Las locomotoras de adherencia en la construccion del ferrocarril lonjitudinal

Estudio comparativo de la locomotora "Shay" de engranaje

I LA

"Mallet" articulada sistema compound

POR

M. ARAYA VALVERDE

Se presenta, en la construccion del ferrocarril lonjitudinal, seccion de Cabildo al norte, el problema del trasporte de los materiales necesarios para la construccion de la via misma i del lastre indispensable de poner en las partes que serán de cremallera i que presentan rampas de 6% i curvas de 120 metros de radio.

La solucion del problema, ya que parece que el ferrocarril aereo seria una solucion de difícil ejecucion i de gran costo, está encerrada en un estrecho marco: el aprovechamiento de las locomotoras de adherencia.

Es evidente que las locomotoras que se empleen deben ser de adherencia total que permitan el arrastre de un tren de cierta capacidad media de trasporte i que sean suficientemente flexibles en sus mecanismos para permitir su circulacion por curvas de corto radio.

Dos son los tipos de locomotoras de adherencia total que se han presentado en competencia; haremos un pequeño estudio comparativo de ámbos, tanto en sus consideraciones teóricas como en sus resultados prácticos i en su aprovechamiento industrial. Seguiremos para ello el siguiente órden:

1.° Descripcion de la locomotora Shay.

2.° Id. de la locomotora Mallet articulada.

3.° Rampas que pueden salvar locomotoras de adherencia de estos tipos con un tren dado.

4.° Esfuerzo motriz de una locomotora Shay.

5.° Esfuerzo motriz de una locomotora Mallet articulada.

6.° Ventajas del sistema compound.

7.° Ventajas del tipo Mallet articulado.

8.° Velocidades desarrolladas por ámbos tipos en diferentes rampas con las curvas mínimas i el tren dado.

9.° Comparacion de ámbos tipos como motor.

10.° Comparacion como máquinas de trabajo en su funcionamiento, manejo, aprovechamiento i conservacion.

11.° Conclusiones.

1

La locomotora Shay fabricada por The Lima Locomotive & Machine Company de Ohio, EE. UU., es de una construccion especial, pues sus cilindros verticales, en número de dos para los tipos hasta de 20 toneladas i de tres para los mayores, hasta 150 toneladas, están situados al lado derecho i junto al caldero, obrando sus bielas caladas, en el tipo en estudio, a 120° sobre un eje acodado sostenido por fuertes descansos i que sigue la direccion de la via.

A este eje se unen, por ámbos lados, los ejes que manejaran los piñones que engranan directamente con las ruedas motrices, por medio de conexiones Shay universales de compensacion i deslizamiento que permiten la flexibilidad del eje total en las sinuosidades de la línea, pero que mantienen su rijidez en el sentido en el cual se trasmite el esfuerzo.

La locomotora i el ténder descansan sobre juegos de dos ejes en número de dos, tres o cuatro, segun el tipo, i que por su union con la parte superior de la construccion permiten tambien gran facilidad en la pasada de las curvas. Se aprovecha así el peso total de ámbos como peso adherente, permitiendo el arrastre de grandes trenes a una velocidad relativamente baja, pero suficiente para ferrocarriles en construccion i mas todavia cuando se encuentran en secciones montañosas.

El desequilibrio resultante de la colocacion de los cilindros a un lado del eje lonjitudinal se subsana colocando el caldero cierta cantidad mas afuera, del lado izquierdo. Este está debidamente reforzado para permitir el montaje de los cilindros i su trabajo que es bastante mas regular, en su trasmision, que en las locomotoras de biela, porque como éstas tiene correderas para las crucetas, en todo el largo de la carrera, i porque los piñones estando en la relacion de dos o tres, con las ruedas motrices, permiten 12 a 18 pulsaciones por cada revolucion de la rueda motriz i por consiguiente una trasmision de esfuerzo mas regular. Se evita así el peligro de patinaje que podria producirse en determinado momento por la trasmision desigual de esfuerzo que se produce en las locomotoras de biela.

2

La locomotora Mallet articulada es un tipo especial que sigue las líneas jenerales de las locomotoras de construccion corriente i que reune en sí varias características que las hacen mui apropiadas principalmente para vias en secciones montañosas. A la par que la locomotora Shay, la Mallet-ténder propuesta es de adherencia total, pero el esfuerzo motriz es trasmitido en ella por el sistema de bielas.

El distintivo de estas locomotoras es que descansan sobre dos grupos, de dos o tres ejes acoplados, ríjido el posterior i flexible el anterior, independientes uno de otro e igualmente accionados independientemente por los cilindros de alta i baja presion respectivamente: feliz solucion dada por M. Mallet al problema de tener una locomotora económica, potente, de adherencia total i flexible, para la esplotacion de líneas de fuertes rampas i curvas.

El grupo de ejes de atras está ríjido en su marco en conjunto con la construccion superior de la máquina, el delantero, con su marco enteramente independiente, permite al conjunto moverse como un bogue, al rededor de una union central efectuada por trasversales entre los marcos i al rededor de otras uniones de los marcos mismos.

El vapor del caldero va directamente a obrar a los cilindros de alta presion, a una admision bastante grande, i pasa despues al conducto que une aquellos con los cilindros de baja presion. En este conducto que sirve de recipiente, el vapor tiene una presion inferior a la del cilindro de alta i superior a la del de baja presion. El vapor pasa por..... i de este conducto a los cilindros de baja presion donde es aprovechado en una espansion ámplia.

Por la razon de que los cilindros, ríjidos a sus respectivos marcos, que se mueven independientemente, no estarán siempre en la misma línea lonjitudinal se ha dotado a ese conducto de conexiones universales que le permiten tomar la direccion resultante de las posiciones desiguales de los grupos de ejes, en la pasada de las curvas, conexiones que permiten la toma i pasada del vapor independiente de los movimientos propios de los demas organismos. De igual modo se han dispuesto los escapes directos de vapor de los diferentes cilindros cuando trabajan todos con vapor directo del caldero, trasformándose así la máquina compound en otra de simple espansion, lo que da por resultado un aumento de esfuerzo motriz.

3

En un problema de la naturaleza del que se estudia, lo primero que debe establecerse es si las locomotoras de simple adherencia, en estudio, son de aplicacion posible, es decir, si su aprovechamiento puede hacerse en forma tal que permitan el arrastre de un tren determinado de capacidad media ventajosa para los trabajos.

Es indiscutible que toda locomotora que ofrece un peso adherente puede salvar una gradiente dada, funcion de ese peso, que debe ser suficiente i que debe estar en relacion con los esfuerzos motriz i de traccion. Esa funcion es el fundamento preciso de que en líneas que presentan fuertes rampas se utilicen locomotoras de grandes pesos adherentes, mas aun, de adherencia total, puesto que cada tonelada ménos, en el peso adherente, significa una pérdida sensible en el aprovechamiento máximo que, en tales casos, se persigue.

La fórmula que nos da la resistencia de un tren arrastrado en rampa, en funcion del ángulo a formado con la horizontal, es independiente del tipo de locomotora, ella es:

$$(L + Q)(0{,}005 + \operatorname{tg} a) \qquad \text{en la que significan:}$$

L peso de la locomotora, Q peso del tren, 0,005 coeficiente f de frotamiento. Esta resistencia debe ser vencida por el esfuerzo de traccion que, a su vez, debe ser menor que la adherencia.

Conocidos los valores de L debemos fijar el tren por arrastrar: como su objetivo principal es trasportar el lástre indispensable para la via i como debe tener una capacidad suficiente media para atender a los trabajos de construccion, tomaremos uno de diez carros lastreros, cada uno con capacidad para 6 toneladas i de peso propio de 3,25 toneladas: el tren total pesaria 92,5 toneladas.

Tomando la fórmula de la resistencia i la de adherencia, debiendo ser la última mayor que la primera, tenemos:

$$1/5{,}5 \times L > (L + Q)(0{,}005 + a)$$

tomando como adherencia 1/5,5 L valor que puede ser aun 1/5 L en casos favorables, i sabiendo que L es peso adherente total.

Para locomotora Shay de 60 toneladas tendremos:

$$1/5{,}5 \times 60 > (60 + 92{,}5)(0{,}005 + \operatorname{tg} a)$$

$$10{,}909 > 0{,}7625 + 152{,}5 \operatorname{tg} a)$$

$$\operatorname{tg} a < \frac{10{,}909 - 0{,}7625}{152{,}5}; \quad \operatorname{tg} a < \frac{10{,}1465}{152{,}5}$$

$$\operatorname{tg} a < 0{,}066534$$

Para locomotora Mallet articulada de 57,96 toneladas:

$$1/5,5 \times 57,96 > (57,96 + 92,5)(0,005 + \text{tg } a)$$

$$10,538 > 0,7523 + 150,46 \text{ tg } a$$

$$\text{tg } a < \frac{10,538 - 0,7523}{150,46}; \quad \text{tg } a < 9,7857 : 150,46$$

$$\text{tg } a < 0,06504$$

El valor de la tanjente del ángulo formado por la rampa máxima admitida, para que los tipos de locomotoras pudieran arrastrar el tren dado, debe en todo caso ser menor que el valor de las tanjentes obtenidas que forman el límite máximo desde el cual la locomotora no arrastraria el tren, porque la resistencia seria igual o superior a la adherencia i se produciria el equilibrio o patinaje. La adherencia debe, en todo caso, ser mayor que la resistencia opuesta i la tanjente del ángulo formado por la rampa máxima debe ser, a la inversa, menor que los valores 0,066534 i 0,6504.

En la construccion del ferrocarril lonjitudinal, la rampa máxima definitiva será de 6% que forma con la horizontal un ángulo de 3° 30′ mas o ménos (medido con trasportador).

La tanjente correspondiente al ángulo de 3° 30′ es 0,06116, menor que los valores encontrados en ámbos casos. De esto podemos deducir que ámbos tipos de locomotoras tienen la suficiente adherencia para arrastrar el tren dado de 92,5 toneladas, en la rampa máxima de 6%.

Mas adelante veremos si el esfuerzo motriz i el de traccion corresponden a la adherencia.

Podemos deducir tambien que, miéntras mas grande es el peso adherente, mayor será la rampa posible de salvar con el mismo tren i que por consiguiente hai conveniencia en utilizar un tipo de locomotora lo mas pesado posible dentro de los límites impuestos por las cargas soportables de los puentes i demas obras de arte.

4

El esfuerzo motriz del trabajo en simple espansion es dado por la fórmula

$$Fm = 0,75\, p \frac{d^2\, l}{D}$$

i, siendo tres los cilindros de la locomotora de sesenta toneladas, el esfuerzo total será

$$Fm = 2{,}25\ p\ \frac{d^2 l}{D}$$ fórmula cuyos valores correspondientes son:

$$p = 14{,}06,\ d = 30{,}4\ cm,\ l = 30{,}4\ cm\ i\ D = 91{,}4\ cm$$

Reemplazando tendremos

$$Fm = 3 \times 0{,}75 \times 14{,}05\ \frac{\overline{30{,}4 \times 30{,}4}^{2}}{91.4} = \mathbf{9\ 724}\ Kg$$

El esfuerzo motriz dado por la fábrica, para este tipo, alcanza a 10 818 Kg, luego, ha tomado un coeficiente mayor que 0,75.

Si tomamos 0,85 para los tres cilindros se obtendria 2,55 i si aplicamos a la fórmula, en números redondos 2,50 llegamos a:

$$Fm = 2{,}5 \times 14{,}06\ \frac{\overline{30{,}4 \times 30{,}4}^{2}}{91{,}4} = \mathbf{10\ 804{,}4}\ Kg$$

El valor 0,85 parece elevado, sin embargo, respetamos el valor dado por la fábrica, teniendo en consideracion que el esfuerzo motriz de 10 818 Kg no puede ser sino el mayor posible con la admision mas ámplia, en momentos que se exije del motor su máximum de utilidad i a la máquina su máximum de trabajo; por ejemplo, en el momento del demarraje o al vencer una resistencia momentánea mayor. El vapor trabajando de este modo no es bien aprovechado puesto que miéntras mayor es la admision, menor será la espansion i, por consiguiente, menor el aprovechamiento de la propiedad elástica del vapor que es uno de los fundamentos de su aplicacion a los motores.

En el cálculo hecho anteriormente de la rampa que salvaria esta locomotora con el tren fijo de 92,5 toneladas se ha tomado como adherencia $1/5{,}5 \times 60 = 10\ 909$ Kg; por otra parte, el esfuerzo motriz máximo es de 10 804,4 Kg, menor que la adherencia, luego aprovechable en su máximun i correspondiente con la adherencia tomada ántes.

5

Como la locomotora Mallet articulada es compound, el esfuerzo motriz es dado por la fórmula.

$$Fm = 0{,}50\ p\ \frac{d'^2 \times l}{D}$$ en la que significan:

p = presión 200 lb o 13,4 Kg; d' = diámetro cilindro baja presion 20 i 1/2" o 52,1 cm; l = carrera 20" o 50,8 cm; D = diámetro de ruedas motrices 38" o 96,5 cm.

La fórmula espresada en números seria:

$$Fm = 0{,}5 \times 13{,}4 \frac{\overline{52{,}1}^2 \times 50{,}8}{96{,}5} = 9\,574 \text{ Kg}$$

El esfuerzo máximo dado entre sus características alcanza a 10 640 Kg, esfuerzo que se obtiene trasformando la máquina compound en una de simple espansion, haciendo obrar el vapor directamente sobre los cilindros de alta i baja presion. Si aceptamos un aumento de esfuerzo, por esta causa, equivalente a 10% sobre el de la compound tendriamos:

$$9\,574 + 957 = 10\,531 \text{ Kg}$$

Tambien para esta locomotora hemos aceptado la adherencia de 1/5,5 L o sea 10 538 Kg. La fábrica da como factor de adhesion 5,45, lo que aumentaria aquel valor a 10 635, vemos, sin embargo, que ya el primero satisface a la solucion dada en el problema.

La máquina Compound se trasforma en otra de simple espansion sólo cuando se desea elevar al máximum el esfuerzo de traccion, al demarraje o al vencer resistencias momentáneas superiores.

6

Siendo la locomotora Mallet articulada del sistema compound no está fuera de lugar esponer algunas de las ventajas obtenidas con el sistema compound mismo.

En cuanto al gasto de vapor, los señores Deharme i Pulin dicen—Moreau—:

«El esfuerzo máximum de traccion en las llantas de las ruedas motrices de una locomotora compound, funcionando como tal, es por lo ménos igual al esfuerzo máximum teórico de una de simple espansion que tuviera cilindros del mismo volúmen que el o los cilindros de alta de la máquina compound, quedando las demas condiciones iguales para ambos tipos.

«Como el esfuerzo máximum práctico de las locomotoras ordinarias es:

$$0{,}76\, p \frac{d^2 \times 1}{D}, \text{ se ebserva que } \frac{Fm}{Fm_1} = \frac{0{,}50}{0{,}76} \text{ o sea los } \tfrac{2}{3}$$

mas o ménos, de donde se deduce que una locomotora compound, funcionando como tal, desarrolla, marchando a plena admision, un esfuerzo práctico máximum de traccion por lo ménos igual a los $\frac{2}{3}$ del de una locomotora de simple espansion, gastando la mitad del vapor consumido.

«Esto indica que, para desarrollar un mismo esfuerzo la locomotora compound gasta $\frac{1}{2} \times \frac{2}{3}$, o sea los $\frac{3}{4}$ de la cantidad de vapor gastado por una no compound, de donde se deduce una economía de $\frac{1}{4}$ o de 25%. Pero este cálculo no puede conside-

rar la ventaja térmica indiscutible del sistema compound consistente en la reduccion de la cantidad de vapor condensado durante la admision. En realidad, para la plena admision, la economía es mui superior a 25 % ».

7

Respecto de las locomotoras Mallet articuladas, usadas desde los primeros tiempos de la realizacion de este tipo, en el San Gotardo, Moreau espone las siguientes ventajas obtenidas:

1.ª Remolcar, con el mismo peso total del motor i sin aumentar la fatiga del riel, los mismos trenes en condiciones de adherencia mas favorables;

2.ª Remolcar cargas mas pesadas en condiciones climatéricas favorables;

3.ª Obtener mayores velocidades con los mismos trenes;

4.ª Presentar menor resistencia en las curvas de 300 metros, i

5.ª Realizar una economía de combustible, en igualdad de carga remolcada, cuestion mui importante para máquinas que consumen mas de 30 Kg de combustible por kilómetro.

Vemos, pues, que el sistema compound, aunque tiene algunos pequeños defectos como el de la caida de presion al pasar de un cilindro a otro, presenta ventajas indiscutibles que dia a dia, gracias a continuas innovaciones, harán de estas locomotoras un tipo ideal en un servicio ferrocarrilero, para cualquier clase de trenes, en paises que presentan dificultades naturales para la esplotacion económica de sus líneas. Dia a dia el sistema compound va ganando terreno i los mas poderosos colosos que hemos visto construir en los últimos años lo adoptan; será el preferido en la esplotacion de vias que presentan fuertes rampas i curvas de corto radio por la economía que produce. Aunque no es este el lugar de tocar otro asunto que no atañe a la cuestion misma en estudio por ser, sin embargo, de la misma índole, queremos dejarlo establecido de un modo preciso para que el Supremo Gobierno, si lo tiene a bien, incluya su estudio entre el de varios otros que merecen su atencion actualmente en la organizacion de nuestros ferrocarriles nacionales: de un estudio detenido por profesionales, del sistema compound, de su aplicacion científica i bien organizada en la esplotacion de nuestros ferrocarriles i de la preparacion sistemática de un personal debidamente jenerado por estudios cuidadosamente desarrollados, el Estado puede conseguir una economía hasta de 20 % en los gastos actuales de combustible, en la esplotacion de sus líneas, sobre el mas bajo consumo que se obtenga con el sistema actualmente en uso.

Podemos decir entónces que la locomotora Mallet articulada, por ser del sistema compound, tiene grandes ventajas sobre la locomotora Shay, comparándolas como motor, pero debe tenerse presente que dichas ventajas preciosas i posibles en la esplotacion, es decir, en su aplicacion a vias bien conservadas puede que no resulten en líneas en construccion donde su aplicacion debe considerarse bajo otros puntos de vista que le son adversos i aun concluyentes para indicar su eliminacion de ellas, adoptando el tipo corriente usado en la esplotacion.

Si se debe usar locomotoras Mallet articuladas se debe pedir a las fábricas un tipo adecuado a la construccion i no adoptar el de construccion corriente.

8

Si comparamos ámbos tipos en su aplicacion industrial a una línea en construccion, debemos considerar otros factores cuyo análisis haremos despues. Dan los cuadros siguientes un estracto del cálculo hecho para determinar las velocidades desarrolladas por cada tipo de locomotora, el esfuerzo desarrollado respectivamente i las resistencias opuestas por el tren total para las diferentes rampas i las curvas mínimas con el mismo tren dado.

Mediante estos cuadros se puede determinar el tiempo necesario para hacer un recorrido de cualquier largo i que presente cualesquiera rampas, pudiéndose así determinar, despues, el número de trenes diarios aprovechables en el movimiento de toda clase de materiales para la construccion.

LOCOMOTORA "SHAY"

Con $C : H = 0{,}85$ $H = 77{,}8$ m cuadrados.

Tren por arrastrar: 92,5 toneladas

ESFUERZO DE TRACCION	Velocidad en Km/h	En rampas de ‰	Con curvas de $r =$ m	RESISTENCIAS DE LA LOCOMOTORA				RESISTENCIAS DEL TREN				RESISTENCIAS TOTALES
$Z = \left(\frac{162}{V} + \frac{142}{\sqrt{V}}\right) H$ Kg	$V =$ Km/h	$s =$ ‰	$r =$ m	$w_l =$ Kg	$w_r =$ Kg	$\pm s =$ Kg	Total w_l Kg	$w_g =$ Kg	$w_r =$ Kg	$\pm s =$ Kg	Total w Kg	$w_l + w =$ Kg
$= (162 : 15 + 142 : \sqrt{15})\, 77{,}8$ $= 3\,692{,}4$	15	horizontal	recta	6,95	—	—	6,95	2,67	—	—	2,67	$= 6{,}95 \times 60 + 2{,}67 \times 92{,}5$ $= 417 + 247 = 664$
$= 3\,692{,}4$	15	5	80	6,95	$\frac{400}{80 - 20} = 6{,}67$	± 5	18,62	2,67	6,67	± 5	14,34	$= 18{,}62 \times 60 \times 14{,}34 \times 92{,}5$ $= 1\,117{,}2 + 1\,326{,}5 = 2\,443{,}7$
$= 3\,692{,}4$	15	10	80	6,95	6,67	± 10	23,62	2,67	6,67	± 10	19,34	$= 23{,}62 \times 60 + 19{,}34 \times 92{,}5$ $= 1\,417{,}2 + 1\,782 = 3\,199{,}2$
$= 3\,692{,}4$	15	15	80	6,95	6,67	± 15	28,62	2,67	6,67	± 15	24,34	$= 28{,}62 \times 60 + 24{,}34 \times 92{,}5$ $= 1\,717{,}2 \times 2251{,}4 = 3\,968{,}6$
$= 3\,692{,}4$	15	20	recta	6,95	—	± 20	26,95	2,67	—	± 20	22,67	$= 26{,}95 \times 60 + 22{,}67 \times 92{,}5$ $= 1\,617 + 2\,097 = 3\,714$
$= (162 : 10 + 142 : \sqrt{10})\, 77{,}8$ $= 4\,754{,}4$	10	20	80	6,77	6,67	± 20	33,44	2,63	6,67	± 20	29,30	$= 33{,}44 \times 60 + 29{,}3 \times 92{,}5$ $= 2\,006{,}4 + 2\,711 = 4\,717{,}4$

= (162 : 8 + 142 : $\sqrt{8}$) 77,8 = *5 479,5*	8	25	80	6,71	6,67	± 25	38,88	2,68	6,67	± 25	34,30	= 38,88 × 60 + 34,3 × 92,5 = 2 302,8 + 3 171,2 = *5 474*
= (162 : 6,5 + 142 : $\sqrt{6,5}$) 77,8 = *6 271,5*	6,5	30	80	6,69	6,67	± 30	43,36	2,61	6,67	± 30	39,28	= 43,36 × 60 + 39,28 × 92,5 = 2 601,6 + 3 633 = *6 234,6*
= (162 : 6 + 142 : $\sqrt{6}$) 77,8 = *6 613*	6	35	120	6,67	4	± 35	45,67	2,61	4	± 35	41,61	= 45,67 × 60 + 41,61 × 92,5 = *6 589*
= (162 : 5 + 142 : $\sqrt{5}$) 77,8 = *7 451*	5	40	120	6,65	4	± 40	50,65	2,61	4	± 40	46,61	= 50,65 × 60 + 46,61 × 92,5 = 3 039 + 4311 = *7 350*
= (162 : 4,5 + 142 : $\sqrt{4,5}$) 77,8 = *8 013,4*	4,5	45	120	6,64	4	± 45	55,64	2,61	4	± 45	51,61	= 55,64 × 60 + 51,61 × 92,5 = 3 338 + 4 773 = *8 111*
= (162 : 3,8 + 142 : $\sqrt{3,8}$) 78,8 = *8 982*	3,8	50	120	6,64	4	± 50	60,64	2,61	4	± 50	56,61	= 60,64 × 60 + 56,61 × 92,5 = *8 874,4*
= (162 : 3,4 + 142 : $\sqrt{3,4}$) 77,8 = *9 678,3*	3,4	55	120	6,63	4	± 55	65,63	2,60	4	± 55	61,60	= 65,63 × 60 + 61,6 × 92,5 = 3 937,8 + 5 698 = *9 635,8*
= (162 : 3 + 142 : $\sqrt{3}$) 77 8 = *10 581*	3	60	120	6,63	4	± 60	70,63	2,60	4	± 60	66,60	= 70,63 × 60 + 66,6 × 92,5 = 4 238 + 6 161 = *10 399*

LOCOMOTORA "MALLET" ARTICULADA COMPOUND

$H = 107{,}81$ m cuadrados

Tren por arrastrar: 92,5 toneladas

ESFUERZO DE TRACCION	Velocidad en Km/h	En rampas de ‰	Con curvas de r = m	RESISTENCIAS DE LA LOCOMOTORA				RESISTENCIAS DEL TREN				RESISTENCIAS TOTALES
$Z = \left(\frac{162}{V} + \frac{142}{\sqrt{V}}\right) H$ Kg	V = Km/h	s = ‰	r = m	w_1 = Kg	w_r = Kg	$\pm s$ = Kg	Total w_1 Kg	w_g = Kg	w_r = Kg	$\pm s$ = Kg	Total w Kg	$w_1 + w$ = Kg
$(162 : 15 + 142 : \sqrt{15})\ 107{,}81$ = *5 116,7*	15	horizontal	recta	6,95	—	—	6,95	2,67	—	—	2,67	$=6{,}95 \times 57{,}96 + 2{,}67 \times 92{,}5$ $=403 + 247 =$ *650*
= *5.116,7*	15	5	80	6,95	$\frac{400}{80 - 20} = 6{,}67$	± 5	18,62	2,67	6,67	± 5	14,34	$=18{,}62 \times 57{,}96 + 14{,}34 \times 92{,}5$ $=1\,079{,}2 + 1\,326{,}5 =$ *2 405,7*
= *5 116,7*	15	10	80	6,95	6,67	± 10	23,62	2,67	6,67	± 10	19,34	$=23{,}62 \times 57{,}96 + 19{,}34 \times 92{,}5$ $=1\,369 + 1\,789 =$ *3 158*
= *5 116,7*	15	15	80	6,95	6,67	± 15	28,62	2,67	6,67	± 15	24,34	$=28{,}62 \times 57{,}96 + 24{,}34 \times 92{,}5$ $=1\,658{,}8 + 2\,251{,}4 =$ *3 910,2*
= *5 116,7*	15	20	recta	6,95	—	± 20	26,95	2,67	—	± 20	22,67	$=26{,}95 \times 57{,}96 + 22{,}67 \times 92{,}5$ $=1\,562 + 2\,097 =$ *3 659*

$= 5\,116{,}7$	15	20	80	6,95	6,67	± 20	33,62	2,67	6,67	± 20	29,34	$=33{,}62\times57{,}96+29{,}34\times92{,}5$ $=1\,948{,}6+2\,714=4\,662{,}6$
$=(162:13{,}5+142:\sqrt{13{,}5})\,107{,}8$ $=5\,460$	13,5	25	80	6,89	6,67	± 25	38,56	2,65	6,67	± 25	34,32	$38{,}56\times57{,}96+34{,}32\times92{,}5$ $=5\,410$
$=(162:11+142:\sqrt{11})\,107{,}8$ $=6\,201{,}7$	11	30	80	6,70	6,67	± 30	43,37	2,64	6,67	± 30	39,31	$43{,}37\times57{,}96+39{,}31\times92{,}5$ $=6\,150$
$=(162:10+142:\sqrt{10})\,107{,}8$ $=6\,479{,}4$	10	35	120	6,77	4	± 35	45,77	2,63	4	± 35	41,63	$45{,}77\times57{,}96+41{,}63\times92{,}5$ $=6\,503{,}5$
$=(162:8{,}5+142:\sqrt{8{,}5})\,107{,}8$ $=7\,315{,}3$	8,5	40	120	6,74	4	± 40	50,74	2,62	4	± 40	46,62	$50{,}74\times57{,}96+46{,}62\times92{,}5$ $=7\,253$
$=(162:7{,}5+142:\sqrt{7{,}5})\,107{,}8$ $=7\,913$	7,5	45	120	6,69	4	± 45	55,69	2,61	4	± 45	51,61	$55{,}69\times57{,}96+51{,}61\times92{,}5$ $=8\,002$
$=(162:6{,}5+142:\sqrt{6{,}5})\,107{,}8$ $=8\,735$	6,5	50	120	6,67	4	± 50	60,67	2,61	4	± 50	51,61	$60{,}67\times57{,}96+56{,}61\times92{,}5$ $=8\,752{,}8$
$=(162:5{,}6+142:\sqrt{5{,}6})\,107{,}8$ $=9\,587$	5,6	55	120	6,66	4	± 55	65,66	2,61	4	± 55	61,61	$65{,}66\times57{,}96+61{,}61\times92{,}5$ $=9\,504{,}6$
$=(162:5+142:\sqrt{5})\,107{,}8$ $=10\,399$	5	60	120	6,65	4	60	70,65	2,61	4	± 60	66,61	$70{,}65\times57{,}96+66{,}61\times92{,}5$ $=10\,266$

De los cuadros anteriores se desprende que la locomotora Mallet articulada, con menor peso motor que la locomotora Shay, arrastra el mismo tren con mayores velocidades, velocidades que naturalmente indican en la misma proporcionalidad el mayor % de trabajo útil que es bastante considerable aunque se tomen solamente velocidades relativamente bajas, como son las que deben desarrollar trenes lastreros, no superiores a 15 Km.

Las mayores velocidades obtenidas con la locomotora Mallet son debidas a la mayor superficie de caldeo que produce mayor cantidad de vapor en igual tiempo i como el tren remolcado es el mismo en ámbos casos i el esfuerzo de traccion necesario es tambien igual, el mayor trabajo producido por la mas grande cantidad de vapor se traduce en un aumento de velocidad.

Los cuadros nos indican que la locomotora Shay alcanza a salvar gradientes de 20°/oo, en recta, a razon de 15 kilómetros por hora, miántras que la Mallet franquea la misma rampa pero en curva, venciendo, por consiguiente, mayores resistencias que son considerables. La locomotora Shay consume la totalidad de su esfuerzo desarrollado, para esa velocidad, que alcanza a 3 692,4 Kg i aun no es suficiente a vencer las resistencias opuestas en 20°/oo i recta con un tren de 92,5 toneladas; miéntras que la locomotora Mallet en 20°/oo i curvas de 80 metros de radio necesita vencer 4 662,6 kilógramos de resistencias con 5 116,7 kilógramos de esfuerzo de traccion que desarrolla para 15 kilómetros por hora.

Si seguimos la comparacion, observamos que las velocidades desarrolladas por ambos tipos son:

Rampas en °/oo	Curvas de r	Locomotora Shay Desarr. V	Locomotora Mallet Desarr. V'	V'
20°/oo.....	80 metros	V = 10 Km/h	V' = 15 Km/h	V' = 1,5 V.
25 »	80 »	V = 8 »	V' = 13,5 »	V' = 1,69 V
30 »	80 »	V = 6,5 »	V' = 11 »	V' = 1,69 V
35 »	120 »	V = 6 »	V' = 10 »	V' = 1,67 V
40 »	120 »	V = 5 »	V' = 8,5 »	V' = 1,7 V
45 »	120 »	V = 4,5 »	V' = 7,5 »	V' = 1,67 V
50 »	120 »	V = 3,8 »	V' = 6,5 »	V' = 1,7 V
55 »	120 »	V = 3,4 »	V' = 5,6 »	V' = 1,65 V
60 »	120 »	V = 3 »	V' = 5 »	V' = 1,67 V

Se observa entónces que las velocidades desarrolladas por la locomotora Mallet articulada son 1 i 2/3 veces las obtenidas con la Shay, lo que puede traducirse diciendo que el trabajo útil hecho por la primera es 1 i 2/3 veces el de la segunda, porque si se hacen las velocidades iguales aumentará el esfuerzo de traccion de la Mallet i por consiguiente el tonelaje del tren posible de remolcar.

Por ejemplo, en 20°/₀₀ i r = 80 m la locomotora Shay desarrolla 10 kilómetros por hora: si tomamos igual velocidad para la Mallet el esfuerzo de traccion es:

$$Z = (162 : 10 + 142 : \sqrt{10})\ 107{,}8 = 6585{,}6 \text{ Kg}$$

i las resistencias son 33,44 i 29,3 Kg por tonelada de locomotora i de tren respectivamente. El tren posible de arrastrar seria en este caso:

$$Q = \frac{6585{,}6 - 33{,}44 \times 58}{29{,}3} = \frac{4646}{29{,}3} = \textit{158 toneladas}$$

es decir, 1,71 veces el tren arrastrado por la locomotora Shay.

En 40°/₀₀ i r = 120 m con V = 5 Km/hora, el esfuerzo de traccion de la Mallet seria:

$$Z = (162 : 5 + 142 : \sqrt{5})\ 107{'}8 = \textit{10 339 Kg}$$

i el tren posible de remolcar:

$$Q = (10\,339 - 50{,}65 \times 58) : 46{,}61 = \textit{158,7 toneladas.}$$

o sea, la misma relacion obtenida ántes.

Hai que tener presente, sin embargo, que el peso del tren no podria subir de 92.5 toneladas por ser ese el peso indicado por la rampa por franquear, de modo que, el mayor trabajo hecho por la locomotora Mallet se obtendria en la mayor velocidad i no en un tren mas pesado.

Segun lo que se ha espuesto ántes, una locomotora compound desarrolla el mismo esfuerzo de traccion que una locomotora de simple espansion cuyos cilindros tienen un volúmen equivalente al o a los cilindros de alta presion de la Compound. En este caso, los volúmenes son de 86,9 i 66,15 litros para la Mallet i la Shay respectivamente, o sea, en la proporcion de 1,313; el esfuerzo que debe desarrollar la Mallet se encontrará en la misma proporcion de aumento.

El esfuerzo desarrollado por la Shay, para la velocidad de 15 Km por hora, es de 3 692,4 Kg que, aumentados en proporcion de la de los volúmenes de los cilindros, dan 4 848 Kg como esfuerzo de traccion que debe desarrollar la locomotora Mallet: el cálculo nos ha dado 5 116,7 Kg, o sea, 7,2% mas que significa mejor aprovechamiento de la máquina.

Para hacer la comparacion de los consumos de vapor, de agua i de carbon, debemos tomar iguales condiciones para ámbas locomotoras: lo determinaremos para la velocidad de 15 Km por hora i con una admision de 0,75 de la carrera.

Locomotora Shay

El volúmen de los tres cilindros es:

$$V = \frac{3{,}14 \times \overline{3{,}04}^2}{4} 3{,}04 \times 3 = 22{,}05 \times 3 = 66{,}25 \text{ littros}$$

para la admision de 0,75, el gasto de vapor por carrera es de

$$66{,}15 \times 0{,}75 = 49{,}6 \text{ litros}$$

i, como cada cilindro hace cuatro carreras por revolucion de rueda motriz, el gasto será de

$$49{,}6 \times 4 = 198{,}4 \text{ litros por revolucion.}$$

A la velocidad de 15 Km por hora i siendo el diámetro de la rueda motriz de 0,914 m, el número de revoluciones es:

$$\frac{15\,000}{3{,}14 \times 0{,}914} = \frac{15\,000}{2{,}87} = 5\,226{,}5 \text{ revoluciones.}$$

El gasto de vapor por hora es de $198{,}4 \times 5\,226{,}5 = \textit{1 036 937,6}$ litros.

Para esta admision la presion media efectiva es 0,89 p, en este caso será 0,89 de 14,06 = 12,51, presion para la que un kilógramo de vapor ocupa 154 litros, luego el gasto por hora equivale a

$$\frac{1\,036\,937{,}6}{154} = 6\,733{,}4 \text{ Kg de agua,}$$

que necesitan para ser evaporados, a razon de 6,5 Kg de agua por uno de carbon,

$$6\,733{,}4 : 6{,}5 = \textit{1 036} \text{ Kg de carbon.}$$

Locomotora Mallet

Volúmen de los cilindros:

$$V' = \frac{3{,}14 \times 3{,}3^2}{4} 5{,}08 \times 2 = 86{,}9 \text{ litros}$$

Gasto por carrera, con 0,75 de admision, es:

$$85{,}9 \times 0{,}75 = 65{,}2 \text{ litros}$$

Por revolucion será:

$$65{,}2 \times 2 = 130{,}4 \text{ litros.}$$

Como la rueda motriz tiene 0,965 m de diámetro, el número de revoluciones es:

$$\frac{15\,000}{3{,}13 \times 0{,}965} = 4\,950{,}5$$

i el gasto por hora alcanza a $130{,}4 \times 4\,950{,}5 =$ *645 545,2* litros que, a razon de 160 litros por kilógramo, para la presion efectiva $0{,}89 \times 13{,}4$ atmósferas, son:

645 545,2 : 160 = *4 034,6* Kg de agua que necesitan para ser evaporados

4 034,6 : 6,5 = *621* Kg de carbon.

La economía proviene del mejor aprovechamiento del vapor que hace la Mallet compound, economía que debe ser de 25% sobre una de simple espansion de cilindros equivalentes en volúmen a los de alta presion de la compound. En este caso, para el consumo, los tres pueden considerarse seis cilindros, desde que aquellos hacen cuatro carreras por revolucion de rueda motriz. Los volúmenes están como 132,3 a 86,9 i el % de economía es de 1,52 veces 25 = 38% del consumo de la Shay, 1 036 Kg, lo que da para consumo de la Mallet 642 Kg de combustible.

De lo anteriormente espuesto se deduce que la locomotora Mallet articulada, con peso motor equivalente al de la Shay, puede hacer, gracias a su mayor potencia desarrollada en los cilindros, un trabajo superior de $\frac{2}{3}$ al que hace la Shay.

Las resistencias internas de la locomotora son menores en la Mallet, en comparacion con las de construccion corriente, i en la Shay son mayores: en la primera

porque las diferencias de presiones en las cajas de vapor son menores, gracias al receptáculo intermediario, en la segunda porque las resistencias producidas por frotamientos en el conjunto de engranajes, que hace la trasmision de los esfuerzos, son mui considerables i serán mayores una vez la locomotora en servicio i ya sus mecanismos desgastados.

De esto se desprende un mayor rendimiento o aprovechamiento útil para la locomotora Mallet articulada i uno menor para la Shay.

La avaluacion de esa menor i mayor resistencia respectiva no ha sido posible hacerla por no tener los datos necesarios para poder aplicar las fórmulas, pero con sólo consultarlas i analizarlas en los factores que las forman se puede medir su importancia.

Funcionamiento.—El funcionamiento i manejo de una locomotora son cosas de importancia suma sobre todo en líneas en construccion i es evidente que mas aceptable será un tipo de locomotora miéntras mas sencillez i resistencia presente a la vez que su conservacion sea fácil de obtener. Es indiscutible tambien que miéntras mas delicados sean sus organismos mas inadecuadas serán para esta clase de trabajos.

Los dos tipos presentados tienen inconvenientes en este sentido; la locomotora Mallet articulada tiene mayor número de piezas rozantes, algunas de ellas delicadas, es de esperar entónces un desgaste rápido; la locomotora Shay no está excenta del mismo inconveniente porque si es verdad que sus mecanismos son ménos numerosos tambien lo es que los organismos de trasmision de esfuerzos sufren mucho.

La locomotora Mallet articulada, dividida en dos, presenta una mayor flexibilidad que las de tipo ordinario, para la pasada en las curvas, su base rijida es pequeña i está dentro de los límites fijados para el tren tipo de la Direccion de Obras Públicas, la locomotora Shay, flexible tambien para hacer el mismo trabajo, por la disposicion de las carretillas, presenta un árbol que trasmite el esfuerzo a ejes acoplados a él por conecciones que por fuerza deben trabajar mucho. Los engranajes, por las posiciones independientes que adoptan, en la rueda i el piñon, trabajan en condiciones desfavorables i producen rozamientos mui fuertes que producen el natural desgaste de los dientes que perderán mui pronto su resistencia i deberán ser cambiados. Los cojinetes que soportan el eje sufrirán por las mismas causas de un modo perjudicial i darán lugar a juegos que pueden llegar a ser causa de fuertes pérdidas en el trabajo útil. Las bielas que accionan el árbol estarán afectadas por trabajos anormales, por las diferentes posiciones que debe adoptar el eje trasmisor de esfuerzos, i habrá fuerzas importantes que tienden a producir la ruptura de ellos.

La trasmision de los esfuerzos se hace de un modo mas regular en la locomotora Shay, porque cada revolvcion de la rueda motriz necesita 12 o 18 pulsaciones segun que el piñon esté en la relacion de 2 o 3 con la rueda motriz, en la locomotora

sólo hai cuatro pulsaciones para cada conjunto de ruedas obrando en ángulos determinados.

Si se rompiera un cilindro, la locomotora Shay trabajaría en desquilibrio miéntras que la Mallet podria trabajar con un sistema si se desarregla el otro.

Manejo.—En cuanto a manejo es natural que la locomotora Shay tiene la ventaja porque su sistema mismo no impone conocimientos profundos al maquinista; pero si la locomotora Mallet exije de aquél mejores conocimientos, mas asiduidad i estudio continuo, por ser del sistema compound, puede ser trasformada en una de simple espansion, admitiendo vapor directo a ambos grupos de cilindros, aumenta el esfuerzo de traccion en un momento dado aunque con pérdida de la economía.

La circuntancia de tener la locomotora Mallet articulada-ténder. sus estanques delante del maquinista no deja de ser un factor que debe tomarse en consideracion porque en un momento dado puede, por impericia o descuido del maquinista, dar lugar a accidentes.

Se puede, pues, asegurar que la locomotora Mallet necesita un personal mui bien preparado, contraido i estudioso, personal que difícilmente se conseguiria, ya que, en nuestro pais, el sistema Compound, en su aplicacion a la esplotacion de nuestros ferrocarriles, es casi desconocido. Es evidente que la aplicacion de este sistema puede resultar un fracaso completo si se carece del personal necesario, fracaso que no habria que hacer recaer sobre el sistema mismo.

Conservacion.—En cuanto a los gastos de conservacion se puede decir que el tipo Mallet arti ulado necesita un mayor porcentaje que la Shay, por ser sus organismos mas numerosos i delicados; pero no hai que olvidar que, cualquiera que sea el tipo de la locomotora, en la construccion, su duracion no puede ser mayor que 7 años, con la ventaja, en este caso, que la locomotora Mallet, despues de reparaciones suficientes, a la conclusion de los trabajos de construccion, puede ser aprovechada para la esplotacion, miéntras que la Shay deberia ser abandonada, quedando su vida determinada por la duracion de esos trabajos.

El mayor porcentaje destinado a la conservacion de la locomotora Mallet estaria así compensado por su futuro aprovechamiento en la esplotacion de líneas con rampas de 3 i 4%.

Es evidente que la Mallet, en término medio, requiriria mayor tiempo para sus reparaciones; pero esto no es de tanta importancia si consideramos que hace, gracias a su mejor motor, el mismo trabajo que la Shay en los 3/5 del tiempo empleado por ésta, siempre que las características estén en la misma proporcion.

La fábrica dota a la locomotora Shay de piezas de repuesto e indica la compra de otras indispensables, que se desgastan pronto en el trabajo. Con esto se conseguiria una menor pérdida de tiempo para reparaciones porque sólo habria que proceder a cambiar piezas; pero no vemos el inconveniente para hacer igual cosa con la Mallet.

En resúmen, la locomotora Mallet articulada tiene ventajas indiscutibles sobre la Shay, como motor i como máquina útil de trabajo i el único fundamento que obra en contra de su aplicacion a la construccion es el de la posible falta de personal competente para su manejo, falta que puede producir resultados mui inferiores a los que se pueden aguardar de este sistema.

De todo lo espuesto se deducen las siguientes conclusiones:

1.° Toda locomotora de adherencia puede franquear una rampa dada siempre que tenga el suficiente peso adherente i las rampas máximas que puede salvar serán mayores miéntras mas grande es su peso adherente.

2.° Las locomotoras, Mallet de 58 y Shay de 60 toneladas, no son suficientes para remolcar el tren dado ántes de diez carros lastreros cargados, con un peso total de 92,5 toneladas, en la construccion de la línea, porque en ella se presentarán rampas superiores al 6% i los tipos estudiados consumen ya en este límite la totalidad de sus esfuerzos de traccion i motriz máximos en trabjo máximo. Si el tren por remolcar debe ser mas o ménos de ese peso se debe adoptar locomotoras de 65 a 70 toneladas de peso adherente.

3.° El sistema compound es, en jeneral, mas ventajoso que el sistema ordinario i su aplicacion está indicada en las redes ferroviarias cuya esplotacion se desea hacer económica.

4.° La locomotora Mallet articulada del sistema Compound aprovecha mucho mejor el vapor i, a equivalencia de volúmenes de cilindros, en la forma indicada, habrá economía de vapor i la consiguiente de agua i combustible, siendo natural su superioridad sobre la Shay como motor.

5.° La locomotora Mallet articulada produce mayor rendimiento de trabajo útil, a equivalencia de peso motor, porque arrastra, en igualdad de condiciones, el mismo tren con mayores velocidades o porque a igualdad de velocidades arrastra un tren mas pesado, mayor rendimiento que proviene del motor mas potente de la Mallet en razon de la mas grande superficie de caldeo de que dispone i que produce mayor cantidad de vapor por unidad de tiempo, con el consiguiente superior consumo de combustible.

6.° La locomotora Mallet articulada compound puede ser trasformada en una de simple espansion, pero con desmedro de la economía, base del sistema, haciendo llegar vapor directo del caldero sobre ámbos pares de cilindros. La economía disminuye tambien en continuado trabajo con rampas.

7.º La locomotora Mallet articulada tiene menores resistencias internas que las de construccion corriente, la locomotora Shay, por el contrario, las tiene superiores.

8.º A pesar de hacerse la trasmision de los esfuerzos de un modo mas regular en la locomotora Shay, la disposicion de sus organismos trasmisores del trabajo útil da lugar a trabajos anormales discontinuos que tienden a producir la ruptura de órganos esenciales.

9.ª La locomotora Mallet articulada puede aprovecharse en la esplotacion de líneas de 3 i 4% de rampas, despues de su uso en la construccion. La única objecion que puede oponerse a su aceptacion en estos taabajos es la de la falta de personal preparado i estudioso.

10. Si se usa la locomotora Mallet articulada en la construccion, se debe pedir un tipo especial a las fábricas, reformando las que se usan en la esplotacion.

Santiago, 29 de Diciembre de 1909.