

# ESTUDIO DEL FALLO DE UNA CORONA DENTADA

A. M. Irisarri, J. Merino, B. Zamorano

INASMET. Departamento de Caracterización, Comportamiento y Fiabilidad. Mikeletegi Pasealekua, 2, Parque Tecnológico / Teknologi Parkea E-20009 Donostia-San Sebastián, España

**Resumen.** El presente trabajo describe la elaboración del estudio acerca de las causas de la rotura de varios dientes de una corona dentada. Tras la realización de una observación visual, un análisis químico, un estudio metalográfico y varias medidas de dureza Vickers en diferentes zonas de un diente, se concluyó que el fallo se había producido por un mecanismo de fatiga de pie de diente. El hecho de que la raíz de los dientes no haya recibido ningún tratamiento térmico superficial, unido al punto de concentración de tensiones que constituye la raíz del diente, han sido factores determinantes a la hora de producirse el fallo de estos dientes.

**Abstract.** This paper explains the development of a study about the causes of several teeth breakage, located in a gear ring. After a visual observation, a chemical analysis, a metallographic study and several measures of Vickers hardness in different zones of a tooth, it was concluded that the failure was promoted by a mechanism of root fatigue. The fact that the teeth root has not received any surface heat treatment, added to the stress concentration point that it constitutes, have been decisive factors in the premature failure of these teeth.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una corona dentada está formada por un componente mecanizado que transmite tanto la fuerza como el movimiento de un elemento en una unidad de trabajo a otro que puede ser de la misma unidad de trabajo o de otra diferente. De la misma forma, esta transmisión se puede dar en el mismo plano y/o dirección, o en planos y direcciones diferentes.

La forma en la cual las superficies de los dientes de unos engranajes alineados apropiadamente contactan entre sí es la responsable de las grandes cargas que los engranajes son capaces de soportar. En teoría, los dientes de los engranajes están en contacto entre sí por medio de líneas o puntos, pero en la práctica, y debido a la deformación elástica de éstos, el contacto ocurre a lo largo de unas bandas estrechas o en pequeñas áreas. El hecho de que cada parte del diente esté cargada durante un periodo muy corto de tiempo, evita que se calienten tanto las superficies metálicas como el lubricante intermedio, y permite a los engranajes soportar sollicitaciones cercanas a su límite elástico sin fallo.

Los mecanismos de fallo de una corona dentada pueden ser diferentes en su origen, y excepto por el incremento en el nivel de ruido y en las vibraciones, no existen indicios de fallo hasta que se produce la rotura total. En general, cada tipo de fallo deja unas pistas características en el diente de la corona, y el estudio detallado de éstas puede proporcionar información suficiente para poder establecer las causas del fallo. Los tipos más generales de fallo se pueden dividir en fatiga, fractura por impacto, desgaste y sobrecarga. Sin embargo, un tipo puede no ser específico de un fallo,

pudiendo ser el origen de un tipo, la progresión de otro tipo, y la rotura final de otro diferente.

El objeto de este trabajo es el estudio de varios dientes procedentes de una corona dentada de un molino de carbón, cuya fractura se ha producido en servicio, de forma que se puedan determinar las causas que han provocado el fallo prematuro de éstos. En principio esta corona gira siempre en el mismo sentido por lo que sólo uno de los flancos debería ser activo.

## 2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Con el fin de tener la mayor información posible acerca del fallo de la pieza, se consideró imprescindible que el estudio constara de las tareas que se nombran a continuación:

- A.- Observación macroscópica, a simple vista y con la ayuda de una lupa, de las superficies de fractura de todos los dientes, tratando de identificar posibles indicios representativos de las causas de la fractura de éstos.
- B.- Estudio metalográfico de las probetas obtenidas a partir de los dientes para proceder a su estudio en un microscopio óptico, con el fin de reconocer posibles inclusiones, grietas secundarias representativas, microestructura de diferentes zonas o cualquier tipo de información suplementaria.
- C.- Medida de durezas en diferentes partes del diente, de forma que se pueda obtener

información útil acerca de las propiedades mecánicas del material en zonas estratégicas.

- D.- Análisis químico del material de los dientes, para poder identificarlo y comprobar su idoneidad o no para este tipo de servicio.

Se incluyó también un examen de la superficie de fractura en el microscopio electrónico de barrido pero, debido al fuerte deterioro sufrido durante o con posterioridad al fallo no se pudo observar con claridad ninguna faceta. Por tanto, los resultados de este examen no aportaron ninguna información digna de mención

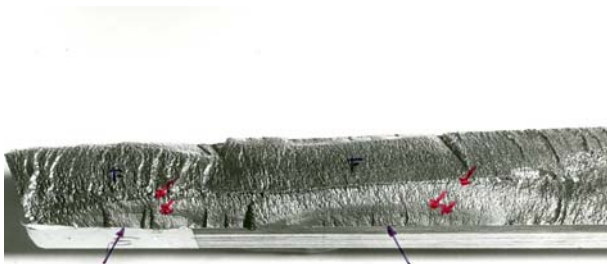
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se recogen los resultados obtenidos y discuten las posibles causas del fallo que conducen a las conclusiones incluidas en el siguiente apartado.

#### 3.1. Observación macroscópica

El primer paso de este estudio consistió en el análisis fractográfico, a escala macroscópica de las diferentes superficies de fractura de diferentes dientes rotos.

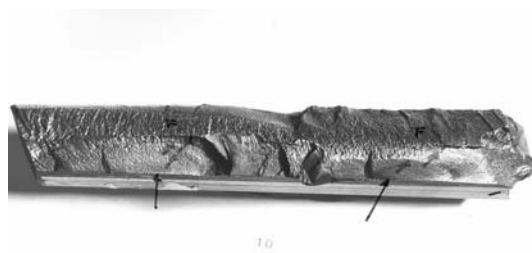
Las figuras 1 a 4 muestran el aspecto de estas superficies de fractura, en las que se pueden apreciar las facetas características de una rotura por fatiga. Destacan las marcas de playa o líneas de parada que representan las diferentes etapas en las que se ha producido la progresión de la grieta que ha originado la fractura. Estas marcas están indicadas en las figuras siguientes (1 a 4) por medio de las flechas situadas en el interior de las superficies de fractura.



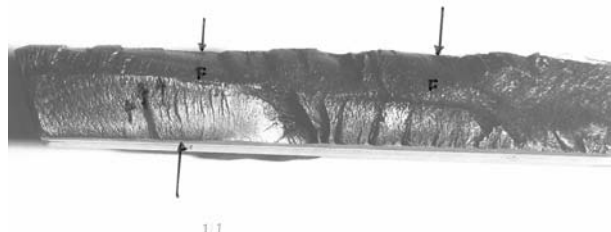
**Fig. 1.** Superficie de fractura del diente 1.



**Fig. 2.** Superficie de fractura del diente 1 visto desde el otro lado



**Fig. 3.** Superficie de fractura del diente 2.



**Fig. 4.** Superficie de fractura del diente 2 vista desde el otro lado.

La trayectoria que siguen las líneas de parada permiten comprobar que la fractura se ha originado en ambas raíces de los dientes, en ambos flancos. Este aspecto se puede distinguir en las figuras presentadas anteriormente, en las cuales las flechas ubicadas en los bordes de la sección indican los puntos de inicio de grieta, y más concretamente en las figuras 1 y 2, que exhiben el aspecto de los dos flancos de un mismo diente, con inicio de grieta en ambos.

El hecho de que las grietas aparezcan en el flanco activo tiene una justificación en los esfuerzos de tracción que

se generan como consecuencia de la flexión del diente. De hecho, los dientes de los engranajes se comportan como viga en voladizo sometidas a flexión. El pie del diente del flanco activo, aquel en el que se aplican las cargas, se halla solicitado a tracción en tanto que el opuesto lo está a compresión. En el caso de los engranajes que operan girando en los dos sentidos el carácter activo o pasivo de los flancos se invierte al cambiar el sentido del giro.

Mucho más difícil es justificar la presencia de grietas en el flanco, teóricamente no activo del engranaje. La experiencia previa apunta a que la aparición de grietas en el pie del diente se asocia con la aplicación de esfuerzos en dicho flanco. Por tanto, es necesario encontrar una explicación al mismo.

Una posible explicación se basaría en una alteración de las condiciones de carga como consecuencia del agrietamiento sufrido por el pie del diente del flanco activo. Esta hipótesis resulta improbable puesto que el agrietamiento lejos de invertir la dirección de las sollicitaciones incrementan el nivel de éstas pero manteniendo la misma orientación.

Otra hipótesis posible asociaría el cambio en la distribución de tensiones, y por tanto del daño de fatiga, con un deficiente funcionamiento de la corona. Existe un punto a favor de esta hipótesis puesto que, como se comentará posteriormente, un trozo de fundición blanca de alto contenido en cromo se halla incrustado entre los dientes de la corona y con claros signos de haber sufrido fuertes golpes e impactos. La introducción de este trozo entre los dientes de la corona y del piñón que engrana en la misma ha podido provocar la aparición de tensiones que en un funcionamiento normal de la pieza no tienen ninguna razón de ser. No es posible rechazar esta hipótesis como causa del agrietamiento del flanco no activo de los dientes. No obstante no se observan signos evidentes de enganchones entre los dientes.

Finalmente, una hipótesis, que, basada en la experiencia de estudios previos realizados en engranajes que funcionan girando en ambos sentidos, apuntaría a que el flanco no activo ha estado operando como activo, por algún motivo no identificado, en algún instante del trabajo del engranaje. El tiempo que debería haber operado en estas condiciones ha debido ser razonablemente prolongado para permitir la formación de las grietas de fatiga. En apoyo de esta hipótesis se halla la aparición de fuerte desgaste y claros signos de desconchamiento (“spalling”) en el flanco no activo. De no haber sido negada esta posibilidad por los responsables del equipo, ésta hubiera sido claramente la hipótesis más plausible y no parece que pudiera ser descartada antes de haber efectuado un análisis más exhaustivo de las condiciones en que ha operado realmente el engranaje.

Aunque los trozos de material recibidos no permiten comprobar con total seguridad este punto, parece que el radio de acuerdo existente en la zona donde se ha

iniciado el fallo son mínimas. Esto supone que existe una fuerte concentración de tensiones en esta zona, la más fuertemente solicitada a flexión, que acelera el fallo.

En todo caso, resulta evidente que una vez generadas las grietas en ambos flancos, éstas crecieron por un mecanismo de fatiga hasta una longitud suficientemente elevada como para que el trozo no fisurado fuese capaz de soportar los esfuerzos y se produjera la fractura final, que en cada figura viene indicada con una F.

### 3.2. Estudio metalográfico

Con el fin de poder estudiar con detalle los dientes rotos, se prepararon dos probetas metalográficas, y en cada una de ellas se incluyó la sección transversal de un diente dañado, desde la cresta hasta la superficie de fractura de los mismos.

Una vez las probetas fueron pulidas convenientemente, se procedió a una primera observación en el microscopio óptico, sin someter las probetas a ningún ataque.

Este primer examen proporcionó dos datos de interés: Por un lado, tal como se puede apreciar en la figura 5, a partir de la superficie de fractura (situada a la izquierda de la micrografía y señalada como SF) se originan otras grietas secundarias (una de las cuales está marcada como GS) que a su vez se subdividen, como indican las flechas. Esta aparición de grietas secundarias es característica del mecanismo de fatiga, aunque también puede producirse en otros diferentes mecanismos de rotura.



**Fig. 5.** Micrografía de la superficie de fractura de un diente.

Otro aspecto significativo resulta la existencia de cierto número de inclusiones que si bien la mayoría se encuentran alineadas en la dirección de forja, en algunos puntos, como los señalados con las flechas (ver figura 6), parecen contornea los granos del material. Esto implica que la reducción de forja fue insuficiente

para borrar totalmente la estructura de moldeo reduciendo de esta forma la tenacidad del material.



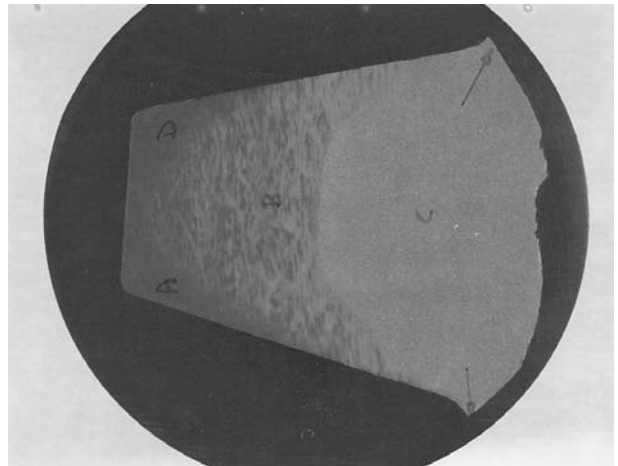
**Fig. 6.** Micrografía que muestra la cantidad de inclusiones presentes.

Posteriormente se procedió a atacar las probetas con el fin de poder estudiar tanto la microestructura del material base, como la capa que había sufrido un tratamiento superficial de endurecimiento. Así, y tal y como se observa en la figura 7, se pudieron distinguir a simple vista 3 tipos diferentes de microestructuras: la primera correspondiente al material base, otra correspondiente a la capa superficial, y otra intermedia que, si bien ha sido afectada por el tratamiento superficial, no se puede considerar propiamente como parte de la capa tratada.

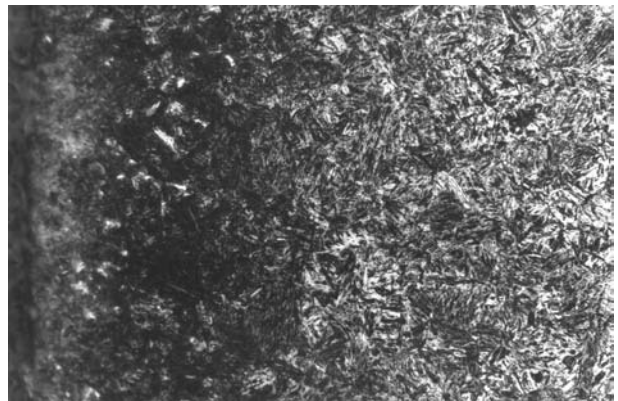
En la figura 7, que muestra una sección transversal de uno de los dientes examinados, se pueden distinguir nítidamente las tres zonas anteriormente comentadas. La zona gris oscura, existente en la cresta y en la parte superior de ambos flancos, corresponde a la tratada superficialmente. Esta zona ha sido subdividida en dos – A y D – con el fin de diferenciar cada flanco. La zona gris clara, que abarca el núcleo del diente y la parte inferior de los flancos, es aquella zona que no ha sido afectada por el tratamiento (zona C). Por último, la zona jaspeada (zona B) es la intermedia a la que se ha hecho alusión anteriormente.

En la mencionada figura, se puede apreciar claramente que los puntos de inicio de fractura se hallan ubicados en el pie del diente, habiendo sido señalados con flechas, y que se encuentran dentro de la zona en la que el tratamiento superficial aplicado no ha ejercido ningún efecto sobre la microestructura o la dureza del material.

En la micrografía de la figura 8, se exhibe una micrografía en la que se hace patente la diferencia entre la microestructura de la capa superficial (izquierda de la imagen), y la zona intermedia (derecha).



**Fig. 7.** Macrografía de una probeta metalográfica atacada en la que se aprecian los tres diferentes tipos de microestructuras.

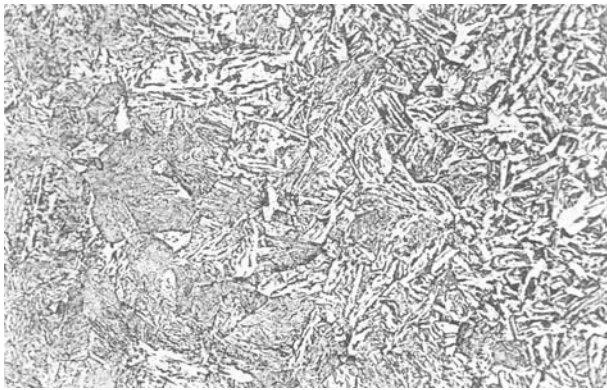


**Fig. 8.** Micrografía en la que se aprecian los dos tipos diferentes de microestructura.

La zona superficial se halla constituida por martensita revenida, sin que se detecten prácticamente islotes de ferrita que pudieran indicar una deficiente austenización previa al temple superficial, ni la existencia de austenita retenida en dicho tratamiento de temple.

La zona B también se encuentra formada por martensita revenida pero con una microestructura más grosera que la obtenida en la capa superficial, confirmándose así la hipótesis en el sentido de que esta zona afectada por el tratamiento superficial presenta una microestructura diferente a la de la propia capa.

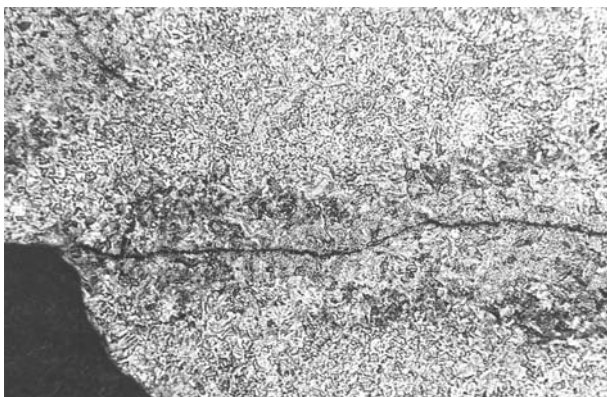
Por último, el núcleo de los dientes (zona C) no ha visto alterada su microestructura por el tratamiento superficial, y ésta se presenta en forma de bainita superior bastante grosera (ver figura 9).



**Fig. 9.** Microestructura del núcleo del diente, formado por bainita superior.

Tratando de contrastar la información obtenida, anteriormente expuesta, se observó la zona de inicio de fractura mostrada en la figura 5, pero en esta ocasión después de haber sido atacada la probeta, confirmandose la hipótesis adelantada en el sentido de señalar que la fractura se ha producido por esta zona no tratada.

Como se puede apreciar en la micrografía de la figura 10, resulta evidente que tanto la fractura principal, en el ángulo inferior izquierdo, como la grieta secundaria, se propagaron a lo largo de la zona de la raíz del diente cuya microestructura, del mismo tipo que la de la zona C, no ha experimentado tratamiento superficial.



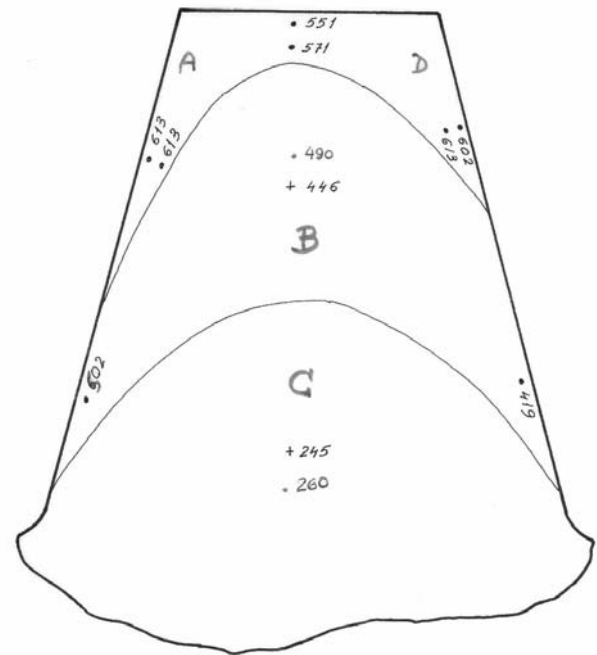
**Fig. 10.** Microestructura de la zona de inicio de fractura de un diente.

### 3.3. Medida de dureza

Como complemento al estudio metalográfico se determinaron los valores de dureza HV1 en diferentes puntos de las distintas zonas. La figura 11, muestra las posiciones en que se efectuaron las medidas, así como los valores registrados en cada caso. Se puede apreciar la diferencia de dureza existente entre las diferentes zonas y, fundamentalmente entre la capa tratada superficialmente y el material base, lo que se traduce para el material base en una menor resistencia a la

tracción y una mayor susceptibilidad a la generación de grietas.

Asimismo se realizaron medidas de dureza HV10, en las zonas B y C, cuyos valores también se muestran en la figura 11, que constituyen una confirmación de la diferencia de valores entre las distintas zonas.



**Fig. 11.** Representación gráfica de los puntos del diente donde se realizaron las medidas de dureza Vickers y los valores obtenidos. Los valores señalados con un punto corresponden a HV1, mientras que los señalados con una cruz corresponden a HV10.

### 3.4. Análisis químico

Para la realización del análisis químico se procedió a extraer viruta de uno de los dientes fracturados, así como de un trozo que presentaba diferente aspecto visual que los demás para comprobar si se trataba del mismo material y dicho material formaba parte del diente, o por el contrario, se trataba de un material completamente extraño a los dientes. Los resultados de ambos análisis se muestran en la tabla que aparece a continuación:

|               | C    | Si   | Mn   | P    | S     | Cr   | Ni  | Mo   |
|---------------|------|------|------|------|-------|------|-----|------|
| <b>Diente</b> | 0.42 | 0.28 | 0.83 | 0.03 | 0.032 | <0.1 | 1.7 | 0.26 |
| <b>Trozo</b>  | 2.61 | 0.60 | 0.63 | 0.03 | 0.020 | 19.2 | 1.1 | 1.5  |

**Tabla 1.** Composición química del diente y del trozo extraño.

Como se puede observar, la composición química del

diente corresponde a la de un acero de bajo contenido de elementos de aleación –níquel y molibdeno–, que a priori se considera adecuado para el uso al cual está destinado. Por otra parte, el material del trozo pequeño posee una composición totalmente diferente a la del diente analizado, que se corresponde con una fundición blanca de alto contenido en cromo, material que o se ha desprendido de alguna otra pieza o ha venido con el carbón a moler.

La composición química de este material concuerda con la de las bolas de molino por lo que parece lógico atribuirle este origen. La presencia de este trozo fuertemente golpeado entre los dientes de la corona indica que el fallo parece haber sido más grave que la simple rotura de dichos dientes.

Ya se ha señalado anteriormente que este trozo puede haberse introducido entre los dientes del piñón y de la corona, alterando e incrementando fuertemente las sollicitaciones que soportan las mismas.

Finalmente, conviene recalcar una vez más que el fuerte deterioro sufrido por los dientes ha impedido el poder identificar aquellas facetas fractográficas que pudieran encontrarse presentes en la superficie de fractura. No obstante, se considera que los datos aportados permiten llegar a las conclusiones que se resumen en el siguiente apartado.

#### 4.- CONCLUSIONES

- a) La rotura de los dientes se ha producido en la zona del pie de los mismos como consecuencia de los esfuerzos de flexión a que se ven sometidos en servicio.
- b) La ausencia de capa superficial dura en esta zona, fuertemente solicitada, y con una concentración de tensiones apreciable agrava el problema.
- c) La microestructura bainítica grosera facilita la progresión de la grieta generada y que el fallo se produzca en un plazo más breve de lo previsto.
- d) Se han discutido diversas hipótesis para justificar la aparición de inicio de fatiga en el plano teóricamente no activo. La alteración de las condiciones de carga, asociada a la generación de grietas en el flanco activo difícilmente puede explicar la formación de grietas en el contrario. La presencia de un trozo de fundición blanca incrustado entre los dientes de la corona podría apoyar la hipótesis de un funcionamiento deficiente de la corona, con aparición de tensiones que no se hallarían presentes en el caso de una operación correcta del engranaje. No obstante, y pese a que esta posibilidad ha sido negada por los

responsables del funcionamiento del equipo, la razón más plausible atribuye este agrietamiento a que durante un tiempo, probablemente bastante prolongado, la corona ha operado actuando el flanco teóricamente no activo como realmente activo, sufriendo las sollicitaciones que ello conlleva.

- e) Se ha encontrado entre los dientes un trozo de fundición blanca, cuyo origen más probable es un trozo de bola de molino rota, que es difícil valorar el papel que ha podido jugar en el proceso de fallo pero, probablemente, ha contribuido a acelerar el mismo.

#### REFERENCIAS

- [1] Varios autores, “Metals Handbook, Ninth Edition volume 11. Failure Analysis and Prevention”.
- [2] Varios autores, “ASM Handbook, volume 19, Fatigue and Fracture”.

