

REVISTA DE OBRAS PUBLICAS

PUBLICACIÓN TÉCNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

FERROCARRILES

Aplicación á las locomotoras del vapor recalentado á altas temperaturas.

Entre los perfeccionamientos introducidos en la construcción de locomotoras, ninguno ha despertado mayor interés en los Centros profesionales que el empleo del vapor fuertemente recalentado en la práctica corriente de las locomotoras. Hace diez años, aun entre los Ingenieros de tracción más perspicaces, había muy pocos que estuvieran dispuestos á admitir la posibilidad de producir de un modo permanente y regular vapor á las temperaturas de 300 á 350 grados centígrados, en la reducida capacidad de la caldera de locomotora ordinaria y emplearlo con seguridad y economía en el servicio normal de la máquina; hoy día el recalentado se aplica con éxito en más de 2.000 locomotoras, si se añaden las que están en construcción á las que actualmente están en servicio. El vapor seco ó recalentado moderadamente se ha ensayado en diversas ocasiones, pero sin dar ninguna ventaja económica notable en la práctica. Sólo desde el día en que Guillermo Schmidt, de Cassel, creó los métodos prácticos para el empleo del vapor recalentado á altas temperaturas, ha sido posible su aplicación á las máquinas fijas en 1880, en tanto que quince años más tarde, en 1895, se intentaron los primeros esfuerzos para extenderlo á las locomotoras. En este orden de ideas, conviene citar de un modo especial la iniciativa de los ferrocarriles del Estado prusiano, que fueron los primeros en prescribir ensayos en gran escala del sistema Schmidt sobre las locomotoras de su red.

Desde el comienzo de estos ensayos se hizo evidente que un recalentado eficaz para las locomotoras sólo podría realizarse con la condición de formar parte integrante de la caldera misma, recibiendo el calor de las llamas vivas de la parrilla y no de los gases perdidos ó de un aparato caldeado independientemente. Este principio fundamental ha sido respetado en todos los recalentadores de locomotora Schmidt, así como en las numerosas variantes que del mismo se derivan, y de las que mencionaremos más adelante las más importantes.

Propiedades y ventajas del vapor recalentado.

Definición.

Según Schmidt, el término «vapor recalentado» debe reservarse al vapor cuya temperatura se ha elevado 100 grados centígrados por encima de su temperatura de saturación,

por medio de un caldeo especial en un recipiente independiente, el recalentador que comunica sólo con la cámara de vapor, pero aislado del agua contenida en la caldera. Resulta que el vapor producido por la vaporización inicial se seca y su temperatura se eleva; por tanto, aumenta su volumen, pero sin aumento de la presión inicial. La apreciación del método de producción y del empleo del vapor recalentado se facilitará mucho con el examen preliminar de las propiedades más importantes, por las que se distingue del vapor saturado. Vamos á hacer este estudio en los párrafos que siguen.

Volumen específico.

El volumen específico, es decir, el volumen por unidad de peso del vapor saturado, disminuye cuando la temperatura y la presión aumentan, mientras que, por el contrario, el volumen del vapor recalentado aumenta casi en razón directa de la elevación de la temperatura. Así es que para el vapor que tenga una presión absoluta de 13 kilogramos por centímetro cuadrado, á 190° C., el volumen específico es 0,155; 250° C., es 0,177; á 300° C., es 0,196; á 350° C., es 0,216.

En otros términos, para un recalentado de 100°, el aumento de volumen específico es, próximamente, de un 25 por 100. Para una admisión igual en el cilindro, el peso de vapor necesario es, por consiguiente, un 25 por 100 menos con un recalentamiento de 100 grados que con vapor saturado á la misma presión.

Conductibilidad.

Este aumento de volumen es, sin embargo, una ventaja menos importante que la que se obtiene, gracias á la supresión de toda condensación en los cilindros cuando el recalentado es suficientemente elevado. Mientras que en las condiciones de marcha media ordinarias el vapor saturado pierde alrededor de un 35 por 100 de la cantidad total de vapor introducido, que es precipitado sin producir ningún trabajo mecánico y pasa á través de la máquina bajo la forma de pequeñísimas gotas de agua en suspensión en el vapor, el vapor recalentado puede, por el contrario, por razón de su reserva de calor, sufrir una disminución considerable de temperatura, sin perder nada de su potencia como agente de propulsión. En este orden de ideas, entra en juego otra ventaja importante, á saber: la escasa conductibilidad térmica del vapor recalentado. Al contrario de lo que ocurre con el vapor saturado, es mal conductor del calor. Esta propiedad

que es una gran utilidad para la reducción de las pérdidas por enfriamiento en los cilindros, es, por otra parte, un obstáculo á la libre transmisión del agente calórico al vapor contenido en el recalentador y exige ser examinado especialmente aparte en el estudio de este último.

Valor calorífico.

Con el fin de realizar las grandes ventajas económicas del vapor recalentado, á saber el aumento de volumen y la supresión de las condensaciones en los cilindros, es preciso prever un cierto consumo de calor que hay que deducir de la economía debida á los factores antes mencionados.

El calor necesario para elevar un kilogramo de vapor saturado, de su temperatura propia t á la temperatura superior t' C., es:

$$W_1 = C_p (t - t_s) \text{ calorías,}$$

en que C_p es el calor específico del vapor recalentado á presión constante.

Designando por W la cantidad de calor por kilogramo de vapor saturado á la presión particular indicada en las tablas de Regnault, la ecuación

$$W_2 = W + W_1 = W + C_p (t - t_s),$$

expresa el valor calorífico del vapor recalentado, es decir, el calor total contenido en un kilogramo de vapor recalentado á la temperatura t .

Según las recientes investigaciones de Knoblauch y Jacob (1) el calor específico C_p del vapor no es constante, sino que varía con la temperatura y la presión. Sus valores medios, para las temperaturas y presiones ordinariamente empleadas en la práctica de las locomotoras, se expresan en el siguiente cuadro:

Calor específico medio para el recalentado de t_s á t° centígrados.

Presión efectiva $p = \dots\dots\dots$	9	11	13	15 kgs. por cm^2 .
$t_s \dots\dots\dots$	179° C.	187° C.	193° C.	200° C.
	C_p	C_p	C_p	C_p
Para $t^\circ = 200^\circ \text{C} \dots$	0,597	0,635	0,677	(0,751)
$= 250^\circ \text{C} \dots$	0,552	0,570	0,588	0,609
$= 300^\circ \text{C} \dots$	0,530	0,541	0,550	0,561
$= 350^\circ \text{C} \dots$	0,522	0,529	0,536	0,543

Dimensiones de los recalentadores.

La absorción de calor del recalentador no se limita á la cantidad W necesaria para suministrar el recalentado efectivo, sino que es preciso agregar la cantidad necesaria para vaporizar las partículas de agua arrastradas mecánicamente al interior del recalentador.

Suponiendo que el vapor de la caldera contenga un 7 por 100 de agua, lo que, para las condiciones ordinarias de marcha de la locomotora, no es seguramente excesivo, el calor necesario para la producción de un kilogramo de vapor á la presión de 12 kilogramos y á la temperatura de 300°C .,

provieniendo respectivamente de las superficies de caldeo de la caldera y del recalentador, será la siguiente:

Superficie de caldeo de la caldera:

	Calorías.
0,93 kilogramos de vapor saturado, $0,93 \times 663$.	= 616,0
0,07 kilogramos de agua á la temperatura de saturación, $0,07 \times 191 \dots\dots\dots$	= 13,4
	<u>629,4</u>

Recalentador:

Vaporización de 0,07 kilogramos de agua á 187°C ., $0,07 \times 472 \dots\dots\dots$	= 33,0
Recalentado de 113° de un kilogramo de vapor seco, $0,536 \times 113 \dots\dots\dots$	= 60,5
	<u>93,5</u>
Calor total absorbido por un kilogramo de vapor recalentado.	= <u>722,9</u>

del que corresponde 93,5, ó sea un 13 por 100, al recalentador.

En el examen ulterior de la cuestión, no consideraremos más que los recalentadores que utilizan parte de la superficie tubular de la caldera. En la caldera normal de locomotora, de hogar estrecho y profundo, con un 10 por 100, aproximadamente, de superficie directa de caldeo, alrededor de un 40 por 100 del calor total se produce en el hogar y el 60 por 100 restante en los tubos. Hace falta, pues, que la superficie del recalentador sea igual al 13 por 100 de 60, ó sea el 22 por 100 de la superficie total de caldeo; y si además se considera que la parte mejor de esta última, es decir, la que está situada en la proximidad de la placa tubular, no está disponible porque se reserva para la vaporización, se comprenderá que para conseguir un recalentado suficiente es preciso dedicar á este objeto, de un 25 á un 30 por 100 de la superficie total de caldeo de la caldera.

Resulta también de lo antedicho que al tener en cuenta el consumo sensiblemente constante, debido á la vaporización suplementaria, no se deduce de ninguna manera que la superficie de recalentado sea directamente proporcional al grado de recalentado. Así, por ejemplo, para la mitad de calor, supongamos á 245°C ., hace falta mucho más trabajo de que suministraría un recalentador que no tuviera más que la mitad de superficie de caldeo.

Generación del vapor fuertemente recalentado en las calderas de locomotoras.

La propiedad preciosa de ser mal conductor del calor, que caracteriza el vapor fuertemente recalentado, es fuente de grandes dificultades para su producción. Moderadamente recalentado, el vapor contiene generalmente partículas de agua ó de vapor húmedo; la mayor conductibilidad de este último facilita el enfriamiento de la mezcla, y esta tendencia no desaparece hasta que se ha elevado suficientemente el recalentado. No basta suministrar la cantidad de calor suficiente á través de las paredes del recalentador; es preciso disponer las cosas de manera que este calor se transmita á cada una de las partículas de la corriente de vapor durante su trayecto por los tubos, hasta que cada una de ellas pase del estado saturado al estado recalentado. Á este efecto, es preciso que el grueso chorro de vapor que viene de la caldera se divida en un gran número de filetes delgados; combinando esta precaución con múltiples cambios de dirección, se obtiene la mezcla perfecta de las partículas húmedas y recalentadas durante su paso por los tubos recalentadores.

(1) *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 1907, pág. 81.

Dada la escasa conductibilidad del vapor recalentado para obtener la transmisión necesaria de calor á las partículas de vapor que circulan rápidamente por el recalentador, es preciso, además, que haya una gran diferencia de temperatura; en otros términos, es esencial el empleo de gases calculados á una temperatura elevada.

Si el vapor sólo se calienta á una temperatura insuficiente, es decir, si contiene á la vez partículas recalentadas y partículas húmedas, la temperatura acusada por el termómetro será la temperatura media de la mezcla, y esta temperatura no podrá considerarse como la del vapor que haya sufrido un recalentado uniforme y moderado. En realidad subsisten todavía partículas de vapor saturado, con su tendencia perjudicial á enfriar las partículas recalentadas; la ventaja económica prevista para la máquina no puede, pues, realizarse más que de un modo imperfecto.

Según nuestra experiencia, es preciso que la temperatura media en la caja de distribución llegue á 300° C. para que el vapor recalentado sea homogéneo, es decir, no contenga más partículas húmedas ó saturadas; en efecto, ensayos repetidos han demostrado que el consumo de combustible y de agua aumenta mucho, cada vez que la temperatura descende sensiblemente por debajo de dicho límite.

Por razón del pequeño espacio disponible en la caldera-locomotora, para realizar un recalentado eficaz, se necesitan recalentadores que reunan las siguientes condiciones:

1.° Empleo de una temperatura suficientemente elevada de gases calientes; esta temperatura crecerá con el trabajo exigido á la locomotora.

2.° La mayor subdivisión posible de la superficie del recalentador; es decir, empleo de tubos estrechos y de mucho espesor.

3.° Mezcla de las corrientes de vapor durante un trayecto á través de los tubos y prolongación de la duración del paso, forzando al vapor, que ha recorrido una serie de tubos, á volver por otra serie.

4.° Dirección y arreglo de la evacuación de los gases, estudiando el medio de interceptarlos cuando la locomotora esté detenida ó marche con el regulador cerrado.

Las condiciones esenciales determinantes de la economía de combustible pueden definirse como sigue:

1.° La diferencia de volumen específico de las dos especies de vapor.

2.° Su valor calorífico desigual.

3.° La humedad del vapor saturado.

4.° La modificación de las pérdidas por enfriamiento á consecuencia de la temperatura más elevada y de la menor conductibilidad térmica del vapor recalentado.

5.° Los cambios que se operan en las condiciones de la combustión y del escape y de la radiación térmica de la caldera.

Estos tres últimos puntos escapan al cálculo; es preciso, pues, excluirllos del estudio teórico de la economía posible de combustible y de agua, estudio que se apoya en las siguientes hipótesis:

a) El rendimiento de la caldera es el mismo para dos locomotoras.

b) La máquina no deja pasar calor y no sufre pérdidas.

c) El calor producido por la caldera sin recalentado es vapor saturado seco.

La economía real no puede, sin embargo, deducirse de los resultados teóricos más que introduciendo correcciones por las pérdidas que resultan del enfriamiento de los cilin-

dros y de la humedad del vapor en la locomotora ordinaria, y estas correcciones deben basarse en hipótesis más ó menos arbitrarias; por este hecho, el valor práctico del resultado desaparece por completo. No debe, por tanto, confiarse con seguridad más que en los resultados obtenidos en recorridos de ensayo convenientemente efectuados; más adelante los examinaremos.

Potencia de tracción de la locomotora de vapor recalentado.

Á la economía de vapor y de agua viene á sumarse otra ventaja, más importante todavía, del vapor recalentado: es el notable aumento de la potencia de tracción de la máquina.

En ensayos comparativos efectuados con una máquina compound de cuatro cilindros y cuatro ruedas acopladas de diez que tenía la máquina, y una locomotora de simple expansión con ocho ruedas, de las que cuatro acopladas, provista de un recalentador Schmidt, esta última acusó una economía, próximamente, de un 25 por 100 de carbón, y cuando forzándola se obtenía un 40 por 100 más de potencia, consumía todavía sobre un 10 por 100 menos que la compound. De estos resultados se pueden deducir las siguientes conclusiones prácticas:

Admitiendo que para un esfuerzo de tracción igual de las dos máquinas, que en la compound represente sobre poco más ó menos el máximo, y en la locomotora de vapor recalentado la potencia media, la economía de carbón debida al recalentado no sea más que del 20 por 100, el trabajo para cantidades iguales de combustible quemado en condiciones similares puede ser aumentado por el recalentado en un

$$\frac{100 - 80}{80} \times 100 = 25 \text{ por } 100.$$

Pero como en las condiciones actuales de velocidad y de dimensiones de las máquinas expreso compound, los rozamientos del mecanismo y la resistencia á la rodadura de la locomotora absorben próximamente el 40 por 100 de la potencia indicada, no dejando á la barra de tracción más que el 60 por 100 del esfuerzo total, la proporción de 25 por 100, antes citada, se convierte en $\frac{25 \times 100}{60}$, ó sea un 40 por

100 en el gancho de tracción. Este aumento, como ya se ha dicho, se obtuvo varias veces en ensayos comparativos. Cuando la comparación se establece con una máquina de dos cilindros del mismo peso ó de un peso algo mayor, la ventaja á favor del recalentado es todavía mayor, con tal que, naturalmente, las dimensiones de los cilindros y condiciones del recalentado sean racionales.

El recalentado proporciona, pues, el medio de satisfacer las exigencias siempre crecientes del tráfico en lo que se refiere á la velocidad y peso de los trenes, sin aumentar exageradamente las dimensiones normales de las locomotoras actuales y de sus calderas.

El servicio regular, la economía de carbón debida al recalentado, es algo menor que en los ensayos comparativos, en los que el objeto principal es determinar la potencia de tracción máxima de la máquina que se experimenta. Examinando este punto, que ha sido objeto de muchas controversias en los centros profesionales, al tratar de determinar el verdadero valor del recalentado, es preciso no olvidarse que,

en servicio regular, los cuadros de marcha están combinados de tal suerte, que las locomotoras de vapor saturado pueden trabajar en condiciones relativamente económicas á su límite de potencia, ó en las proximidades de este límite, mientras que la máquina de vapor recalentado, del mismo peso, pero más potente, haría el mismo servicio con una reserva considerable de potencia. Ahora bien; cuando la máquina de vapor saturado trabaja por encima de una potencia normal, se aproxima al punto en que se agota; el carbón y el agua son expulsados por la chimenea, y el único recurso que queda es la doble tracción. El recalentado no debe, pues, considerarse únicamente desde el punto de vista de la economía de un 25 ó 30 por 100 de carbón; debe mirarse como una garantía segura contra la práctica onerosa é irracional que consiste en enganchar dos locomotoras á la cabeza de un tren.—H.

(Continuará.)

LAS OBRAS DE RIEGO EN LOS ESTADOS UNIDOS

POR

DON JOSE NICOLAU

Y

DON NARCISO PUIG DE LA BELLACASA

SERVICIO FEDERAL DE OBRAS DE RIEGO

(Continuación.)

Presas de escollera.

Clasificación.—El empleo de escolleras para formar el elemento resistente de las presas, puede ser conveniente en los casos en que abunde la piedra, y así ocurre en varios puntos de la América del Norte, donde se han construido ó están en curso de ejecución obras de esta naturaleza. Según el medio á que se recurra para conseguir la impermeabilidad del macizo, se obtienen los distintos tipos de presas de esta clase, que podemos reducir á los dos siguientes:

1.° Presas con muros transversales interiores, de fábrica, ó formados por placas metálicas.

2.° Presas con el paramento interior hecho impermeable mediante un revestimiento de madera, asfalto, planchas metálicas, etc.

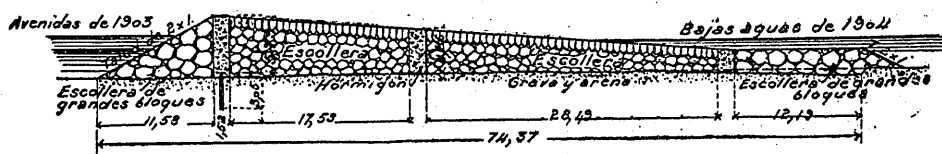
Hay además presas en las que el talud interior de la escollera está protegido por un muro de fábrica ó por un macizo de tierras, pero estas obras las consideramos comprendidas entre las presas mixtas.

Presas de escolleras con uno ó varios muros transversales.—Son análogos á las pantallas de que hemos hablado al tratar de las presas de tierra, y el tipo más conocido entre las de esta clase es el que lleva muros de mampostería ú hormigón, que siempre son más fáciles de ejecutar, de modo que reunan condiciones satisfactorias, que las delgadas pantallas metálicas que se han colocado en algunas presas de escollera.

Citaremos como ejemplo la presa llamada de la Laguna, que está construyendo el Gobierno americano en las inmediaciones de Yuma, Arizona, sobre el río Colorado, con objeto de elevar el nivel de las aguas unos tres metros sobre el estiaje, para derivar las que alimenten los canales de riego que se establecerán á ambos lados del valle. Esta presa

vertedero, que tendrá 1.460 metros de longitud, con una anchura máxima de 78 y 5,80 de altura sobre el fondo del río, corresponde al llamado tipo indio, usado con resultado satisfactorio para casos análogos en la India inglesa, siendo también de esta clase las construídas en el Nilo para refuerzo de la presa del Delta. Su sección, representada por el dibujo, parece justificada, dada la naturaleza socavable del terreno en el cauce, y la necesidad de adoptar un tipo robusto para que pueda resistir satisfactoriamente el paso, por encima de su coronación, de las grandes crecidas de aquel importante río. Los tres muros de hormigón, además de atajar las filtraciones, sirven para sostener bien la escollera, formada por bloques de granito algo descompuesto que constituye las laderas; los taludes de ambos lados están formados por cantos de gran tamaño, y con objeto de evitar socavaciones, el lecho quedará revestido aguas abajo, en unos 15 metros, por bloques aun mayores. El río Colorado lleva siempre una considerable cantidad de arrastres que obstruirían rápidamente los canales de riego; para evitarlo están dispuestas sus tomas en forma adecuada, que describiremos más adelante.

En estas obras, comenzadas por contrata en Julio de 1905, sólo se ha hecho el 34 por 100 por dicho procedimiento, continuándose después por administración. Las crecidas y otras causas han retrasado mucho los trabajos, que cuando los visitamos se hallaban limitados á la margen izquierda. La roca para la escollera procede de las laderas graníticas que se desmontan, previos barrenos practicados con perforadoras de vapor, por medio de explosivos, empleándose cabrias para cargar los vagones de los trenes que llevan la piedra al macizo de construcción. Cuando se trabaja en los puntos próximos al río que contienen agua en alguna cantidad, se forman recintos con ataguías de tierra constituídas por dos malecones en el sentido longitudinal de la presa y un tercero normal á éstos, contiguo á la orilla, dentro de los cuales se agota con bombas hasta dejar la altura conveniente para poder ir construyendo en seco los muros de hormigón y verter la escollera en buenas condiciones. Una draga



Sección transversal de la presa vertedero de la Laguna

de succión prepara el terreno sobre el que ha de insistir el macizo, y la piedra se coloca con el auxilio de cabrias, que también sirven para la construcción de los muros de hormigón. Este se fabrica en una hormigonera instalada en un cobertizo, en el que están los depósitos de piedra y cemento, y se transporta á los puntos de empleo por los trenes de trabajo. El cemento y demás materiales importados se llevan desde Yuma, la más próxima estación del ferrocarril, en barcasas que remontan el río. El combustible empleado es el aceite mineral, que en California es barato por obtenerse con abundancia en los pozos de Los Ángeles y otros puntos. El precio de contrata del metro cúbico de pedraplén colocado en obra, era de 2,15 pesetas.

Las presas con tabique de planchas de acero constituyen más bien una novedad curiosa, que un sistema que, en términos generales, pueda juzgarse recomendable, y del que son poco partidarios la mayoría de los Ingenieros norteamerica-