

Tratado técnico

## ¿Qué tiene de complejo un freno de ferrocarril?

### El vehículo (tren)

Cuando hablamos de transporte por ferrocarril (camino de hierro) de inmediato asociamos con la idea de “tren”. Llamamos tren es una serie de coches (llamados vagones si son de carga), que se desplazan vinculados entre sí. Cada conjunto o serie de coches (motores o remolcados), constituye una formación. Cada formación circula comandada por una señal común a toda la formación, impartida por el “motorman” a cargo de esa formación. A efectos de lo que buscamos describir, cabe destacar además que cada coche de la formación consta de varios ejes, y todos los ejes de todos los coches deben responder a esa única señal común. Un tren de pasajeros urbano puede medir según la cantidad de coches entre 100m y 200 m por lo que la distancia entre el motorman y los coches conducidos es grande. No sólo físicamente es grande, sino que el motorman no tiene ninguna información de lo que está pasando en otros lugares de la formación...

### Los pasajeros, una carga difícil de frenar

En un tren de pasajeros de larga distancia, la capacidad máxima está determinada por la cantidad de asientos o plazas disponibles. Cada pasajero tiene asignado un lugar fijo determinado y las posiciones están uniformemente distribuidas, de modo que podríamos decir que la carga total sería conocida y que ésta además estaría uniformemente distribuida en los coches y consecuentemente, sobre los ejes.

Pero en un tren de transporte urbano de pasajeros, la situación cambia totalmente. Los vagones son abordados masivamente por gente en cantidades que nada tienen que ver con la cantidad de asientos o lugares fijos que existe, y se ubican dentro de la formación a su antojo o conveniencia por los motivos que fuera. La carga total transportada por una formación, y la transportada por cada coche, varía permanentemente de estación a estación, e inclusive, los pasajeros migran dentro de la formación de un lugar a otro durante el transcurso del viaje. Finalmente la distribución de la carga sobre cada uno de los ejes podríamos describirla como totalmente aleatorias. Podemos asegurar que la carga o peso transportado específicamente sobre cada eje es distinta. Resumiendo hasta acá, podemos decir que el “motorman” está a cargo de impartir una señal que debe llegar simultáneamente a todos los ejes de todos los coches en formación aún que estén a más de 150 m, sin saber cuál es la carga total y con la certeza de que está además mal distribuida ...

### ¿Qué significa “aplicar los frenos”?

Frenar consiste en ejercer una fuerza en la misma dirección del movimiento pero en sentido contrario. Mecánicamente hablando, la acción de frenado de un vehículo terrestre que se desplaza sobre ruedas, normalmente se concreta retardando el giro las ruedas del conjunto (en este caso las ruedas de toda una formación).

La capacidad efectiva de ejercer una fuerza está dada por la firmeza del apoyo (principio de acción y reacción). Aquí se trata de ejercer una fuerza horizontal (dirección del movimiento) de modo que el “apoyo” para ejercer la fuerza será la adherencia que posibiliten los materiales en contacto de rodadura. La adherencia total depende por un lado del peso o carga sobre el apoyo, y por otro también de los materiales que constituyan el apoyo.

En el caso del ferrocarril, el apoyo son ruedas de acero cargadas rodando sobre un camino también de acero (riel). La resistencia a deslizarse de un material sobre otro es una relación conocida y que está definida como el “coeficiente de fricción”. Ahora bien, la resistencia a deslizarse entre si dos materiales cualesquiera además, no es la misma cuando están sin deslizarse entre ellos que cuando ya se están deslizando. Esto nos obliga a diferenciarlos, y se ha dado en llamar “coeficiente de fricción estático” al primer caso y “coeficiente de fricción dinámico” al segundo. Ocurre que siempre el primero es mayor que el segundo. (En otras palabras, como experiencia: si queremos lograr que dos objetos en contacto se deslicen, debemos aplicar sobre ellos una fuerza determinada. Pero una vez que logramos que comiencen a deslizarse ya la fuerza necesaria para continuar con el deslizamiento es sensiblemente menor). En el caso que nos ocupa que es rueda de acero sobre un riel de acero, el valor de esa resistencia mientras la rueda apoya girando se toma como coeficiente estático que en acero/acero que es un valor muy bajo  $\mu = 0,14/0,15$ . Pero si llega a deslizarse la rueda sobre el riel, es más bajo aun, disminuye drásticamente: el coeficiente que representa ese caso es el dinámico que tratándose nuevamente de acero/acero es  $\mu = 0,09$ .

Sin duda, a la hora de frenar, estar apoyados sobre materiales que tienen bajo coeficiente de fricción resulta algo sumamente delicado. Para ver más visible esa delicadeza, hagamos una comparación: la adherencia de un neumático rodando sobre un pavimento seco da un valor próximo a  $\mu = 0,95$ , o sea, 6 veces mayor !!!.

#### El frenado

En un servicio urbano de pasajeros, la secuencia de arranque y parada es de alta frecuencia dada la proximidad de las estaciones y la necesidad de trasladar ágilmente al pasaje. Puede ser hasta de un ciclo por minuto!. Así, la aceleración y la deceleración hacen a la eficacia del transporte. La deceleración que se necesita para el servicio urbano de ferrocarril de pasajeros es aproximadamente 0,10 g, Si comparamos ese valor con la adherencia de las ruedas al riel (0,14) se comprenderá lo delicado del sistema “frenos”, ya que en estas condiciones, las ruedas de los coches durante el frenado, siempre estarán expuestas al límite de su capacidad máxima de absorber el esfuerzo de frenado y más crítico aun pensando que puede no haber carga en alguno de los ejes. Dicho en otras palabras, las ruedas siempre frenan próximas al “bloqueo”. Esto es que, si por algún motivo la fuerza de frenado exigida a un eje excede del valor de adherencia rueda/riel de ese eje, ése dejará de rodar (se bloqueará) continuando su desplazamiento arrastrándose en vez de rodar.

Cuando esto sucede, se produce un deterioro permanente de las ruedas (“planchando” de rueda como se dice en la jerga). De allí en más la rueda ya no girará más “redonda”, produciendo un golpe en cada giro, cada vez que apoye la parte aplanada de la rueda, deteriorando el confort de marcha y , obviamente, produciendo también un deterioro temprano en todas las partes asociadas del tren rodante y inclusive deterioro de la vía.

#### ¿Cómo es el freno? Componentes del freno

El conjunto de freno está compuesto por una parte estática (llamada genéricamente estator), solidario o fijado a una parte no rodante del coche, que al momento del frenado, se apoya o abraza con una determinada fuerza (presión) contra otra parte (las ruedas o los discos segun el caso) que está en movimiento rotando (rotores). Lo estático contra lo que gira produce una fricción

que va absorbiendo el movimiento, provocando paulatinamente la detención de cada eje y por ende de la formación.

En pocas palabras, el frenado consiste en la interacción de dos partes: la “zapata” de freno estática presionando contra la “rueda” que rota. Y la efectividad del frenado será función de las características particulares de las piezas en contacto, la presión que reciban entre sí, de la carga transportada y de la adherencia rueda/riel.

¿A qué llaman en la jerga “freno largo”?

Por lo descrito, cuando un tren frena en servicio, podemos decir por lo expuesto, que frena siempre en su máxima capacidad. Toda la masa de la formación es frenada por todas las ruedas en conjunto. Si por algún motivo dentro de la formación existen ruedas o coches que no frenan, el resultado será que el frenado será más suave; es decir, recorrerá más distancia para frenar (freno largo). No existe ninguna posibilidad frente a ejes o ruedas que no frenan de que los que sí frenan no puedan hacer más fuerza de frenado que la normal para compensar: ellas ya están frenando al límite. Si se intentara dar más presión a los frenos para compensar, se corre el riesgo enorme de bloquear esas ruedas produciendo un frenado mucho menor y daños al material.

Las zapatas / las ruedas

Una pieza puede definirse por sus formas y dimensiones. Esas características es posible estudiarlas y medirlas una y otra vez sin que se alteren. Más aun, si la pieza es parte de un conjunto, se puede también verificar la concordancia de la pieza con las correspondientes del conjunto para comprobar la idoneidad de la pieza.

Pero más allá de ese aspecto físico, hay otro aspecto a tener en cuenta, que es de qué material está hecha la pieza, dado que su “funcionalidad” dependerá de que esté constituida con el material adecuado.

Hay materiales simples que están normalizados y sus características están totalmente definidas y tabuladas. Se puede en estos casos inclusive predecir el comportamiento de una pieza una vez que estén definidas la geometría y el material del cual está hecha la pieza. Este es el caso de las ruedas de acero del ferrocarril.

Contra estas trabajan las “zapatas” de freno, que ya hace mucho tiempo son de materiales compuestos complejos y se las denomina “zapatas de composición”, para diferenciarlas de las que antiguamente fueran simplemente de fundición de hierro.

Características de las zapatas

A un material compuesto también se lo puede definir con una serie de parámetros físicos como: peso específico, coeficiente de transmisión calórico, dureza, color, compresividad, PH, etc., y hasta si tiene o no, en su composición, una serie de sustancias como Plomo o Asbestos como ejemplo.

Pero nada de esto alcanza para poder inferir finalmente, a partir de esa información que, puesta a trabajar por ejemplo contra otra como freno, qué conducta tendrá, o si tendrá el desempeño o performance necesarios.

En éste punto, la única posibilidad de determinar las características de comportamiento de las piezas de un material compuesto contra otro rozando es hacer un test dinámico poniendo la pieza en cuestión a trabajar contra la otra pieza, recreando TODAS las condiciones de su uso, de modo de allí observar y estudiar el comportamiento y mostrar entonces que el mismo es o no adecuado al uso para que está diseñada. Puestos a trabajar zapata contra rueda de

acero, la rueda difícilmente cambie sus características esenciales. Pero sí la zapata de composición, que está hecha con materiales orgánicos sí cambia lo que la constituye en un material crítico del freno, al que debemos controlar para asegurar la eficacia del conjunto.

Si son críticas, ¿ cómo se puede controlar a la zapatas?

A pesar que las zapatas son un material crítico, a la hora de asegurar la calidad no se puede probar un lote más que por muestreo. Ya mencionámos que la medición de ciertas características no alteraban al material en estudio, ni variaban las mediciones por el proceso mismo de la medición. Podríamos medir el peso o el espesor del 100 % de un lote antes de ser instalado, pero ¿y la fricción, que es crítica? Eso es imposible.

Se utiliza un Dinamómetro Inercial para representar en tiempo y forma las condiciones de uso de las piezas. Pero durante la medición misma el material de contacto va cambiando, cambia su superficie, su temperatura, se desgasta, etc., y también cambian las condiciones mismas a la que es sometida durante la acción, de modo que hasta los procedimientos también son importantes. Como se desprende de esto, el ensayo es destructivo. Sólo es posible entonces tomar un muestreo y estudiarlo. No más que esto.

La particularidad que tienen las zapatas de freno de ferrocarril es la gran importancia que tiene la estabilidad del material. Frente a un entorno cambiante la respuesta en fricción entregada por el material necesariamente debe ser siempre la misma. Esto descrito aquí es algo realmente difícil de cumplir.

El material de fricción “compuesto”, es una mezcla de materiales inorgánicos con otros orgánicos que los aglomeran, desde el inicio de la frenada hasta la detención total se produce en los frenos un aumento de temperatura entre los materiales que están rozando entre y además de que la velocidad de deslizamiento entre ambos varía continuamente partiendo de la velocidad inicial de la frenada hasta la detención total. Finalmente la temperatura del conjunto no alcanza a enfriarse entre una estación y otra, de modo que frenada tras frenada va aumentando también la temperatura inicial de cada ciclo de frenado. Y si queremos mostrar más complejidad, así como dijimos que entre dos materiales puestos a friccionar había bien marcados dos coeficiente de fricción: el dinámico y el estático, podemos decir que al final de cualquier frenada, en el último instante, se confunden rozamiento estático y dinámico. Siendo el estático mayor que el dinámico, hay una tendencia al bloqueo mayor al final de cada frenada.

Sin embargo, a pesar de todo lo mencionado, la respuesta del material de composición que está trabajando deberá mantenerse constante con independencia de la gama de velocidades así como la respuesta debe ser proporcional y precisamente lineal con la presión de trabajo a la que esté sometida.

Dejando el ensayo de lado, y volviendo a la formación, marcamos que la estabilidad no es caprichosa. Es una necesidad dado que si todos los ejes de la formación tienen la misma señal de freno como ocurre en la realidad, el aporte o la participación a la detención que el sistema exige a cada uno de los ejes de la formación la misma fuerza de frenado con total independencia de que un eje, un boggie o un vagón está más o menos cargado que otro. Absolutamente crítico.

Por todos estos motivos además, la característica de fricción (el coeficiente de fricción) no es una cualidad arbitraria a decidir por el fabricante de zapatas sino

que es un valor tipificado, claramente definido y de estricto cumplimiento. Las normas además son internacionales UIC (International Union of Railways) y los fabricantes de los coches diseñan ya considerando la utilización de alguno de los tres tipos de zapatas que se proponen, pero siempre “zapatas normalizadas”. Esos tres tipos están identificados con letras y son:

K = fricción alta ( $\mu = 0,17/0,15$ ),

L = fricción media ( $\mu = 0,12/0,10$ ) y

LL = fricción baja ( $\mu = 0,05/0,07$ ).

Atención: La diferencia entre uno y otro es suficientemente grande como para que, una pieza montada en un uso equivocado, pueda producir incluso accidentes de gravedad y/o daños al material ferroviario.

Informe sobre test en dinamómetro inercial H-6

Fecha: Septiembre de 2011

Responsable: Olivera, Luis Felipe – Hi Tek S.A.

Muestra: Material importado **MC ALEMANIA 320x80x80 nivel K**

Test n°: **1109127**

Rutina / Configuración del equipo: Test tipo “ ferrocarril urbano pasajeros, c/zapata”

### Descripción

En el test se evalúa el comportamiento del material de fricción sometido a condiciones de uso simulando coche de pasajeros en un vehiculo en dos condiciones generales:

- a- Con carga máxima/ carga mínima.
- b- Velocidad normal/ Máxima velocidad

### Desarrollo del test.

En todos los casos, el procedimiento consiste en someter a la muestra a una cantidad de aplicaciones (frenadas).

Cada aplicación de la serie consiste en acelerar la masa inercial hasta una velocidad inicial especificada y allí aplicar el freno hasta alcanzar la velocidad final deseada..

Se miden:

- velocidad de giro instantánea,
- la presión de línea de freno,
- torque o fuerza de frenado,
- distancia equivalente recorrida durante la frenada,
- tiempo de detención y
- tiempo transcurrido entre una aplicación y la siguiente.
- evolución del desgaste de las partes en rozamiento

En este punto deseamos detenernos para ser más específicos en detallar qué miramos cuando miramos los resultados de los ensayos, esto es, qué comportamientos del material observamos y las consecuencias que traen aparejadas las cuestiones en estudio... Entonces:

### MUY IMPORTANTE

Se desea hacer mención a dos aspectos relevantes particulares del freno de ferrocarril que ya fue dicho más arriba genéricamente y puede parecer ocioso.

a) El primero, que es común al freno de “zapata” y al freno de disco, es que la condición de frenado estándar del servicio (no hablamos de frenada de emergencia) es siempre próxima al bloqueo o límite de adherencia rueda / riel. Así,, cada vez que se acciona el freno de una formación operando en servicio “normal”, está trabajando cerca del límite de adherencia rueda/riel, próxima al resbalamiento. Esto hace poner el foco de la observación en que el “torque de frenado” válido y eficaz producido no se mide por su “eficacia promedio” solamente, sino que además NO puede permitirse NUNCA, en ninguna instancia del transcurso de la frenada valores instantáneos o “picos” que puedan producir el bloqueo de la rueda.

b) El segundo, a diferencia del primero, es sólo aplicable al sistema de freno de “zapata sobre rueda”. La mayor parte de las formaciones que circulan en Argentina tienen freno de “zapatas”. Estas trabajan directamente contra la rueda. Esto es que las ruedas, además de apoyar y guiar sobre el riel, hacen de contraparte del freno

Es inherente al trabajo de fricción el desgaste de las partes en contacto. De allí que debe ponerse especial énfasis en que la agresividad del material de composición de las zapatas tenga características tales que no resulte dañina sobre la rueda. Las ruedas de ferrocarril van montadas fijas sobre el eje (ruedan solidarias, derecha e izquierda) y tienen un perfil en la zona de apoyo (banda de rodamiento contra el riel y pestaña) perfectamente estudiado para la seguridad y el confort de marcha.

Una zapata producida con una “composición” agresiva produce cambios no deseados en el perfil de la rueda que va aun más allá del desgaste prematuro de las mismas. El simple hecho de que la rueda de un lado modifique su diámetro produce el arrastre de la rueda “solidaria” provocando desgaste de ruedas, de rieles y produciendo durezas o escamas en las ruedas que terminan incrustadas en el material de composición y agrediendo finalmente a la propia rueda. Se comprenderá entonces la importancia de la observación de este aspecto que afecta al comportamiento “instantáneo” del torque de frenado, al confort de marcha, a la seguridad e inclusive al costo operativo, ya que el costo de la reparación del daño puede ser muy alto.

Dicho lo anterior, podemos avanzar en la mecánica y metodología del ensayo en sí:

- Las aplicaciones están agrupadas en series (conjunto de aplicaciones sucesivas), diseñadas para poner de manifiesto la cualidad que se desea estudiar de la muestra

- Se registra además el peso de las muestras en distintos momentos del proceso para medir y evaluar la resistencia al desgaste en las distintas condiciones.

Las distintas fases del ensayo son:

- Asentamiento
- Efectividad
- Velocidad
- Carga

Además en cada etapa:

Desgaste y desgaste específico.

#### Asentamiento

Como se entenderá, dos piezas que se ponen en contacto entre sí por primera vez, el área de contacto no coincide en su perfil. Más aún si se piensa que las ruedas, que sufren desgaste, no tienen nunca dentro de una formación la misma medida o perfil.

Esto no puede ser motivo para aceptar que el resultado de una frenada, desde la primera, no tenga las características necesarias exigibles a una frenada normal de servicio.

Se observa aquí la estabilidad de la conducta del material, teniendo en cuenta que la superficie de contacto inicial es pequeña y va aumentando. Se observa la "velocidad de asentamiento", olor, agresividad contra la rueda.

#### Efectividad

Serie de sensibilidad (o estabilidad) a la presión (diferentes presiones ascendentes) y

Serie de sensibilidad (o estabilidad) a la velocidad (varias velocidades de inicio crecientes)

(Nota: Dado que la fricción siempre se traduce en calentamiento de las partes, en todos los casos se espacian las frenadas de modo de observar que la temperatura de inicio de la aplicación esté dentro del rango de uso y de ensayo.)

#### Velocidad

Aquí se toman 4 velocidades testigo: baja (40 km/h), mediana (65 km/h) y alta (90 km/h y 120 km/hr). (Se repiten mínimo 2 de cada una) y en todos los casos con la misma presión de línea, constante.

En este caso lo que cambia es la energía y la temperatura de film. A mayor velocidad mayor es la gama de temperatura a recorrer durante la frenada y, al mismo tiempo, la temperatura de film, en el primer tramo de la frenada, también se incrementa considerablemente con la velocidad. Aquí también se observa, entonces, la potencia (potencia = energía absorbida/unidad de tiempo). La energía a absorber es "fuerza por distancia", y la idea es con una misma presión de línea pasa mucho más "camino/unidad de tiempo" bajo el freno, la temperatura del film será mucho más alta cuanto más velocidad de deslizamiento se tenga...

#### Carga

Se repite la secuencia anterior con otra configuración de carga (masas) simulando entonces comportamientos con la formación cargada y con la formación descargada, dentro de los límites de operación del sistema.

#### Resistencia al desgaste

La muestra se evalúa en peso y dimensiones (espesor)

#### Resultados del Test- Conclusión

1- Observación de la muestra.

El primer comentario a destacar surge de la observación de la geometría de la pieza entregada para ensayo.

La muestra entregada tiene dos características destacables de diseño novedosas frente a lo conocido en el mercado y muy importantes que mejoran



notablemente la performance del material particularmente en el inicio, esto es, desde que es instalada.

Efectivamente, por su geometría, asegura que la zapata inicia su trabajo apoyando totalmente sobre la banda de rodamiento de la rueda y en segundo lugar, lo hace asegurando el apoyo (cuando menos) en dos puntos de contacto, que es el doble de la superficie que cualquier otra zapata. Esto es una gran mejora respecto a lo conocido y afecta favorablemente a la timonería (sistema en el que se montan las zapatas) y a la performance del freno desde el inicio mismo.

## 2- Performance

Conclusión: El material **MC ALEMANIA 320x80 nivel K** presentado supera los límites el ensayo, esto es, que dentro de los parámetros de velocidad, presión y temperatura al que fue expuesto en la rutina, el comportamiento es totalmente estable y dentro de los parámetros pre establecidos. Al final de la rutina, fuera ya del protocolo del ensayo, se incluyó una corrida a 140 km/hr y aun en esa condición la performance se mantuvo dentro de los parámetros establecidos.

Presenta un ALTO coeficiente de fricción (K) en TODAS las circunstancias en las condiciones mencionada anteriormente, esto es torque constante sin picos o valores fuera de la media.

El coeficiente de fricción de las distintas corridas resultó  $\mu = 0,16/0,17$

Más en detalle:

- Analizando el comportamiento individual de las frenadas críticas (ver gráfico) resulta de gran constancia y efectividad desde el inicio mismo.
- En cualquier etapa del ensayo repite la performance previa.
- No presenta signos de fatiga (resquebrajamiento de la superficie por concentración de temperatura).
- Muy baja o nula agresividad hacia el rotor (rueda). No se observan en el compuesto incrustaciones o arrastre de material de la rueda.
- Ausencia de ruidos
- Ausencia total de olores

## Resistencia al desgaste

No fue solicitada (es un ensayo de varios días). Sí puede afirmarse, con el trabajo hecho, que por el brillo de la rueda y la ausencia de incrustaciones de material de rueda en el compuesto, no se detecta abrasividad, mientras con otras muestras en trabajos menores alcanza para apreciar una diferencia importante a favor de esta muestra.