

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo:

Presencia de defectos en las ruedas de ferrocarril y su inspección

Álvaro Presno Vélez

Entidad colaboradora (si la hubiera):

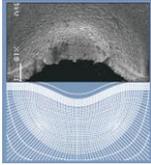
Tutor industrial o externo (si lo hubiera): José Antonio Martínez Álvarez

Departamento (del tutor externo, si lo hubiera):

Tutor académico:

Departamento (del tutor académico):

Universidad de Oviedo



**Master interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras**

Mes y año

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo:

Presencia de defectos en las ruedas de ferrocarril y su inspección

Firma

Firma

Firma

Nombre tutor industrial

Nombre tutor académico

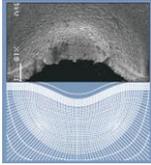
Nombre alumno

o externo (si lo hubiera):

Universidad de Oviedo

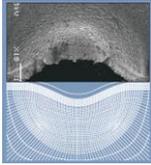
Mes y año

07/2013



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Introducción	4
Las ruedas en el transporte rodado. Conceptos, descripción, defectos.	6
BOGIE.....	6
EJE MONTADO	7
Partes de la rueda	8
La rueda	9
Tipo de rueda	9
Tipos de esfuerzos que soportan las ruedas	11
Tipos de daño que afectan a las ruedas de ferrocarril.....	13
Defectos en la zona de la pestaña.....	15
Defectos en la zona de la banda de rodadura	16
Fisuras a nivel superficial "Spalling"	18
Fisuras superficiales producidas por deslizamiento de ruedas	18
Fisuras superficiales producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura "Rachetting"	20
Fisuras a nivel subsuperficial. Exfoliaciones "Shelling"	22
Fisuras a nivel interno por inclusiones profundas "shattering"	23
Fisuras térmicas	25
Defectos en el velo	25
Fabricación de las ruedas	27
Proceso de forjado y laminado	27
Tratamiento térmico	31
Inspección.....	32
Termografía	33
Breve estado del arte de la termografía infrarroja	34
Efecto de la digitalización en las señales termográficas	38
Parámetros que definen la detectabilidad de defectos	42
Factores que influyen en la inexactitud de la medida termográfica.....	44



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Factores que contribuyen a la detectabilidad de defectos subsuperficiales.....	46
Conclusiones.....	48
Bibliografía.....	49

Introducción

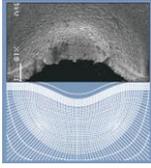
Disponer de una red de ferrocarril segura es una de las mayores prioridades de la UE. En los últimos años se ha producido un enorme ahorro gracias a aumentar los presupuestos para inspección y mantenimiento.

De las preocupaciones más críticas sobre la red de ferrocarril es la seguridad y fiabilidad de las ruedas de ferrocarril, su infraestructura, y la monitorización y control de grietas superficiales o internas. A este respecto se han registrado frecuentes accidentes y paradas técnicas en los últimos años. Desde 2006 a 2009, se han producido 637 accidentes de tren debidos a ruedas fisuradas, con un coste aproximado de 8,15 millones de euros al año.

Esto significa que existe la necesidad de tener métodos fiables para asegurar la seguridad y evitar accidentes e interrupciones en las líneas de ferrocarril.

Uno de los mecanismos a ser inspeccionado de forma más periódica y con mayor criticidad es la rueda y su conjunto. Un fallo en este elemento crítico puede traducirse en graves accidentes con daños materiales y personales. Es por ello que estos elementos son sometidos a controles casi permanentes.

Las ruedas de trenes son objeto de daño y desgaste debido a su interacción con la vía y a las diversas sollicitaciones físicas a las que se ven sometidas. La mayoría de estos defectos empeoran gradualmente según avanza su uso, detectadas a tiempo estas irregularidades pueden repararse o reemplazarse los componentes antes de que el accidente ocurra. Un sistema, cuanto más automatizado posible, para la detección



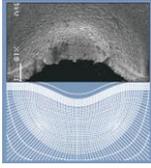
Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

de tales defectos permitiría un aumento de la seguridad y una oportunidad real de ahorro económico y en tiempo de inspección.

Al margen de la seguridad, es necesario asegurar una sostenibilidad económica en el sector, cada vez más en auge, que minimice tiempo y dinero y mejore la operatividad. Además, a pesar de la hegemonía de un grupo de grandes empresas, el sector comienza a liberalizarse, y cada vez juegan un papel más importante pequeñas y medianas empresas, lo que supone un gran interés en nuevos nichos de mercado en el mundo de la inspección.

En el pasado, el método más común de inspección era la inspección visual, que ahora se considera como arriesgada para el nivel de criticidad de los componentes. En la actualidad, la política es la inspección periódica a intervalos regulares, sobre los 240000 km o 9 meses de funcionamiento. Un nuevo método, de características adecuadas, permitiría reducir estos intervalos, los tiempos de trabajo y el coste total de la inspección. Estos resultados se podrían obtener con un sistema que permitiese inspeccionar las ruedas sin desmontarlas del tren, pero que a su vez permitiese una inspección fiable y total del disco y la llanta.

La naturaleza propia de los métodos de ensayo entrañan distintas ventajas y limitaciones, zonas ciegas, tiempos de ensayo, necesidad de personal altísimamente especializado y cualificado o la generación de enormes residuos a tratar.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Las ruedas en el transporte rodado. Conceptos, descripción, defectos.

Aproximadamente un 80% de los fallos en servicio de máquinas y estructuras se deben a la fractura o fatiga de las mismas. Lógicamente al igual que otros elementos, las ruedas ferroviarias se ven frecuentemente afectadas por estos tipos de fallo, por lo que el estudio de mecánica de la fractura y la inspección adecuada, es de suma importancia.

BOGIE

Un vehículo ferroviario consiste en una estructura y un chasis provisto de distintos equipos. Estos equipos están compuesto por: órganos de rodadura, caja de grasa, suspensión, órganos de tracción y choque, caja, frenos y accesorios. A este tipo de chasis se le denomina generalmente *bogie*.

La palabra *bogie* es un término inglés que sirve para designar al carro o eje al que se fijan las ruedas de un vehículo ferroviario, que soportan un vagón, el extremo de arrastre de una locomotora o un extremo de un vehículo y que puede pivotar bajo él.

Un bogie se compone generalmente de dos ejes montados sobre un bastidor, que incorpora una suspensión propia llamada suspensión secundaria. También existe una suspensión colocada entre él y el bastidor que es la denominada primaria. La caja del vehículo queda unida al bastidor mediante el pivote.

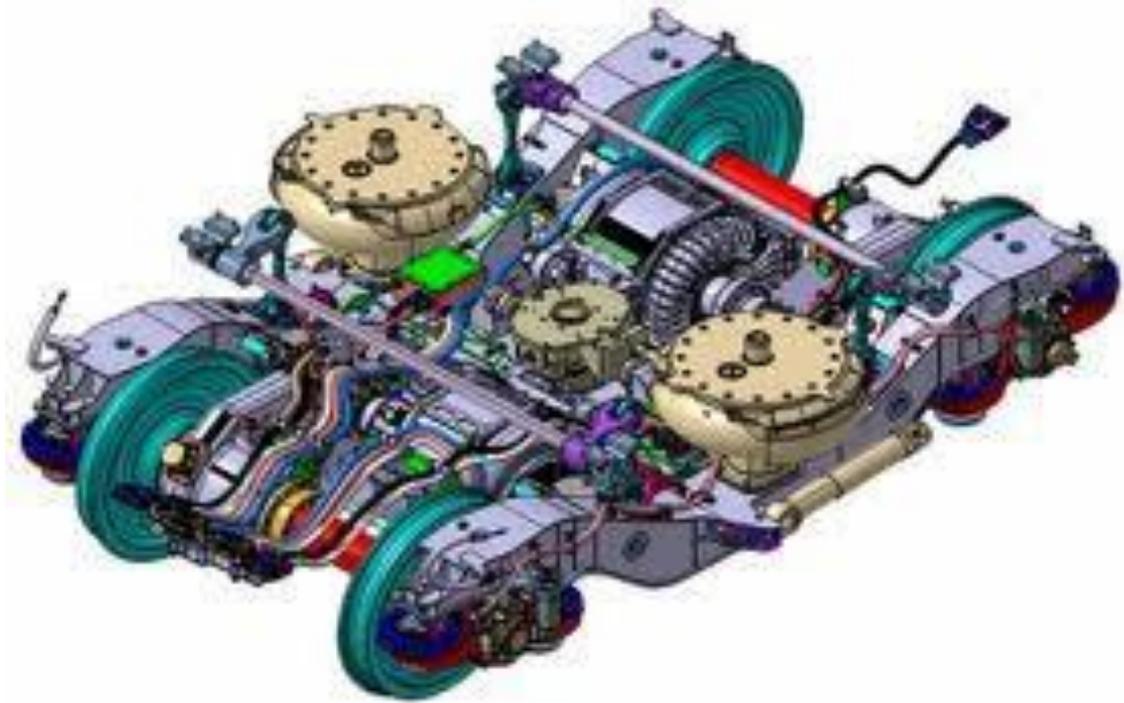
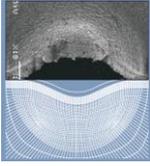


Imagen 1. Modelo 3D de un "Bogie"

EJE MONTADO

El eje montado son dos ruedas montadas rígidamente a un mismo eje. El eje montado esta soportado por rodamientos en las cajas de grasa.

Las funciones principales del eje montado son:

- Mantiene las distancias necesarias entre la vía y el vehículo
- Guía al vehículo por el carril, tanto en curva como en recta
- Transmite las fuerzas de tracción al carril

Los tipos del eje montado dependen del tipo de vehículo (motor o remolque) ,el tipo de frenado: zapata, disco en la rueda, disco en el eje, disco en la rueda y la posición de los rodamientos y las cajas de grasa

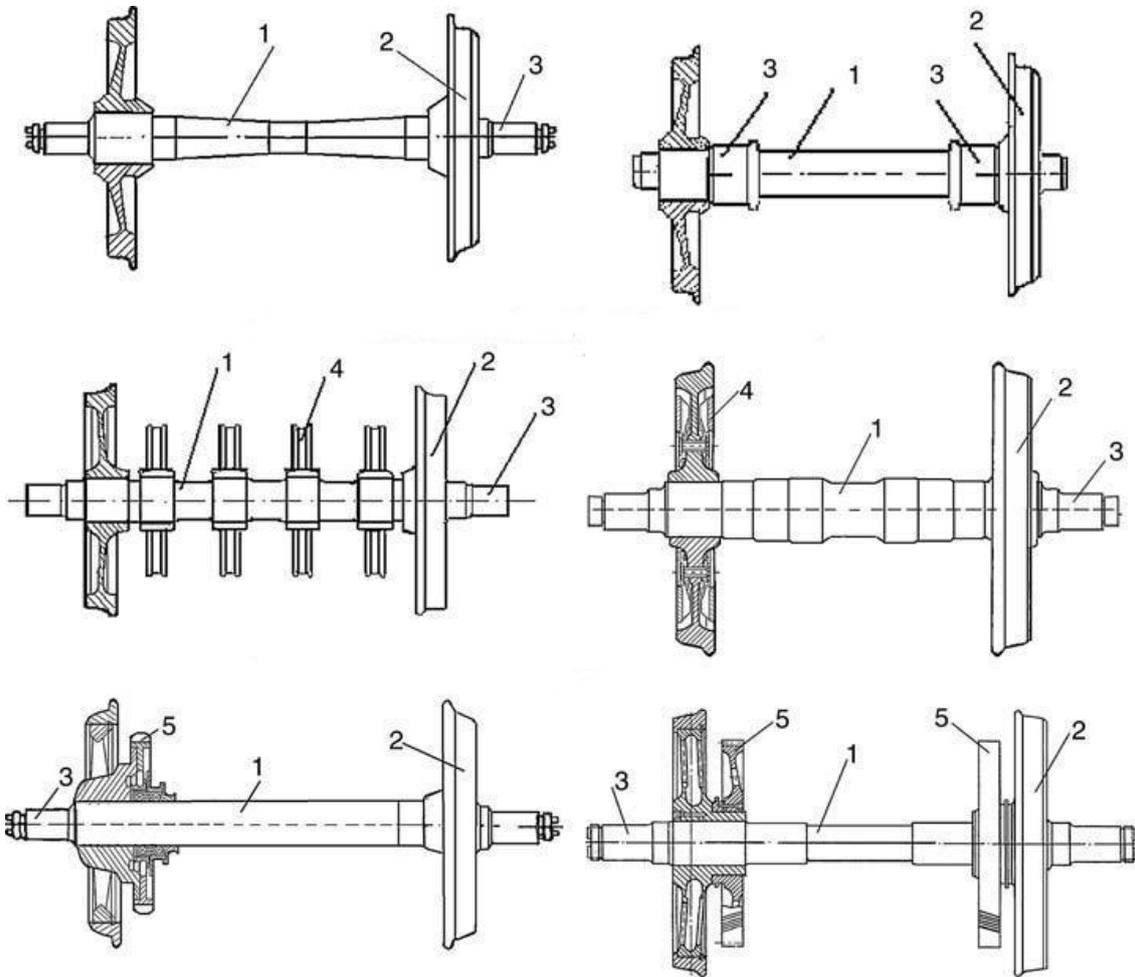
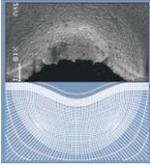
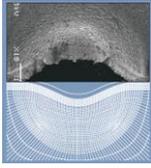


Imagen 2. Diagramas de diferentes ruedas. 1. Eje; 2. Rueda; 3. Rodamiento; 4; Freno de disco; 5 Reductora

Partes de la rueda

Las partes fundamentales de las que consta una rueda de ferrocarril son; Pestaña, banda de rodadura, llanta, velo, cubo y el alojamiento del decalado.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

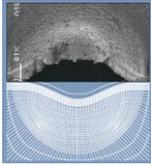
La rueda

- **Pestaña:** Aro saliente en el borde de la llanta de un vehículo ferroviario, destinado a impedir el descarrilamiento.
 - **Banda rodadura:** Superficie de contacto entre llanta y el carril.
 - **Llanta:** Corona circular metálica que, calada sobre el núcleo constituye la superficie de rodadura de la rueda sobre el carril.
 - **Velo:** Corona circular metálica que une la llanta al cubo de la rueda.
 - **Cubo:** Elemento mecánico que establece la unión de la rueda y el eje.
- .Límite máximo de desgaste:** Es el límite hasta el cual se puede reperfilarse una rueda en condiciones de seguridad.
- Alojamiento decalado:** Es el dispositivo mediante el cual se introduce aceite a presión para el calado de la rueda y el eje.

Tipo de rueda

En función de cómo se une la llanta al velo, se pueden encontrar tres tipos fundamentales de ruedas.

RUEDA MONOBLOQUE: La llanta y el velo se unen a través de un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

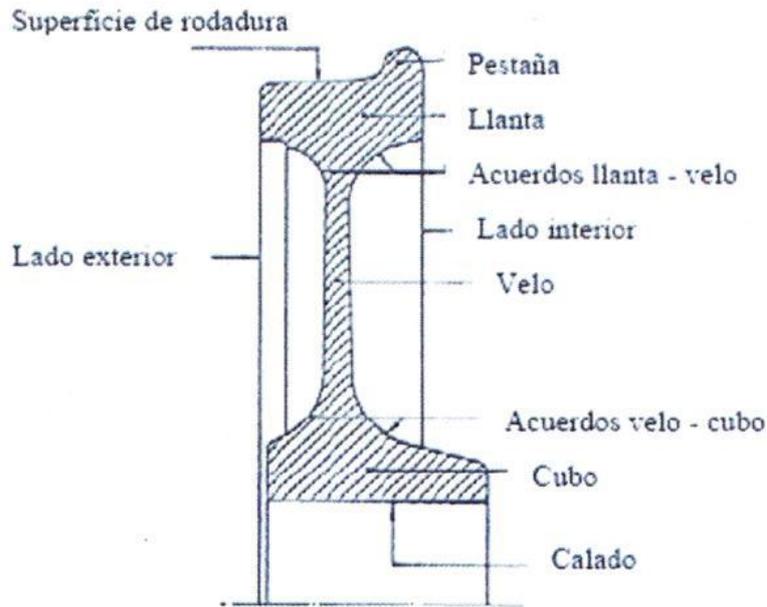
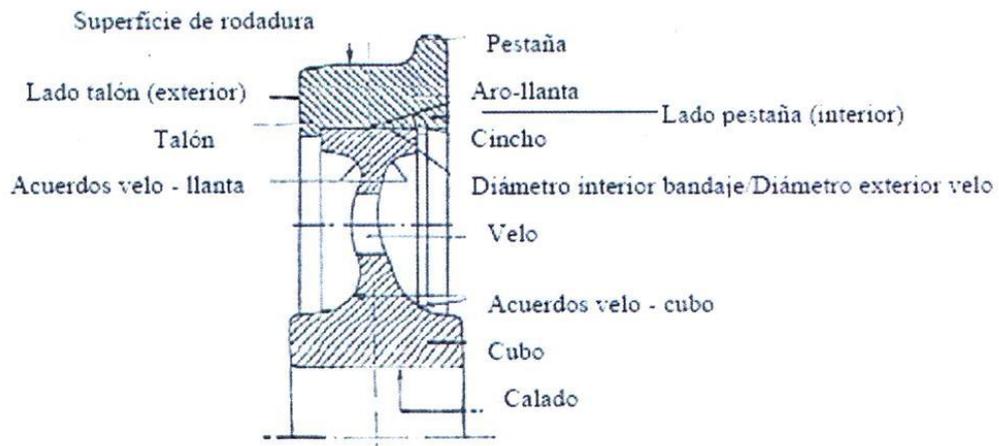
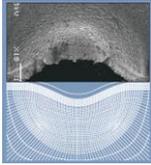


Imagen 3. Rueda Monobloque

CENTRO Y BANDAJE: La llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado Cincillo, con calado en caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo.





Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Imagen 4. Rueda Bloque

RUEDA ELÁSTICA: La llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo. La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.

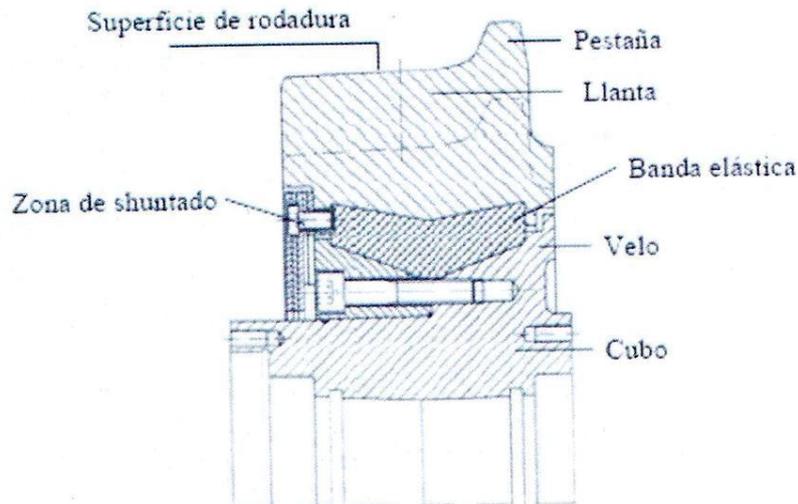
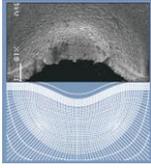


Imagen 5 .Rueda con banda elástica

Tipos de esfuerzos que soportan las ruedas

Para comprender porque surgen las fisuras en las ruedas, es fundamental conocer las sollicitaciones a las que están sometidas. Estas sollicitaciones son debidas a las cargas verticales por eje y a las fuerzas de guiado del vehículo, además sobre la banda de rodadura de las ruedas motrices o sobre aquellas en las que actúan los frenos, se añaden fuerzas por deslizamientos entre ruedas y carril y cargas térmicas.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Los esfuerzos a los que están sometido una rueda pueden clasificarse en varias formas, en este caso nos centraremos en las dos formas más ampliamente utilizadas: espacio de tiempo transcurridos desde que se manifiestan y origen de las mismas.

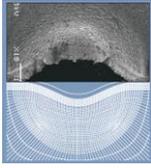
Desde el punto de vista del tiempo transcurrido podemos clasificarlos en:

- **Esfuerzos constantes o de variación lenta en el tiempo:** Las producidas por el peso del coche, en este grupo se incluyen las tensiones residuales de fabricación, las tensiones de calado y las tensiones permanentes desarrolladas tras una frenada de larga duración

-**Esfuerzos que se manifiestan de forma intermitente:** En este grupo se incluyen las debidas a gradientes térmicas

-**Esfuerzos cíclicos:** Se manifiestan en las zona elasto-plástica de contacto entre rueda y carril son las tensiones ligadas a la rotación. Se deben a la carga, al esfuerzo de tracción y al pseudo-deslizamiento. Aunque las cargas no sean muy elevadas, se pueden producir en la zona de contacto rueda-carril deformaciones plásticas en la llanta. Durante los primeros ciclos de carga se introducen en la rueda tensiones residuales, que junto a las deformaciones existentes, producen un endurecimiento del material.

- **Esfuerzos térmicos:** Las frenadas y los esfuerzos motores producen patinaje debido a la pérdida de adherencia entre la rueda y el carril, provocando la aparición de dichos esfuerzos, que afectan sobre todo a la zona de banda de rodadura, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero, templado de las zonas que han patinado. Fuertes frenadas pueden crear tensiones que exceden en ciertas zonas el



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

límite elástico del material, provocando modificaciones en el campo de tensiones residuales, favoreciendo de esta manera la evolución de grietas en zonas profundas

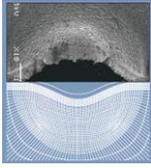
-Esfuerzos mecánicos: La existencia de un esfuerzo vertical aplicado sobre la banda de rodadura en el contacto rodante y un esfuerzo lateral sobre la pestaña debidos a la carga por rueda y al guiado sobre la vía, provocan la aparición de esfuerzos mecánicos.

Los esfuerzos dependen del diseño del bogie, de su diámetro y tipo de ruedas; carga por eje, valor de la masa no suspendida, suspensión y de los sistemas de guiado y frenado. También dependen de las condiciones de utilización, como puede ser la velocidad, carga y tipo de trenes, y de las condiciones de acoplamiento entre la rueda y el carril, como pueden ser sus perfiles. Además, los esfuerzos también dependen de defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalización, diferencia de diámetros entre ruedas de un mismo eje, etc.

Tipos de daño que afectan a las ruedas de ferrocarril

Las fisuras en las ruedas son importantes por tres razones. Una es la seguridad debido al peligro de rotura de la rueda o al peligro de que parte de la pestaña o de la banda de rodadura se desprenda. Otra es el confort, ya que las fisuras pueden llegar a desarrollar cavidades que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros. La última es el consumo de la llanta, ya que para eliminar las fisuras se debe mecanizar la rueda.

Las fisuras pueden producirse por muchas razones, siendo muy difícil en ocasiones delimitar los verdaderos motivos de su inicio, no se entienden



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

completamente todas las causas que las producen o en ciertas circunstancias surgen un tipo de fisuras hasta entonces desconocidas.

Las fisuras nacen a partir de defectos. Los defectos pueden ser de dos tipos:

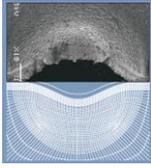
- Defectos producidos durante la fabricación.
- Defectos producidos durante el servicio y sujetos a observación en los talleres de mantenimiento.

Cuando se ha iniciado una fisura, bien debido a un proceso de fatiga o por una imperfección en el material original, es importante conocer bajo qué condiciones la fisura crecerá. Las fisuras crecen básicamente debido a la acción de los esfuerzos mecánicos, mientras que los esfuerzos térmicos juegan a un papel importante en la nucleación de las mismas.

La formación de fisuras y su propagación se debe principalmente a las tensiones de cortadura. En una rueda sujeta a contacto de rodadura pura, la tensión de cortadura mayor se da entre los 3 y 5mm por debajo de la superficie. Si además se aplica una fuerza de fricción, como es la del frenado, esta aumentará la tensión de cortadura en la superficie, dando lugar a dos zonas con una alta tensión de cortadura en la superficie.

Es importante detectar las ruedas en las que se haya iniciado una fisura antes de que ocurra una fractura rápida, sin embargo esto se hace especialmente crítico en zonas de climas fríos, la resistencia a la fractura de los aceros en estas condiciones es, como ya es sabido, menor.

Otro aspecto que merece la pena destacar, es que las ruedas que son más propicias a la aparición de fisuras son aquellas que han sufrido un sobrecalentamiento como consecuencia de una frenada prolongada, debido a que las fuerzas de compresión residuales conseguidas tras el tratamiento térmico durante su fabricación



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

se transforman en tensiones de tracción, que ayudan a la iniciación y propagación de las fisuras.

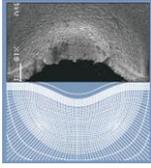
A continuación se describen los principales defectos detectados en las ruedas ferroviarias según la zona de la rueda en los que se producen, así tendremos defectos en la zona de la pestaña, defectos en la banda de rodadura, defectos en el velo y defectos en el cubo.

Es importante tener presente, si bien generalmente un modo de fallo es el preponderante en la rueda, no tiene porque ser el único motivo por el que se haya producido un fallo, sino que se puede dar una combinación de varios motivos.

Defectos en la zona de la pestaña

Se producen fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña. Este tipo de fisuras pueden tener origen térmico o mecánico. En el caso de que sean de origen térmico se suelen deber a una fricción severa de la zapata de freno sobre la pestaña, por el uso de zapatas de geometría inadecuada. En el caso de fisuras de origen mecánico, las grietas se producen por tensiones anormales entre pestañas y carril debidas a trazados de vía deficientes con curvas abundantes y/o excesivamente cerradas.

Estas fisuras pueden verse en los trenes de mercancías, si bien no son muy comunes, esencialmente en Europa.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

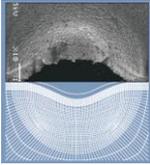
Defectos en la zona de la banda de rodadura

Desgaste por rodadura

La evolución de los perfiles tanto de las ruedas como del carril influye fuertemente en la dinámica del vehículo. Al aumentar el desgaste en las ruedas se incrementa la conicidad equivalente en la unión rueda-ferrocarril, llevando a una disminución en la estabilidad del vehículo a alta velocidad, junto con un efecto negativo en el comportamiento en curva. El deslizamiento entre la rueda y el carril es una de las principales razones para el desarrollo del desgaste y de las fisuras superficiales. Al ir aumentando la velocidad en los trenes, la superficie de las ruedas está sujeta a mayores desgastes y tensiones.

El desgaste regular se produce por la lenta variación de los valores de fuerza de contacto y el deslizamiento, asociado al movimiento longitudinal y lateral del eje de la vía. Desde el punto de vista de la seguridad se deben restringir los parámetros de espesor y ángulo de la pestaña, cuyo mínimo se limita para evitar descarrilamientos. El desgaste inicialmente es uniforme en toda la banda de rodadura, siendo después más acusado en dos zonas, cerca de la pestaña y en el extremo opuesto a la misma. Este desgaste es principalmente debido a las fuerzas de arrastre que actúan en la banda de rodadura cuando la rueda opuesta está con la pestaña haciendo contacto en el carril.

Lógicamente el desgaste de rueda y carril depende fundamentalmente de las durezas de sus materiales, sin embargo, generalmente el desgaste en la banda de rodadura es bastante lento, alrededor de 1,5 a 3mm de media cada 100000 Km. Las ruedas se tornean a lo largo de su vida útil una serie de veces cuyo motivo principalmente es el desgaste y la eliminación de fisuras superficiales. De esta manera el diámetro de la rueda se reduce y debido a esto las tensiones de contacto aumentan considerablemente afectando negativamente a la vida de las ruedas en el servicio.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Otro probablemente asociado a esta disminución de diámetro viene dado porque fisuras que se podían encontrar en el interior de la rueda y que por su posición no estaban afectadas por las máximas tensiones, al ir reduciendo el diámetro pueden ir quedando cada vez más cerca de la superficie y de esta forma fisuras que anteriormente no eran peligrosas, ahora si debemos tenerlas en cuenta.

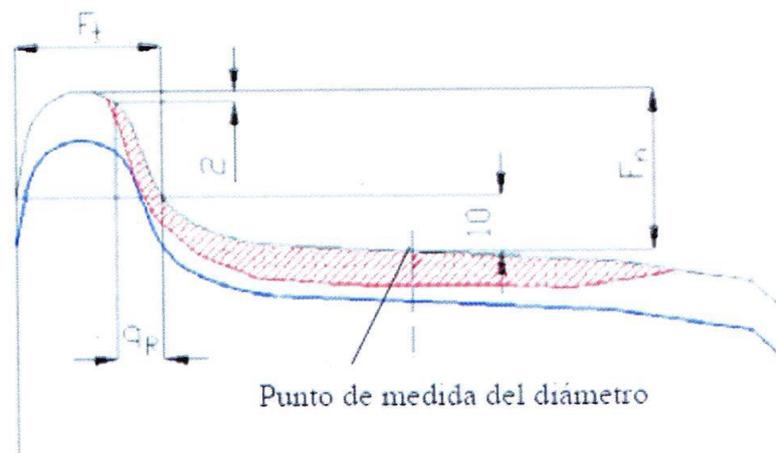
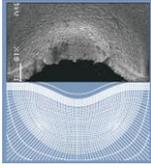


Imagen 6. Puntos críticos frente al desgaste

En los últimos años la optimización en la lubricación y el uso de aceros de mayor resistencia, si como la mejora en las técnicas antideslizamiento y mejor contacto rueda-carril, ha traído consigo la disminución del desgaste por rodadura.

Una vez se ha comentado el desgaste, se enumeran los tipos de fisuras que se pueden desarrollar en función de la profundidad a la que se encuentre sobre la banda de rodadura, así se distingue entre nivel superficial, nivel subsuperficial y nivel interno.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Fisuras a nivel superficial "Spalling"

Las fisuras superficiales, denominadas "spalling", son grietas formadas en la superficie de rodadura por diversas causas y que se propagan hacia el interior de la llanta, llegando a producir desprendimiento de material.

Las fisuras superficiales pueden ser causadas principalmente por el deslizamiento de las ruedas o por la acumulación de deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura, a continuación se comenta cada una de ellas.

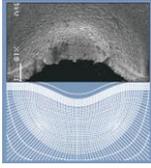
Fisuras superficiales producidas por deslizamiento de ruedas

El deslizamiento de las ruedas puede llegar a producir en la superficie de la rueda un plano. Entre las razones para que se produzca el deslizamiento de las ruedas podemos encontrar desde frenos defectuosos o fuerzas de frenado demasiado altas hasta contaminaciones del carril por hojarasca, lubricantes, hielo, arena, etc.

La fricción entre rueda y carril introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, llegando hasta temperatura próximas a los 800° C, a esta temperatura disminuye el límite elástico en esta zona, pudiendo aparecer deformación plástica. Cuando la rueda vuelva a girar se produce un rápido enfriamiento, produciéndose una transformación de fase en la banda de rodadura, pudiéndose formar martensita.

Tras el enfriamiento y la contracción, debe mantenerse la continuidad entre material localmente plastificado y la banda de rodadura con las restricciones permanentes de las ruedas, por lo que la banda de rodadura queda tensionada.

La martensita es frágil, con una estructura cristalina que tiene un coeficiente de expansión volumétrico de un 0.5% comparado con la estructura perlítica a temperatura ambiente. Esto conlleva a que se produzca tensiones residuales compresivas en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en el material de alrededor. Si la zona afectada térmicamente no se elimina por



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

mecanizado, se formarían fisuras de fatiga por la acción de las tensiones de contacto de rodadura. Mientras la rueda se mueva, la capa de martensita impacta contra el carril favoreciendo el crecimiento de las fisuras.

Una vez que las fisuras crecen, se empieza a producir desprendimiento de pequeños trozos de material, haciendo que de nuevo aumente el nivel de impacto. Las cavidades producidas son del orden de entre 1 y 5mm de profundidad, rodeadas de fisuras con profundidades de hasta 10 y 18mm bajo la banda de rodadura.

Este tipo de defecto se está intentando solucionar desde dos frentes, por un lado mejorando los sistemas de protección anti-patinaje y por otro mejorando las características de dureza y resistencia de los aceros.



Imagen 7. ZAT y desarrollo de grietas

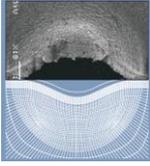
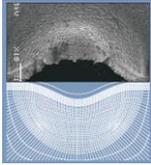


Imagen 8. En la figura se observa una rueda con un gran plano

Fisuras superficiales producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura "Rachetting"

En este caso, el fallo ocurre cuando la carga está por encima del límite elástico de la rueda, que produce flujo plástico, formándose tensiones residuales y endureciéndose el material por deformación. Si la carga se encuentra por encima de un valor crítico límite, el límite plástico se acumulara a la deformación plástica en cada carga. El fallo ocurre por ciclo de fatiga de baja frecuencia.

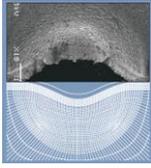


Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Se trata de un fenómeno de rotura que ocurre cerca de la superficie de rodadura y su principal causa son altas fuerzas de fricción, estas llevan a unas altas tensiones de cortadura seguidas de una alta deformación plástica en la superficie. Cuando la ductilidad de la superficie del material está agotada se desarrolla una fisura. Estas fisuras suelen orientarse perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. La deformación produce fisuras que se inician en el material y se propagan a lo largo de granos deformados plásticamente, propagándose inicialmente en la superficie con un ángulo poco profundo, para seguir una dirección axial, por la cual las grietas se propagan circunferencialmente suele ser entre 1.5 y 2mm, produciéndose la rotura final cuando una parte de la fisura llega a la superficie, desprendiéndose una parte de la banda de rodadura.



Imagen 9 . Rueda con defecto en banda de rodadura



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

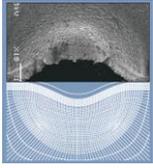
Fisuras a nivel subsuperficial. Exfoliaciones "Shelling"

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como "shelling", es uno de los defectos de ruedas más comunes.

Este defecto está asociado a bajas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por la fatiga de contacto por rodadura. Durante el ciclo de contacto el daño sub-superficial se acumula dando lugar a pequeñas fisuras horizontales. Estas fisuras se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que esta cambie de dirección hacia la superficie.

El "shelling" se caracteriza por tener forma de anillo, predominantemente paralelo a la superficie de rodadura. Según los autores que consultemos, la profundidad a la que se produce este tipo de defectos varía. Según algunos ocurre entre 4 y 5mm y según otros entre 6mm. También existen otros autores que aumentan la profundidad hasta los 10mm, lo que sí que se sabe, es que por debajo de este límite la resistencia a la fatiga se encuentra totalmente gobernada por la presencia de inclusiones microscópicas. Una vez que se ha iniciado la fisura, esta se propaga hasta una profundidad de unos 2mm, desviándose a esta profundidad a una dirección circunferencial, observándose grietas de entre 15 y 300mm antes de la rotura del material.

Los principales puntos de nucleación de fisuras son los bordes de la interfase ferrita-perlita y las inclusiones no metálicas. El proceso depende del material y de las condiciones de operación, pero en todos los casos se manifiesta por la iniciación y propagación de las fisuras en capas próximas a la superficie hasta formar desprendimientos que dan lugar a agujeros. Una vez que las fisuras se han formado, se propagan rápidamente paralelas a la superficie hasta la profundidad de mayor tensión de cortadura.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Este tipo de defecto puede ser muy peligroso ya que al crecer las fisuras circunferencialmente, pueden llegar a desprender grandes secciones de material, lo que podría ocasionar un descarrilamiento.

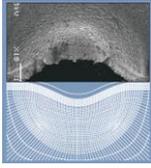
Los factores que provocan la formación de “shelling” son variados, entre ellos encontramos una mala condición del carril, cargas y velocidades excesivas, dureza de la rueda insuficiente, ruedas demasiado pequeñas para la carga a sostener. Todos estos factores incrementan las tensiones de contacto.

Fisuras a nivel interno por inclusiones profundas "shattering"

Este modo de fallo acarrea la pérdida de material en la llanta y en la pestaña, normalmente provocado por inclusiones internas situadas en zonas de contacto sometidas a altas tensiones.

En la práctica ningún material está libre de defectos y sus efectos dependen de su tamaño, forma y orientación. Las fisuras “shattering” se inician por inclusiones de óxido de aluminio en las ruedas forjadas o en huecos o porosidades en el caso de las ruedas fundidas, típicamente americanas. Las inclusiones de alumina pueden tener varios orígenes: productos de desoxidación que no desaparecen durante el fundido, reoxidación durante el vertido del lingote o trozos de material cerámico del horno o de los cucharones refractarios. La pureza de los aceros usados en el ferrocarril ha sido una de las mejores destacables en lo que concierne a los proveedores de ruedas, especialmente con el incremento de velocidades en Europa. Se han incorporado medidas de pureza así como muchos métodos de Ensayos No Destructivos, END, para evitar ruedas con defectos en servicio. La medida de pureza, así como los END se realizan después del tratamiento térmico y del mecanizado de las ruedas.

La profundidad del inicio del defecto bajo la superficie de rodadura depende de las características del material, sin embargo la mayoría de autores defienden que se encuentra entre los 10 y 20mm. Estos defectos se propagan normalmente paralelos a



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

la banda de rodadura hacia el exterior de la misa, antes de propagarse hacia el interior de la rueda. Una vez la fisura se ha iniciado, la propagación es rápida bajo las condiciones normales de carga de la rueda. Sin embargo para que se inicie la fisura es necesario que se produzca una gran carga, como un impacto.

La superficie de fractura tiene típicamente forma de concha, en cuyo centro se encuentra el punto de iniciación de la fisura, ya puede ser por un poro en el caso de las ruedas coladas o una inclusión no metálica en el caso de las forjadas. El fallo final debido a desprendimiento de material, se puede producir hasta con longitudes de fisura de 250mm.

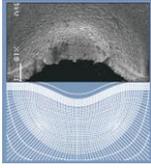


Imagen 10. "Shattering"

La falta de grandes porciones de material producen grandes impactos que pueden dañar el carril y el tren e incluso provocar un descarrilamiento.

Los defectos "shattering" se producen en la zona más blanda de la rueda, en el caso de endurecimiento por deformación plástica se produciría en la zona de transiciones.

El área de interés para este tipo de laminaciones suele ser una banda entre 60 y 70mm de la cara externa de la rueda, comenzando por la zona plana.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Fisuras térmicas

Las fisuras térmicas son muy peligrosas para la ruedas. Estas suelen estar presentes en los vagones de mercancía donde los frenos se aplican directamente sobre la banda de rodadura. Se deben a frenadas anormales, a la introducción de un flujo de calor en zonas de pequeña sección de la llanta o a la fricción de materiales que son agresivos al acero.

Las fisuras se originan por fatiga como consecuencia del resultado de distintos ciclos térmicos. Una vez la fisura se ha formado, se propaga en dirección axial, si existe un campo de tensiones de tracción, hasta que se produce la fractura frágil pudiendo provocar la rápida rotura de la rueda.

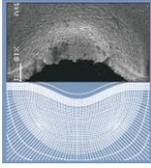
En el caso de vehículos ferroviarios, donde los frenos se aplican sobre discos de freno como son los trenes de alta velocidad, las fisuras térmicas pueden aparecer debido a un deslizamiento de las ruedas, ya sea por la diferencia en la velocidad de giro de las ruedas respecto al carril, o por estar estas desalineadas o desplazadas con respecto al centro de la vía.

Cabe comentar que modelar este tipo de fisuras es muy complicado ya que el estado tensionales de la rueda es el resultado de una combinación de cargas térmicas y mecánicas. Además propiedades mecánicas de la rueda están influenciadas por la temperatura.

De las posiciones iniciadas, la posición en la esquina es la más peligrosa, ya que puede producir que la rueda se abra.

Defectos en el velo

Se tratan de fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

rueda. Estas zonas defectuosas pueden ser debidas a defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación.... Capaces de generar una fisura bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También pueden producirse por entallas de mecanizado o por un diseño incorrecto, partes delgadas, taladros de equilibrio, radios de acuerdos cerrados, zonas de rugosidad elevada.

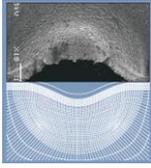
Las fuerzas de servicio, especialmente las producidas en curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga. El momento más peligroso desde el punto de vista de la fatiga, es el paso a máxima velocidad por la curva de radio más pequeño.

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa fisura de fatiga en el interior de las ruedas. Otra zona peligrosa es la zona del velo próximo a los agujeros donde los valores de resistencia a fractura, son los más pequeños en toda la rueda.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de latas cargas verticales y laterales. Una fisura en el velo de las ruedas se desarrolla circunferencialmente como se puede observar



Imagen 11. Fisura circunferencial en velo



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Fabricación de las ruedas

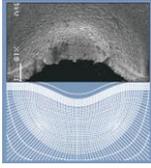
Las ruedas de acero se pueden construir mediante dos procesos: forja o colada. El procedimiento usado en Europa es la forja, mientras que en Estados Unidos es más usada la colada. Posteriormente, a la llanta se la somete a un proceso de temple y revenido dejando el velo y el cubo en estado normalizado.

Se explica a continuación, de forma resumida, las operaciones necesarias para la obtención final de la rueda en el caso europeo, es decir para una rueda forjada. Primeramente nos centraremos en el proceso de forjado y laminado para después comentar el tratamiento térmico realizado.

Proceso de forjado y laminado

La secuencia de pasos es la siguiente:

1. El material de partida son bloques cortados a partir de lingotes o barras de material continuo, con unas tolerancias en peso muy cerradas, las cuales son calentadas hasta la temperatura de forja en un horno de hogar rotatorio. Los bloques calentados se transportan fuera del horno, se les somete a agua a alta presión para limpiar impurezas, se pesan y entonces es forjado en dos operaciones, pasando a llamarse rueda en bloque
2. Después de la limpieza mencionada, una máquina coloca el bloque en la primera estación aplicando la presión. El bloque es centrado con el eje de la herramienta por el dispositivo de centrado que está integrado dentro de la prensa, el desarrollo del material es el mismo en las subsiguientes operaciones de prensado



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

3. Después del final del prensado, la rueda en blanco es sometida a operaciones que le proporcionan el perfil requerido. Este trabajo de reperfilado de la rueda es efectuado en diferentes pasos utilizando los distintos rodillos que forman la máquina. Se consigue espesor óptimo, se da forma a la banda de rodadura, el acodamiento y el contorno interior, y por último se consigue la altura de la llanta necesaria

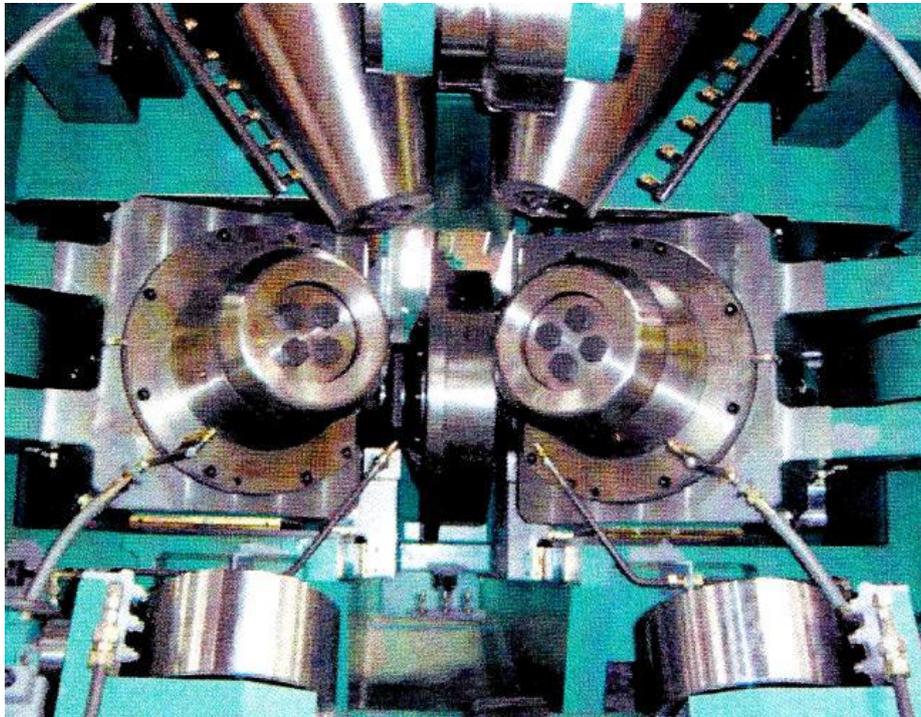
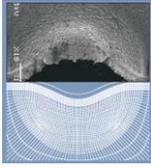


Imagen 12. Herramientas de perfilado

Según la dirección de conformado de la rueda, con este procedimiento se generan tensiones de compresión en la rueda. Este hecho tiene una influencia favorable en las propiedades del material así como en la exactitud en las medidas de la misma.

La distancia entre los rodillos y por tanto el espesor, es controlado durante el proceso de conformado según se produce el crecimiento de diámetro de la rueda. La altura de



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

la llanta se consigue en el último paso de conformado por ajuste de los dos rodillos laterales.

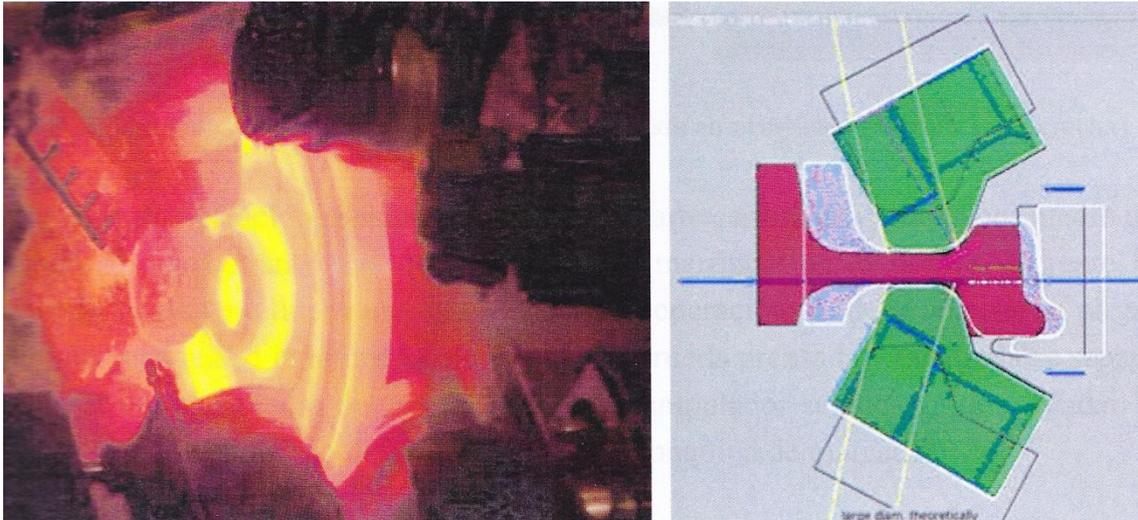
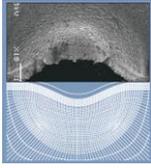


Imagen 13. Operación de conformado y vista en programa informático

Las fuerzas de conformado son generadas de manera hidráulica y transmitida a la rueda en blanco a través de diferentes herramientas. Mediante distintos dispositivos como válvulas, supervisada por regulación electrónica y control de lazo, se adaptan instantáneamente con mucha sensibilidad los movimientos y presiones de operación según los requerimientos del proceso de conformado.

4. Un manipulador toma todas las ruedas conformadas desde el dispositivo de descarga y las traslada hacia la parte inferior de la matriz de la prensa para la deformación del velo de la rueda.

5. La siguiente operación es la perforación de la parte central de la rueda por medio de un cilindro penetrante que está amarrado al martinete de la prensa. Durante la retirada de dicho cilindro una vez ha hecho la operación, se debe amarrar la pieza. Simultáneamente a la retirada del martinete, la rueda prensada y taladrada se separa



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

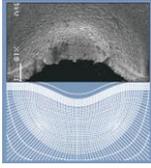
de la prensa por medio de un elevador. Un manipulador se encarga de trasladar la rueda desde la prensa de deformación hasta la máquina de marcado.

6. Todo el proceso está controlado por dispositivos de medida láseres que se encargan del control dimensional de la rueda. Para explotar todas las partes de la rueda, este sistema se instala en una mesa rotatoria de 360°, de forma que los operarios tienen un soporte óptimo para hacer correcciones en la línea de producción y así evitar la producción de ruedas no válidas.

Después del análisis de las medidas, un manipulador coge la rueda para un nuevo transporte hacia las instalaciones de tratamiento térmico y mecanización.



Imagen 14. Línea de transporte



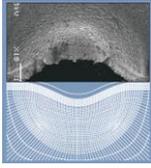
Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Tratamiento térmico

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante 300 seg.

En este punto la llanta se ha enfriado y se contrae, mientras que el cubo y el velo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480°C durante dos horas para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este periodo el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno introduce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente seis horas.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de fisuras, reduciendo el riesgo de falla en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40mm desde la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Inspección.

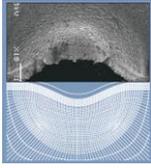
Tanto en la fabricación como en las condiciones de uso, y dado lo delicado de su función, todos estos equipos son inspeccionados de forma regular. Actualmente existen una serie de métodos de ensayos no destructivos, ya consolidados, y que entrañan una serie de ventajas y desventajas. En el contexto de la inspección de bogies, los principales métodos son:

-Líquidos penetrantes

Mediante esta técnica es posible detectar discontinuidades que afloran a la superficie de sólidos no porosos. Para su detección se utiliza un líquido que, aplicado sobre la pieza a examinar, penetra por capilaridad en las discontinuidades y, una vez eliminado el exceso, el retenido en el interior de las mismas exuda y, con la ayuda del revelador, puede ser observado en la superficie de la pieza.

-Partículas magnéticas

Esta técnica se utiliza en materiales ferromagnéticos permitiendo detectar grietas y otras discontinuidades tanto superficiales como próximas a la superficie. La sensibilidad es máxima en las discontinuidades superficiales y disminuye rápidamente a medida que aumenta su profundidad. Si a una pieza de acero al carbono se la somete a la acción de un campo magnético y existe una discontinuidad en su superficie cuyo plano sea perpendicular a las líneas de fuerza del campo, éstas tenderán a salvar dicho plano como si se tratara de un obstáculo ya que tendrá una permeabilidad menor que el acero. Si, en estas circunstancias, se extienden sobre la superficie de la pieza partículas finas de material ferromagnético tenderán a acumularse en los campos de fuga para facilitar el paso de las líneas de fuerza colaborando a restablecer el equilibrio



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

del sistema y disminuyendo de esta forma la energía. La imagen o indicación formada por dichas partículas acumuladas nos dará una idea gráfica de la discontinuidad detectada.

-Ultrasonidos

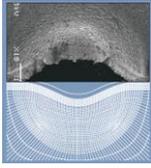
En los equipos convencionales de Ultrasonidos se produce un impulso rectangular corto que excita un cristal en un palpador. El impulso se genera con una tensión eléctrica de alto voltaje. Las vibraciones producidas en el cristal pasan de ser eléctricas a ser mecánicas. La oscilación del cristal es de una frecuencia muy alta (Megahercios) y no es audible por el oído humano. La oscilación producida por el cristal se propaga en el material en forma de ondas sonoras. Las ondas sonoras son reflejadas en una superficie límite y captadas por el palpador. Las ondas captadas se ven reflejadas en la pantalla del equipo (eco). Si se ajusta bien el eco y la pantalla podemos detectar defectos en una pieza, determinar el espesor o determinar la ubicación de reflectores.

Estos métodos pueden exigir desmontar parte o la totalidad del conjunto eje-rueda del bogie, además de ser relativamente lentos, difíciles de interpretar (requieren personal especializado) y en el caso de PM y LP producen una considerable cantidad de residuos contaminantes que tratar.

Otro ensayo no destructivo, no aplicado a elementos rodantes es la termografía.

Termografía

La medida distribuida de la temperatura y su distribución en el tiempo permite deducir la distribución del calor y sus flujos. A través de ello, sin contacto, de forma no invasiva y no destructiva, se pueden predecir estados del material o de su estructura. Para que la inspección térmica provea resultados útiles se han de lograr diferencias de



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

temperatura (contrastes térmicos) entre el rasgo de interés y su entorno, mediante un equipo de medida apropiado y conocimiento para interpretar y analizar adecuadamente los resultados.

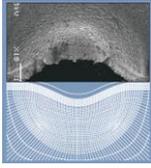
Breve estado del arte de la termografía infrarroja

La temperatura es un parámetro clave en procesos de fabricación, en evaluación de materiales y dispositivos, entre otros. Su medida de forma remota (sin contacto) evita la alteración del objeto de medida, del ambiente que lo rodea o del valor de la medida. La consecución de imágenes térmicas posibilita la observación bidimensional de los mecanismos de transferencia de calor otorgando mayor cantidad de información, en comparación con las técnicas de medida meramente puntuales. El hecho de añadir la posibilidad de un análisis y un registro temporal de esas imágenes, conduce a un mayor control y conocimiento de los procesos bajo inspección. Por ello, la termografía infrarroja (TI) se posiciona como una alternativa seria, fiable y precisa a otras técnicas de ensayos no destructivos (END) como la Radiología Industrial (RX), Ultrasonidos (UT), Corrientes Inducidas (PE), Partículas Magnéticas (PM), Líquidos Penetrantes (LP), Inspección Visual (IV), Emisiones Acústicas (EA) o Ensayo de Fugas (PF).

Cada técnica END tiene sus propias ventajas e inconvenientes. Las propias de la termografía infrarroja se resumen en la siguiente tabla:

Ventajas

- **Rapidez en la inspección**
 - **Sin contacto**
 - **Seguridad (no involucra radiaciones dañinas)**
 - **Resultados relativamente fáciles de interpretar (formato imagen)**
 - **Amplio rango de aplicaciones, posee nichos de aplicación**
-



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

exclusivos

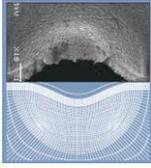
Inconvenientes

- Dificultad de uniformidad de excitaciones en algunas medidas (termografía activa)
- Efectos de mecanismos de transferencia de calor muy variados (convección, radiación y conducción)
- Capacidad limitada de la detección de defectos subsuperficiales
- Disponibilidad para inspeccionar especímenes de cierto espesor
- Problemas de emisividad

La mejora y sofisticación de las cámaras de infrarrojo, el incremento del poder de computación y la mejora del software (algoritmos, modelados) involucrado en el análisis de las secuencias termográficas animan a la búsqueda de nuevos nichos de aplicación de la termografía y a una sustancial mejora de los resultados en las aplicaciones ya conocidas. No hay más que observar el auge de conferencias y publicaciones que tratan estos tópicos y reflexionar sobre las comunicaciones que en estos medios aparecen.

Existe una gran variedad de dispositivos relacionados con la termografía infrarroja que han encontrado su desarrollo comercial en los últimos años. Siendo una tecnología eminentemente militar a finales del siglo XX, se ha convertido en la actualidad en una herramienta de uso común en multitud de actividades civiles.

Se han diseñado nuevos sistemas de captura de imágenes siendo cada vez más pequeños, más compactos y ligeros, de mayores velocidades, sin olvidar una sustancial reducción de su precio. Se comercializan tecnologías que proporcionan sensores sin



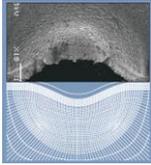
Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

necesidad de enfriamiento, logrando, además, matrices de detectores de mayor tamaño, menor ruido, mejorando la resolución espacial (utilizando nuevos sistemas de lentes) y, adicionalmente, ofreciendo los datos de temperatura digitalizados.

Antes de estos avances, la cámara de infrarrojos básica consistía en un detector con un sistema electromecánico de barrido de elevado ruido y limitado rendimiento. En la actualidad existe una amplia variedad de detectores (cuánticos, bolómetros, etc...) con interfaces digitales de 14 bits, bajo nivel de ruido (menor de 20 mK), tamaños de imagen de 640x382 píxeles, y frecuencias de muestreo de hasta decenas de KHz. Las figuras de mérito utilizadas en su comparación han cambiado como consecuencia de la evolución de los métodos de caracterización y la mejora tecnológica en los respectivos parámetros. Los parámetros actualmente aceptados son: la responsividad, la potencia equivalente de ruido (NEP), la detectividad normalizada, la diferencia de temperatura equivalente al ruido (NETD), la mínima diferencia de temperatura resoluble (MRTD) y la respuesta en tiempo. Otras, menos usadas, son: la linealidad de la respuesta, el acoplo entre elementos del detector, el rango dinámico y la función transferencia de modulación (MTF).

Además, la capacidad de computación aumenta de forma exponencial permitiendo el almacenamiento de un mayor número de secuencias termográficas, el aumento de la velocidad de adquisición de las mismas y el procesado más eficiente y rápido de algoritmos cada vez más complejos.

El software utilizado en termografía infrarroja agrupa un gran número de funciones definidas para el análisis y diagnóstico de las imágenes, la grabación, el almacenamiento y la recuperación de las secuencias termográficas, la comparación de imágenes y su catalogación y, en la actualidad, las funciones propias del análisis cuantitativo de las medidas térmicas.

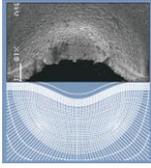


Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

El procesado más básico incluye rutinas para restar las evoluciones de ciertos píxeles a toda la imagen (muy útil si el píxel en cuestión corresponde con una zona libre de defectos, contrastes térmicos). El uso de transformadas aplicadas a toda la secuencia de datos requiere de los algoritmos más eficientes que, en conjunción con el hardware de computación, ofrezcan los resultados del análisis de la forma más clara y rápida posible. No se debe olvidar que se trabaja con tratamiento de imágenes, por lo que el procesado se ve fuertemente implicado por los tamaños de imagen utilizados haciendo necesaria la inclusión de técnicas de reducción de datos bien para la operación con los mismos bien para su almacenamiento. Así se habla de secuencias termográficas sintetizadas o de descomposiciones de imágenes en componentes principales.

Para optimizar la efectividad del software, el operador de un sistema de termografía infrarroja debe estar familiarizado con las técnicas de tratamiento de imagen básicas. Una vez que la señal infrarroja ha sido preprocesada y transformada en temperatura por el software incluido normalmente en el sistema de captura, se realiza a posteriori un tratamiento de imágenes, bien sea para fines de detección de defectos internos o bien para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, tamaño y profundidad). Este procesado puede ser tan sencillo como realizar el contraste absoluto de los valores temporales de temperatura entre dos zonas, asegurando que una de ellas sea libre de defectos (*soundarea*). Una vez detectados los defectos, es igualmente posible estimar la forma y el tamaño de los mismos tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes o segmentación.

Finalmente, mediante el uso de métodos de inversión de la profundidad, se puede establecer la profundidad de los defectos haciendo uso tanto de los datos en el dominio temporal como en el frecuencial, si aplicamos la Transformada de Fourier discreta (TFD). En el dominio del tiempo, la mayoría de estas técnicas requieren de una etapa de calibración a partir de la cual, los datos experimentales pueden ser sometidos



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

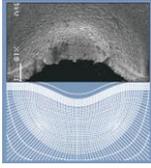
a un proceso de regresión con una relación empírica. En el dominio frecuencial, los métodos de inversión, tanto en termografía lock-in (Ondas internas) como en termografía pulsada de fase, se basan en una relación directa entre la profundidad z y la difusividad térmica μ .

Cualquier software evolucionará por tanto incluyendo cada vez más y más funciones que permitan simplificar, tratar y analizar las secuencias de termogramas. Igualmente incluirá funciones propias del procesado de imagen así como funciones explícitas de uso exclusivo en termografía. Cada fabricante integra su propio software en los sistemas termográficos, al menos con las funciones más comunes relegando las más explícitas a las propias de cada usuario.

Efecto de la digitalización en las señales termográficas

La digitalización de las imágenes en una cámara termográfica produce limitaciones en la medida de la temperatura. Una señal de vídeo analógica es digitalizada de dos formas con una capturadora digital: con un muestreo espacial y con una conversión analógico-digital, convirtiendo valores de voltaje a un nivel digital de una escala de grises.

La frecuencia de muestreo determina el número de píxeles obtenidos en cada línea horizontal. Como máximo, debiera coincidir con la resolución horizontal de la cámara pero, aún así, probablemente, se produzca una degradación de la señal del píxel al no solaparse perfectamente con los elementos originales que compongan el detector. Por otro lado, la conversión analógico-digital tiene una resolución de bit por canal que suele estar comprendida entre los 8 y los 14 bits. Por ejemplo, con 8 bits se pueden obtener 256 niveles en una escala monocromática mientras que podrían obtenerse más de 16 millones de colores si la digitalización de 8 bits se realiza sobre los tres canales cromáticos (rojo, verde y azul).



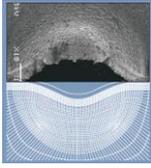
Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

La digitalización está directamente relacionada con el rango dinámico de temperaturas que el sistema es capaz de medir. La diferencia de temperaturas entre el fondo de la imagen y el objetivo es, por lo general, lo que marca el rango dinámico, el margen entre la máxima y mínima temperaturas de la escena. Dependiendo de esos valores, el número de niveles otorgados en la digitalización establece la máxima resolución térmica que puede alcanzarse.

Modificando la ganancia de los amplificadores de los detectores se puede sensibilizar el sistema de medida a señales más débiles aumentando, por tanto, la resolución térmica.

En algunos casos, las cámaras están provistas de un control automático de ganancia y del nivel de offset (nivel que ajusta la temperatura mínima en el rango). La selección de la ganancia y el nivel de offset en el detector limitan así el rango dinámico de la medida pero, el ruido, que equivale a un número concreto de niveles digitales, también se modifica.

Se observa que, según se incrementa el número de bits en la digitalización, el rango dinámico de medida se amplía y que la resolución térmica se incrementa. Igualmente, utilizando un número de bits reducido puede inducirse una limitación en la resolución térmica del sistema, *condición que podría ser más restrictiva que la sensibilidad térmica.*

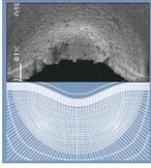


Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Basada en la propagación de las ondas térmicas y el análisis de su atenuación en los materiales, la *termografía* permite realizar un control bidimensional de la temperatura y, haciendo uso de modelados de la transferencia del calor, es capaz de estimar la presencia de defectos internos, su profundidad y propiedades. Estrictamente hablando, *termografía* es una técnica de contacto para obtener la distribución de la temperatura en la superficie de un material mientras que la *termografía infrarroja* no implica tal contacto. Por razones de eficiencia en la inspección (movimiento del objeto bajo inspección, rapidez de la medida, tamaños,...), la termografía infrarroja adquiere mayores ventajas frente a la termografía tradicional y de ahí el interés por su aplicabilidad.

Existen numerosas investigaciones que describen trabajos basados en el uso de la termografía infrarroja para un gran número de aplicaciones como predicción y prevención, aplicaciones médicas, industria del automóvil, edificación, mecánica de sólidos y líquidos, arte, etc.... Se trata de un campo en expansión de aplicación y conocimiento dominado principalmente por el mundo anglosajón. Igualmente, su evolución responde a cualquier innovación o mejora tecnológica en campos diversos como la óptica, la electrónica y la computación.

El abaratamiento de los equipos, la reducción de tamaño y la mejora de prestaciones hacen que la aplicación de la termografía infrarroja disponga de una instrumentación fiable y precisa. Las unidades de sus figuras de mérito incitan al control de más procesos donde la transferencia de calor denote una característica particular, traspasando incluso los umbrales de detectabilidad de las medidas. Con el apoyo de potente hardware, desarrollado o en vías de ser desarrollado, el software ofrece un modelado fiel de las situaciones que ayuda a la interpretación de los resultados. La importancia del software en termografía infrarroja es más patente cuando se pretende realizar un análisis cuantitativo de las secuencias termográficas.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

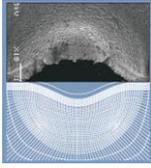
Se dispone de recursos hardware precisos y fiables, pero el software aún requiere ser usado por personal técnico cualificado con suficientes conocimientos de áreas tan dispares como la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la óptica, la electrónica, la programación de software y el procesado de señales e imágenes.

Toda automatización lleva consigo la reducción de la subjetividad inherente al sistema que aporta ese personal, aumentando la efectividad de esta técnica de ensayos no destructivos.

El presente capítulo recoge una revisión del concepto de detectabilidad de los defectos subsuperficiales en los ensayos no destructivos aplicando termografía infrarroja. Se presentan los factores que influyen negativamente en ella, así como las formas de evitar los errores que provocan, y las técnicas que ayudan a incrementarla. Se determina cómo el uso de fuentes externas apropiadas puede mejorar la detectabilidad usando equipos de medida con una digitalización de una escasa profundidad de bits

Como sabemos, la medida de la temperatura superficial puede reflejar la existencia de anomalías tanto superficiales como internas. Si las lecturas térmicas de la superficie del cuerpo se realizaran sobre varios puntos simultáneamente en una línea o en un plano, la termografía daría mayor información del interior del material ya que el conocimiento de los fenómenos de transferencia del calor en el objeto bajo inspección contribuye a un mayor control y evaluación de su interior.

Numerosas aplicaciones de control de procesos o inspección y evaluación de materiales requieren de un conocimiento cualitativo y cuantitativo de lo que ocurre en el interior. El proceso de conducción aporta la información necesaria siendo imprescindible en muchos casos un modelado de las situaciones de prueba. La complejidad del modelado de la transferencia de calor necesita un conocimiento a priori que simplifique, en la medida de lo posible, su formulación. De forma ilustrativa,



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

dos ejemplos son: el control del enfriamiento de coladas de plomo en la creación de contenedores nucleares y la detección de las estructuras de sujeción de paneles de materiales compuestos en la industria aeroespacial (una propia de termografía pasiva y otra de termografía activa, respectivamente).

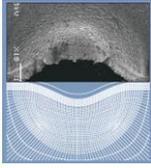
La precisión y resolución espacial de las medidas termográficas resultan cruciales para obtener la información relativa al interior del material. Los errores y el ruido deben ser minimizados al máximo. De igual forma, los efectos de una escasa digitalización de las imágenes en una cámara termográfica (que pueden ser más restrictivos que la sensibilidad térmica) deben ser compensados.

El aporte extraordinario de energía de la termografía activa eleva la energía del pulso térmico incidente en un material lo que conlleva una gran ayuda en la detectabilidad de defectos internos con el incremento del contraste térmico producido en las anomalías

Parámetros que definen la detectabilidad de defectos

Un sistema de inspección térmica captura la radiación proveniente de una escena, filtrándola espacialmente y focalizándola en un detector. El detector convierte las señales del dominio óptico en señales eléctricas analógicas que son posteriormente amplificadas, digitalizadas y procesadas para ser representadas en un monitor o almacenadas. Por lo tanto, el rendimiento del sistema de inspección depende de numerosos factores, siendo los más importantes la resolución espacial y la sensibilidad térmica que consiguen.

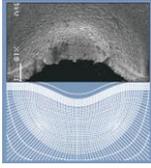
La detectabilidad de anomalías tanto superficiales como internas suele ser descrita atendiendo a dos términos: el tamaño mínimo detectable (*minimum*



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

detectable size, MDS) y la diferencia de temperaturas equivalente al ruido (*noise equivalent temperature difference*, NETD). Cuando el objetivo presenta un tamaño superior al tamaño mínimo detectable se puede determinar la temperatura del espécimen a partir de la radiación emitida por él. Sin embargo, cuando el objetivo presenta un tamaño inferior al tamaño mínimo detectable, la forma del objeto no puede ser discernida ya que la energía del entorno también entra en el detector como ruido. Claramente, este factor depende de la óptica utilizada, el tamaño del píxel del detector y la distancia a la que se produce la medida. La diferencia de temperaturas equivalente de ruido se define como el cambio de temperatura tal que la relación señal a ruido del sistema termográfico sea la unidad. Depende, igualmente, del tamaño de píxel del detector y del número F de las ópticas. Sus valores están en torno a las centésimas de Kelvin.

La dependencia de un sistema de los dos parámetros anteriores lleva a la *mínima diferencia de temperaturas resoluble* (*minimum resolvable temperature difference*, MRTD) que caracteriza los detectores o sistemas de inspección térmica definiendo la diferencia de temperatura más pequeña que un operador es capaz de discernir en una escena que recoge un patrón de barras sobre un fondo uniforme. A frecuencias espaciales bajas, la sensibilidad térmica definida por el NETD es lo más importante mientras que para frecuencias espaciales altas el factor dominante es la resolución espacial. La MRTD combina ambos factores en un único concepto. Con valores rondando las décimas de grado, tiene en cuenta tanto los efectos espaciales de la óptica como los parámetros del detector a través de la *función transferencia de modulación* del sistema (*modulation transfer function*, MTF). Sin ser medidas absolutas de temperatura sino diferencias perceptibles relativas a un fondo determinado, simula la capacidad de un observador para apreciar bajos contrastes entre el ruido de las imágenes, en definitiva la detectabilidad en sistemas de percepción visual.



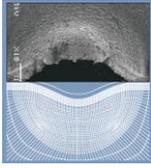
Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Factores que influyen en la inexactitud de la medida termográfica

En un sistema termográfico, las imprecisiones en las medidas de temperatura pueden ser provocadas por errores en la evaluación de los parámetros que caracterizan la radiación infrarroja (base sobre la que se sustenta el sistema), por efecto del ruido inherente a todo sistema o por errores propios del aparato de medida (aberraciones en las lentes, respuestas de amplificación dependientes de la frecuencia, falta de focalización en el objetivo, refracciones de la apertura del iris, reflexiones internas en el equipo, difracción,...). Conocer sus orígenes y la forma de corregir sus efectos resulta esencial. A modo de ejemplo, existen errores en la medida cuando se miden objetos a temperatura cercana a la temperatura ambiente porque la energía radiada detectada puede verse influenciada en mayor medida por la energía reflejada proveniente del entorno. También afectan a la medida las variaciones de emisividad, reflexiones o la degradación del equipamiento tanto en su óptica como en su electrónica.

El término *ruido* involucra toda señal indeseada en un sistema que genera un error en la medida afectando a su precisión, exactitud, repetitividad y resolución. Sus orígenes pueden ser muy variados clasificándose en aleatorio (no correlado) o correlado y sus efectos pueden ser aditivos o multiplicativos. Por lo general, el ruido aleatorio es de efecto aditivo, con origen en el sistema detector, mientras que el ruido correlado suele ser de efecto multiplicativo y con origen en las partes mecánica y óptica del sistema detector (encuadres, aberraciones de lentes, variaciones de sensibilidad entre detectores). Ambos tipos de ruido se reducen mediante procesado de imagen efectuando promediados temporales y espaciales de las secuencias termográficas.

Los errores originados por un desacierto en la valoración de los parámetros de la transferencia de calor por radiación (básicamente los valores de las características

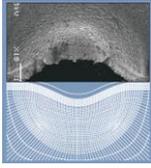


Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

de emisividad y reflectividad de la superficie de los materiales) requieren de técnicas específicas para su corrección. Del conocimiento del mecanismo de radiación se extrae la importancia de una alta emisividad (uniforme en todas las direcciones de radiación y longitudes de onda) y una baja reflectividad de la superficie de los materiales bajo inspección, ya que la potencia radiada captada por el sistema es directamente proporcional a la emisividad mientras que la reflectividad es su “complemento a la unidad” para una superficie opaca.

El efecto de dichos parámetros puede tratarse mediante software, siendo modificados puntualmente en el procesado de la imagen, o bien puede uniformarse haciendo que toda la superficie tenga el mismo valor en estas características. La modificación de la emisividad, por ejemplo, se logra mediante el recubrimiento de la superficie con una pintura de alta emisividad como sprays de color negro mate procurando un acabado uniforme (es erróneo pensar que sólo y todas las pinturas negras tienen alta emisividad, la pintura blanca de óxido de titanio tiene una emisividad de 0.94). La adecuación de la composición química de la pintura debe verificarse para que pueda ser eliminada fácilmente y no afecte al objeto bajo prueba (ensayo no destructivo). Otras alternativas son el uso de cintas adhesivas o modificar la superficie favoreciendo el proceso de oxidación o puliéndola, aunque no son opciones recomendadas por dejar secuelas en el material (pegamentos de las cintas y el óxido). Si aún así la superficie presenta variaciones importantes de emisividad (por ejemplo, como consecuencia de su porosidad y rugosidad) o no es posible modificarla (por ejemplo, superficies incandescentes o inaccesibles), se pueden aplicar técnicas propias de la pirometría o la sustracción en el procesado de imágenes de una imagen de referencia, o imagen fría, que reduce los efectos de la emisividad y del fondo de la escena de inspección.

Todos estos errores en las medidas, aunque no eliminados, pueden ser minimizados mediante un proceso de calibración de los sistemas termográficos. El uso



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

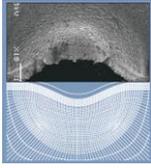
de fuentes de calibración de cuerpo negro o la medida de superficies con una temperatura controlada permite la corrección, con un preprocesado, de las imágenes capturadas.

Factores que contribuyen a la detectabilidad de defectos subsuperficiales

Básicamente, desprendido del apartado anterior, el control y uniformidad de la emisividad y reflectividad de la superficie permite una evaluación precisa de la temperatura superficial del objeto bajo inspección. Numerosos trabajos en el campo de la radiometría y de la pirometría han sido publicados para la inspección térmica remota, trabajando tanto en el desarrollo de nuevos transductores como en el desarrollo de optoelectrónicas hechas a medida. A modo de ejemplo ilustrativo, la medida precisa de la temperatura de una superficie posibilita el control de procesos metalúrgicos que afectan directamente a la calidad final del producto que manufacturan.

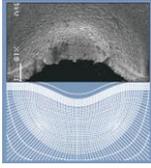
Una vez “descartados” los orígenes de variaciones de emisividad y reflectividad, las posibles diferencias térmicas que se observan en la medida superficial son consecuencia de la presencia bien de anomalías o discontinuidades superficiales bien de reflejos de la presencia de anomalías subsuperficiales que, por conducción del calor, afectan a la temperatura en la superficie de forma localizada. La diferenciación de la causa es labor del operador que analiza y comprende las secuencias termográficas.

Gracias al conocimiento de la transferencia del calor en el material, se puede relacionar la variación de la temperatura superficial con la presencia de una anomalía interna (subsuperficial). Se pueden generar ondas térmicas apenas por debajo de la interfase de la muestra que se propagan hacia el interior del material atenuándose fuertemente. Actúan como cualquier otra onda, esto es, sufren reflexión ante



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

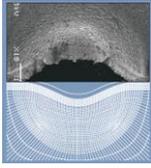
cualquier interfaz subsuperficial como podría ser un defecto o un cambio de material. Las ondas reflejadas retornan hacia la superficie produciendo un comportamiento oscilante de su temperatura. Con el control o medida de la temperatura superficial de un material durante todo el proceso (generación de la onda térmica y su propagación hasta su desaparición), se pueden relacionar las variaciones detectadas con lo que esté ocurriendo dentro del espécimen. El modelado del fenómeno de la conducción del calor cobra entonces gran relevancia. De su análisis se desprenden las condiciones que deben procurarse para que la detectabilidad de los defectos subsuperficiales sea lo más elevada posible. Por una parte, las características de las anomalías influyen de forma determinante (su tamaño, profundidad y propiedades térmicas). Por otro lado, la detectabilidad de los defectos internos tiene una estrecha relación con la excitación externa a la que puede ser sometido un espécimen y que termina produciendo en él un frente de ondas térmico.



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

Conclusiones.

- 1** En general, la complejidad del campo de tensiones al que se ve sometido una rueda de ferrocarril en servicio, junto con la existencia de defectos, heterogeneidades y solicitaciones difíciles de predecir, hacen extremadamente difícil desarrollar un modelo de fractura adecuado que describa de forma fiable la nucleación y propagación de grietas y sus efectos. La inspección adecuada de estos componentes es por ello, crítica.
- 2.** En la actualidad se dispone de métodos de inspección basados en metodologías de ensayos no destructivos para la inspección de ruedas de ferrocarril, todas contrastadas industrialmente. Sin embargo, todas ellas presentan desventajas en tanto a su eficacia, sus "puntos ciegos" o su rentabilidad, así como tiempos de operación, residuos a tratar o formación de personal altamente especializado. De igual forma se ha intentado automatizar, sin éxito, equipos de inspección basados en métodos tradicionales (UT, EC, PM).
- 3.** El equipo de inspección ideal debe ser lo suficientemente flexible para atender a las necesidades del mercado y adaptarse a las diferentes configuraciones de conjuntos rodados y bogies, además debe cubrirse llanta y velo en la inspección, que debe ser superficial y subsuperficial.
- 4.** Estudiando la propagación y atenuación de las ondas térmicas, la termografía infrarroja permite realizar un control bidimensional de la temperatura así como su evolución, permitiendo mediante modelos de transferencia de calor, estimar la presencia, propiedades y profundidad de defectos internos en materiales.
- 5.** Existen determinados factores que afectan a la detectabilidad de defectos mediante termografía infrarroja, siendo las más generales la capacidad del equipo (Tamaño de defecto mínimo detectable, ruido, resolución espacial, sensibilidad, etc.) y las propias



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

del material inspeccionado (Emisividad, reflexiones,distancia, etc.) El equipo adecuado, el uso de software específico y la debida metodología maximizan la detectabilidad de defectos.

Bibliografía

-Normativa **EN 13262** Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisitos del proyecto.

-"Development of testing methodologies according to fracture mechanics criteria applied to railways solid wheels". **M. Diener**

-"Study of rolling contact fatigue defects of freights car wheels". **Zakharov S M**

-"Wheel – Rail Dynamics". S., **Linearized**

-"Ingenieria Ferroviaria". **Julio Álvarez Rodríguez**

- "Termografía Infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END)". **Balagas Daniel**

- "Thermographic Image Processing for NDT". **Ibarra-Castañedo.**

-"Estudio de la creación, desarrollo y método de la detection de grietas en ruedas ferroviarias". **Belen Molina**

-"Ensayo de termografía" , Observatorio Tecnológico de la Soldadura OBTESOL- 2011 Centro Tecnológico AIMEN

-"Guía básica de la termografía", LAND Instruments International

-" *Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing*", **X.P.V.Maldague**

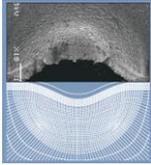
- "Métodos innovadores de inspección de estructuras de materiales compuestos", **D. Balageas**

- "Handbook of Nondestructive Evaluation", **J.Hellier**

Web

www.ndt.net (The e-journal of Nondestructive Testing)

www.nist.gov (National Institute of Standards and Technology)



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

www.railway-technology.com (Railway Technology)

www.renfe.es/ave (RENFE-Alta velocidad española)

www.aar.org (Association of american Railroads)

www.caf.net/caste/home/index.php (Construcción y auxiliar de ferrocarriles, S.A.)

www.eri.nl (European Rail Research Institute ERRI)

www.fra.dot.gov (Federal Railroad Administration)

www.izhp.fhg.de/index_e.html (Institut Zerstorungsfreie Prüfverfahren)

www.up.com (Union Pacific Railroad)