

# ANÁLISIS DEL FALLO POR FRACTURA FRÁGIL DE UNA TURBINA PELTON

D. Ferreño, J.A. Álvarez, E. Ruiz, D. Méndez

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

E-mail: [ferrenod@unican.es](mailto:ferrenod@unican.es)

## RESUMEN

En este trabajo, se analiza la rotura experimentada por una turbina Pelton de grandes dimensiones, fabricada en acero ASTM CA-6NM, tras recibir un tratamiento térmico de temple y revenido. Esta investigación inicial se ha centrado en varios aspectos. En primer lugar, se ha comprobado que el proceso de fabricación satisface los requerimientos establecidos en la especificación técnica. Seguidamente se ha estudiado la homogeneidad del componente para lo cual se ha analizado en diferentes regiones su composición química, se ha estudiado su naturaleza metalográfica y se ha caracterizado su respuesta mecánica por medio de ensayos de dureza Vickers. El estudio fractográfico efectuado ha permitido identificar los mecanismos de rotura predominantes así como la defectología presente en la superficie de fractura. El alcance de este trabajo debe completarse con un estudio detallado mediante simulación numérica del proceso de tratamiento térmico así como de su interacción con los defectos localizados en el componente.

**PALABRAS CLAVE:** Turbina Pelton, análisis de fallo, acero ASTM CA-6NM

## ABSTRACT

In this work, the fracture of a Pelton turbine with big dimensions, manufactured in ASTM CA-6NM steel, after receiving a quenching plus tempering heat treatment, is analysed. This incipient research was focused on several aspects. First, it was checked the fulfilment of the specification during the fabrication of the component. Next, the homogeneity of the part was suited; for this purpose, several regions in the broken turbine were selected, and the chemical composition was analysed. Moreover, the metallographic nature, the mechanical behaviour through Vickers tests was also determined. The fractographical study allowed at identifying the predominant fracture mechanisms and the defects present in the fracture surface. The scope of this work must be completed with a detailed numerical simulation of the heat treatment process and its interaction with the defects found on the broken component.

**KEYWORDS:** Pelton turbine, failure analysis, ASTM CA-6NM steel

## 1. INTRODUCCIÓN

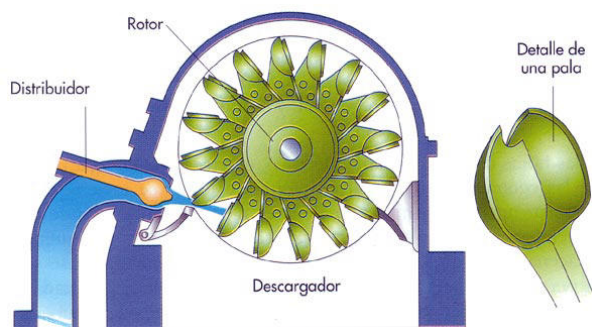
La turbina Pelton (Figura 1), inventada por Lester Allan Pelton en 1879, representa uno de los tipos más eficientes de turbina hidráulica. Consiste en una rueda (denominada rodete o rotor) dotada de cucharas (palas o álabes) en su periferia, las cuales están especialmente fabricadas para convertir la energía hidráulica del chorro de agua que incide sobre las cucharas en energía mecánica, para posteriormente convertirla en energía eléctrica con un generador.

Las turbinas Pelton están diseñadas para explotar grandes saltos hidráulicos de bajo caudal. Las centrales hidroeléctricas dotadas de este tipo de turbina cuentan, la mayoría de las veces, con una larga tubería llamada

galería de presión para transportar al fluido desde grandes alturas, a veces de hasta más de doscientos metros. Al final de la galería de presión se suministra el agua a la turbina por medio de una o varias válvulas de aguja, también llamadas inyector, los cuales tienen forma de tobera para aumentar la velocidad del flujo que incide sobre las cucharas.

Los álabes de la turbina pueden estar fundidos con la misma rueda o unidos individualmente por medio de bulones o pernos, siendo ésta la forma más común de fabricación, ya que facilita su construcción y mantenimiento. Sin embargo, se funden en una sola pieza rueda y álabes cuando la rueda tiene un gran velocidad específica: con este proceso de fabricación se

logra mayor rigidez, solidez uniformidad y montaje rápido.



**Figura 1.** Esquema de la disposición y funcionamiento de una turbina Pelton

Como puede intuirse a partir de lo dicho, el proceso de selección de materiales para la fabricación de turbinas Pelton debe ser especialmente cuidadoso, puesto que durante su vida en servicio debe resistir solicitaciones como la fatiga, la corrosión y la erosión. El acero o la fundición de grafito laminar, resisten perfectamente estas condiciones cuando son moderadas. Cuando las condiciones trabajo son más exigentes, se recurre al acero aleado con níquel, en el orden de 0.7 a 1%, y con un 0.3% de molibdeno. Para condiciones muy severas, con aguas corrosivas, se emplean aceros inoxidables martensíticos aleados al Ni y Mo, como el CA-6NM.

En este trabajo se analiza el proceso de rotura de una turbina Pelton de grandes dimensiones, fabricada en una sola pieza de acero ASTM CA-6NM. Tras recibir un tratamiento térmico de temple y revenido. La Figura 2 permite apreciar una imagen de la superficie de fractura de este componente.



**Figura 2.** Fotografía mostrando la rotura de la turbina Pelton

## 2.- MATERIAL Y TRATAMIENTO TÉRMICO

De acuerdo con la especificación técnica suministrada por el fabricante, la turbina Pelton aquí analizada está fabricada en un solo bloque de acero GX4CrNi13-

4+QT, de acuerdo con la norma europea EN10283. Este acero se corresponde con el ASTM CA-6NM. La Tabla 1 recoge la composición química establecida en la especificación del material:

**Tabla 1:** Composición del material (% en peso) de acuerdo con la especificación ASTM

C <sub>max</sub>	Cr	Ni	Mo
0.06	11.5-14.0	3.5-4.5	0.40-1.00

Asimismo, en la Tabla 2 se presentan algunos valores típicos de las propiedades mecánicas.

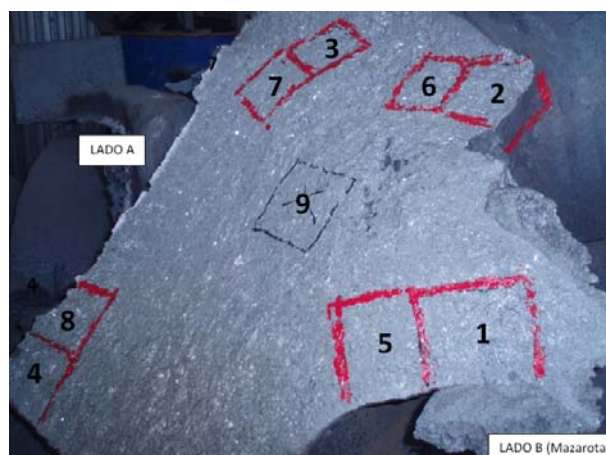
**Tabla 2:** Propiedades mecánicas típicas del acero ASTM CA-6NM

Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Elongación (%)
550	755	15

Como se aprecia en la especificación europea, el material debe recibir un tratamiento térmico de temple y revenido.

## 3. DESPIECE DEL COMPONENTE

Tras recibir uno de los grandes bloques que se muestran en la Figura 2, se procedió a su despiece, extrayendo una serie de cupones de diferentes regiones de la pieza. La Figura 3 permite apreciar, sobre la superficie de fractura, las zonas de extracción de cupones. Se ha procurado tomar muestras repartidas por el contorno y por el interior de la pieza, a fin de detectar posibles heterogeneidades.



**Figura 2.** Fotografía mostrando la rotura de la turbina Pelton

## 4. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se dispone de varias fuentes de información relativas a la composición química del material constitutivo de la turbina Pelton aquí analizada; en primer lugar, el

propietario ha suministrado el informe de la composición química durante la colada, cuyos resultados se reproducen en la Tabla 3 donde, además, se han incluido los valores recomendados. Como puede apreciarse, todos los elementos químicos satisfacen los límites impuestos por la especificación.

**Tabla 3.** Composición química (% en peso) según especificación, valores recomendados y en colada

Elemento	Mínimo	Ideal	Máximo	Colada
C	0.02	0.05	0.05	0.031
Si	0.00	0.70	1.00	0.417
Mn	0.80	0.90	1.50	0.845
P	0.00	0.00	0.03	0.0107
S	0.00	0.00	0.01	0.004
Cr	12.00	13.00	13.50	12.343
Ni	3.50	4.50	5.00	4.061
Mo	0.00	0.00	0.70	0.631
V	0.00	0.00	0.20	0.043
Cu	0.00	0.00	0.30	0.168

Por otra parte, en el contexto de esta investigación se han realizado análisis químicos (técnica EDAX, espectroscopía de energía dispersiva por rayos X) en las regiones 1, 2, 3, 4 y 9 de la pieza. Los principales resultados se recogen en la Tablas 4-8.

A pesar de que se trata de una técnica semi-cuantitativa, de forma que los resultados deben ser considerados con cierta cautela, se han detectado algunos patrones repetitivos. En concreto, en varios de los análisis los resultados han revelado una ligera pobreza en Mn y un ligero exceso de Mo.

**Tabla 4.** Composición química (% en peso) en la región 1 de la turbina

Elemento	Promedio	Desviación
Si	0.53	0.17
Cr	12.89	0.15
Mn	0.72	0.32
Fe	79.90	0.14
Ni	4.29	0.11
Mo	1.66	0.25

**Tabla 5.** Composición química (% en peso) en la región 2 de la turbina

Elemento	Promedio	Desviación
Si	0.55	0.06
Cr	13.18	0.36
Mn	0.73	0.13
Fe	79.91	0.66
Ni	4.24	0.37
Mo	1.41	0.12

**Tabla 6.** Composición química (% en peso) en la región 3 de la turbina

Elemento	Promedio	Desviación
Si	0.43	0.14
Cr	12.98	0.11
Mn	0.94	0.36
Fe	80.68	0.91
Ni	3.88	0.65
Mo	1.08	0.31

**Tabla 7.** Composición química (% en peso) en la región 4 de la turbina

Elemento	Promedio	Desviación
Si	0.48	0.03
Cr	12.49	0.34
Mn	0.78	0.32
Fe	80.54	0.35
Ni	4.37	0.28
Mo	1.34	0.13

**Tabla 8.** Composición química (% en peso) en la región 9 de la turbina

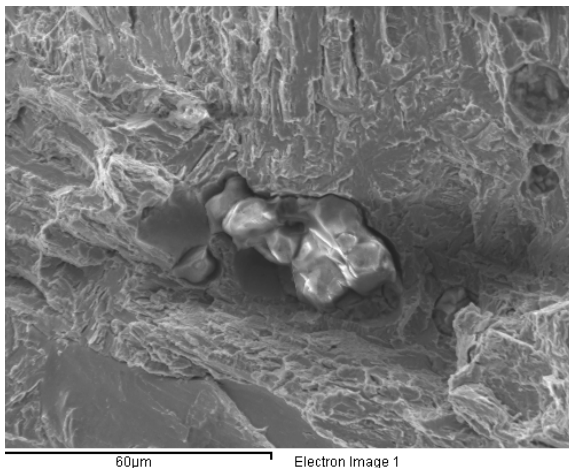
Elemento	Promedio	Desviación
Si	0.53	0.12
Cr	13.01	0.35
Mn	0.62	0.13
Fe	79.49	0.28
Ni	4.54	0.11
Mo	1.80	0.33

#### 4. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

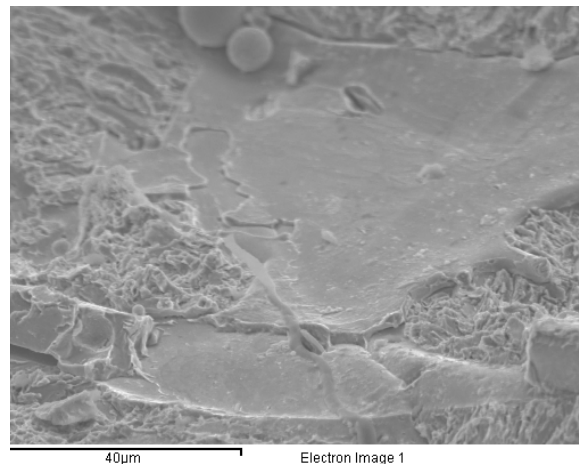
En esta sección se recogen algunas imágenes ilustrativas del estudio fractográfico efectuado, las cuales se comentan brevemente a continuación:

- La Figura 3 ofrece una de las imágenes tomadas sobre la muestra 1, en la que puede apreciarse un elemento no identificado. La composición química del mismo revela que se trata de una alúmina.
- La Figura 4 permite apreciar una región parcialmente fundida, de pequeñas dimensiones, localizada en la muestra 2. También se han localizado ejemplos de fusiones parciales en otras zonas aunque siempre de pequeña entidad, esperables en una pieza de grandes dimensiones.
- La Figura 5 permite apreciar los mecanismos dúctiles (microhuecos) responsables de la propagación de fisura en la zona 4.
- Por el contrario, en la región central (zona 9) se observa una presencia mayor de mecanismos frágiles (decohesiones intragranulares) acompañada, en ocasiones (véase la Figura 6) por pequeños desgarros de fusión parcial.

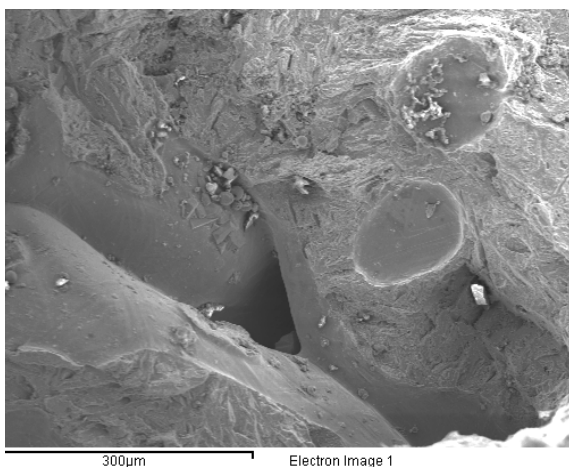




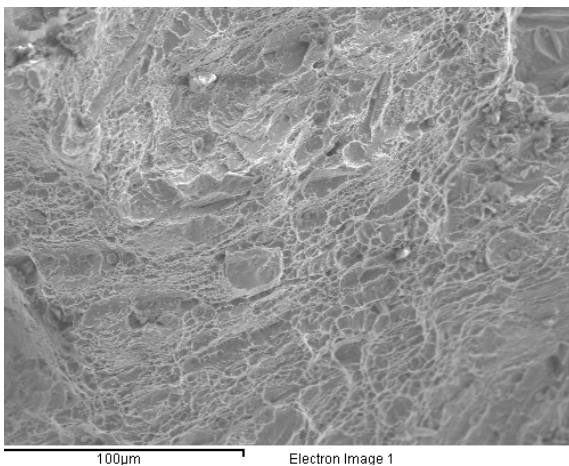
**Figura 3.** Alúmina detectada en la región 1



**Figura 6.** Mecanismos frágiles y fusión parcial en la región 9



**Figura 4.** Fusión parcial detectada en la muestra 2

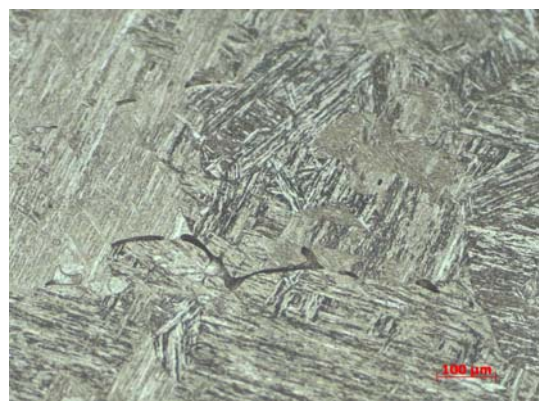


**Figura 5.** Mecanismos dúctiles de propagación en la región 4

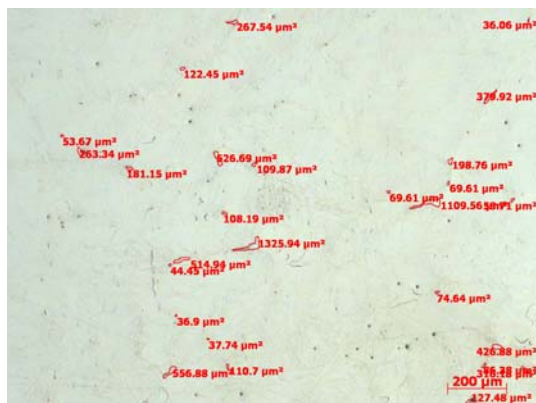
## 5. ESTUDIO METALOGRAFICO

Se he efectuado un estudio metalográfico sobre cada una de las cinco muestras tras pulido hasta calidad de espejo y diferentes ataques (vilella, karlin,  $\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ ). Como se aprecia en las imágenes que se adjuntan, la microestructura está constituida predominantemente por martensita revenida con presencia ocasional de ferrita. A modo de ejemplo, la Figura 7 permite apreciar una de las micrografías obtenidas sobre la muestra 4.

Este estudio se ha desarrollado sobre todas las muestras, cuantificando mediante análisis de imágenes la cantidad de ferrita. La Figure 8 muestra una imagen correspondiente a la cuantificación. El resultado del estudio permite afirmar que no se han detectado diferencias apreciables en cuanto al contenido de ferrita entre las diferentes regiones.



**Figura 7.** Ejemplo de la distribución de fases en la muestra 4



**Figura 8.** Cuantificación de ferrita (ejemplo) sobre la muestra 1

## 6. PROPIEDADES MECÁNICAS

Se han efectuado varios ensayos de caracterización de las propiedades mecánicas y en fractura. En la Tabla 9 se presentan los principales resultados del ensayo de tracción; comparando con los valores de la Tabla 2 se puede comprobar la idoneidad mecánica del material.

**Tabla 9:** Resultados del ensayo de tracción

Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Elongación (%)	Reducción área (%)
640	840	16.5	33

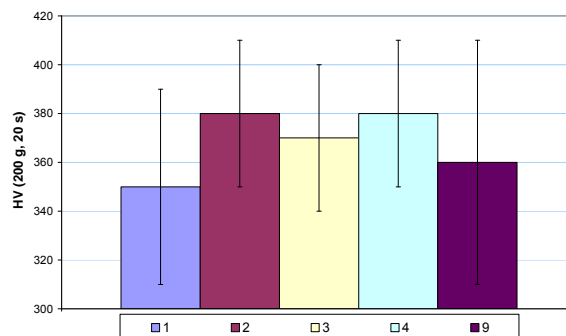
Por otra parte, se han efectuado tres ensayos de impacto Charpy, a una temperatura de 0°C; los valores de energía absorbida son de 95, 98 y 100, esto es, se trata de una respuesta tenaz y homogénea, lo que invita a pensar que a dicha temperatura el material se encuentra en la región upper shelf.

Se ha efectuado, asimismo, un ensayo de dureza Brinell, ofreciendo el resultado de 262 HB.

A fin de detectar posibles heterogeneidades en la muestra se ha desarrollado una campaña de ensayos de dureza Vickers en diferentes regiones. La Figura 9 permite apreciar los valores obtenidos indicando en cada caso el valor medio y la desviación estándar (en cada región se han realizado 25 ensayos con cargas de 200 g durante 20 s). Los valores obtenidos concuerdan razonablemente con lo esperable en una microestructura de martensita revenida, propia de este material con el tratamiento térmico de temple y revenido.

Como puede apreciarse en la Figura 9, son las zonas 2 y 4 las que se encuentran en el contorno de la pieza, en contacto con su superficie exterior. Por otra parte, las durezas en las zonas 1, 3 y 9, ofrecen valores más moderados y se encuentran en el interior de la pieza. No obstante debe tenerse en consideración el valor de las incertidumbres obtenidas (desviación estándar, indicada en la propia figura). En este sentido, puede descartarse

la existencia de comportamiento mecánicos diferentes en función de la región sobre la pieza.



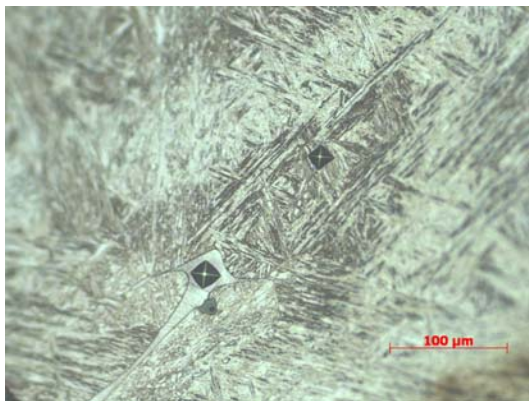
**Figura 9.** Resultados de dureza Vickers en diferentes regiones

Como se ha indicado anteriormente, el estudio metalográfico evidencia la existencia de dos fases claramente diferenciadas, una poco abundante (ferrita) y otra con una presencia mucho mayor (martensita revenida). Para una correcta identificación de las mismas se ha efectuado una campaña de microdurezas con cargas reducidas (20 g, 20 s) seleccionando cuidadosamente el punto de aplicación del indentador.

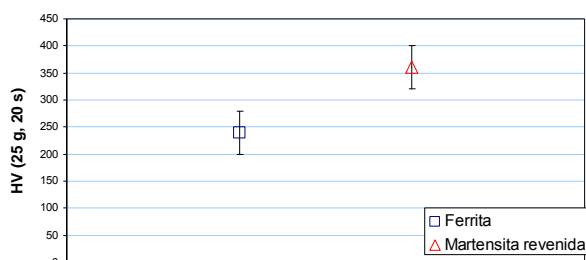
La Figura 10 permite apreciar un ejemplo de una de las microdurezas llevadas a cabo sobre una de las islas de ferrita  $\delta$  localizadas. Debe indicarse que, en todos los casos, las islas de ferrita presentan reducidas dimensiones por lo que ha resultado imposible realizar las microdurezas en condiciones idóneas (esto es, garantizando que la distancia entre la huella y el contorno de la isla de ferrita sea de, al menos, tres veces el tamaño de la propia huella; este hecho se pone claramente de manifiesto en el caso del ejemplo mostrado en la Figura 10). Por ello, presumiblemente los valores de dureza en la ferrita obtenidos experimentalmente, serán más elevados que los que indica la bibliografía.

A modo de ejemplo, los resultados obtenidos para la muestra 1 -dureza media junto con la desviación estándar correspondiente, para cada fase- se ofrecen en la Figura 11. En todos los casos se observa una diferencia apreciable de dureza entre fases siendo los valores de la martensita revenida adecuados para esta fase mientras que los de la ferrita resultan elevados respecto de los valores habituales; este hecho puede tener su explicación en las consideraciones expuestas en el párrafo anterior, relativas a la representatividad de los resultados.

Otro aspecto relevante procede del hecho de que los resultados obtenidos son similares, con independencia de la región en la cual se hayan efectuado los ensayos.



**Figura 10.** Ejemplo de microdureza sobre una isla de ferrita



**Figura 11.** Resultados de los ensayos de microdureza Vickers sobre cara una de las fases, muestra 1

## 7. DEFECTOLOGÍA

El estudio metalográfico y fractográfico ha permitido apreciar una serie de defectos interiores, de pequeña entidad, en las piezas analizadas. En el Apartado 4 se señaló la existencia de regiones con fusión incompleta, que pueden actuar como precursoras de una rotura frágil ante estados tensionales existentes en la pieza. Queda por averiguar y cuantificar la entidad de las tensiones térmicas residuales en la pieza tras haber recibido un tratamiento térmico de temple y doble revenido.

Por otra parte, se ha apreciado la existencia de fisuras en el interior de alguno de los cupones analizados. La Figura 12 ofrece, a modo de ejemplo, una de las fisuras localizadas en la muestra 9. En la misma puede apreciarse la nucleación de la grieta en la intercara entre la matriz y la banda de ferrita  $\delta$ . Una discontinuidad de esta naturaleza puede desencadenar un fallo frágil en presencia de un estado tensional desfavorable. Dicho estado tensional podría estar originado por las tensiones residuales generadas por el tratamiento térmico.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En atención a los razonamientos recogidos en este trabajo, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- Existe una ligera diferencia de comportamiento mecánico entre las diferentes zonas analizadas de la pieza (como ha mostrado el estudio de dureza

efectuado), si bien, dichas diferencias quedan recogidas dentro de las incertidumbres experimentales. Por dicho motivo, la pieza puede considerarse como homogénea desde el punto de vista mecánico.



**Figura 12.** Fisura localizada en el interior de la muestra 9

- La rotura de la pieza parece tener su origen en la zona central de la misma en la que se aprecian pequeñas fisuras emergentes. No obstante estas también están presentes en alguna de los cupones periféricos. No se puede ser concluyente respecto a las causas de las mismas.
- Queda por determinar el papel que las tensiones residuales pueden haber desempeñado en el proceso de rotura. Asimismo, se desconoce el comportamiento en fractura del material en función de la región de análisis.
- El tipo de propagación observado es mixto con zonas caracterizadas por la presencia de roturas transgranulares, y otras con predominio de microhuecos.
- El acero analizado presenta una microestructura de tipo duplex con presencia de ferrita y martensita revenida. Una primera observación muestra un predominio de la segunda con pequeños porcentajes de la primera; si bien se precisa un estudio mas profundo para obtener una distribución real de ambas. No se han detectado variaciones en la distribución de las fases presentes en función de la ubicación en la pieza.

## REFERENCIAS

- [1] Kubiak J. Urquiza G. Rodríguez J.A. González G. Rosales I. Castillo G. Nebradt J. Failure Analysis of the 150 MW gas turbine blades. Engineering Failure Analysis 16 (2009) 1794-1804.
- [2] Gysel W. Gerber E. Trautwein A. CA6NM: New Developments Based on 20 Years' Experience. Stainless Steel Castings, ASTM STP 756, 1982, PP. 403-435.