8-00b, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

[2] ASTM E1820-99, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

[3] E.A Ossa, “Failure Análisis of a Civil Aircraft Landing Gear”, Engineering Failure Análisis, Article in Press.

[4] G.H. Walter, R.H. Hendrickson and R.D. Zipp, “Anomalous Fractures of Diesel Engine Bearing Cap Bolts”, Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Vol.2, 1993.

[5] V.K. Champagne, “Failed Bolts from an Army Tank Recoil Mechanism”, Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Vol.2, 1993.

[6] FITNET, Fitness For Service Procedure, Draft Working Document, September 2005.