

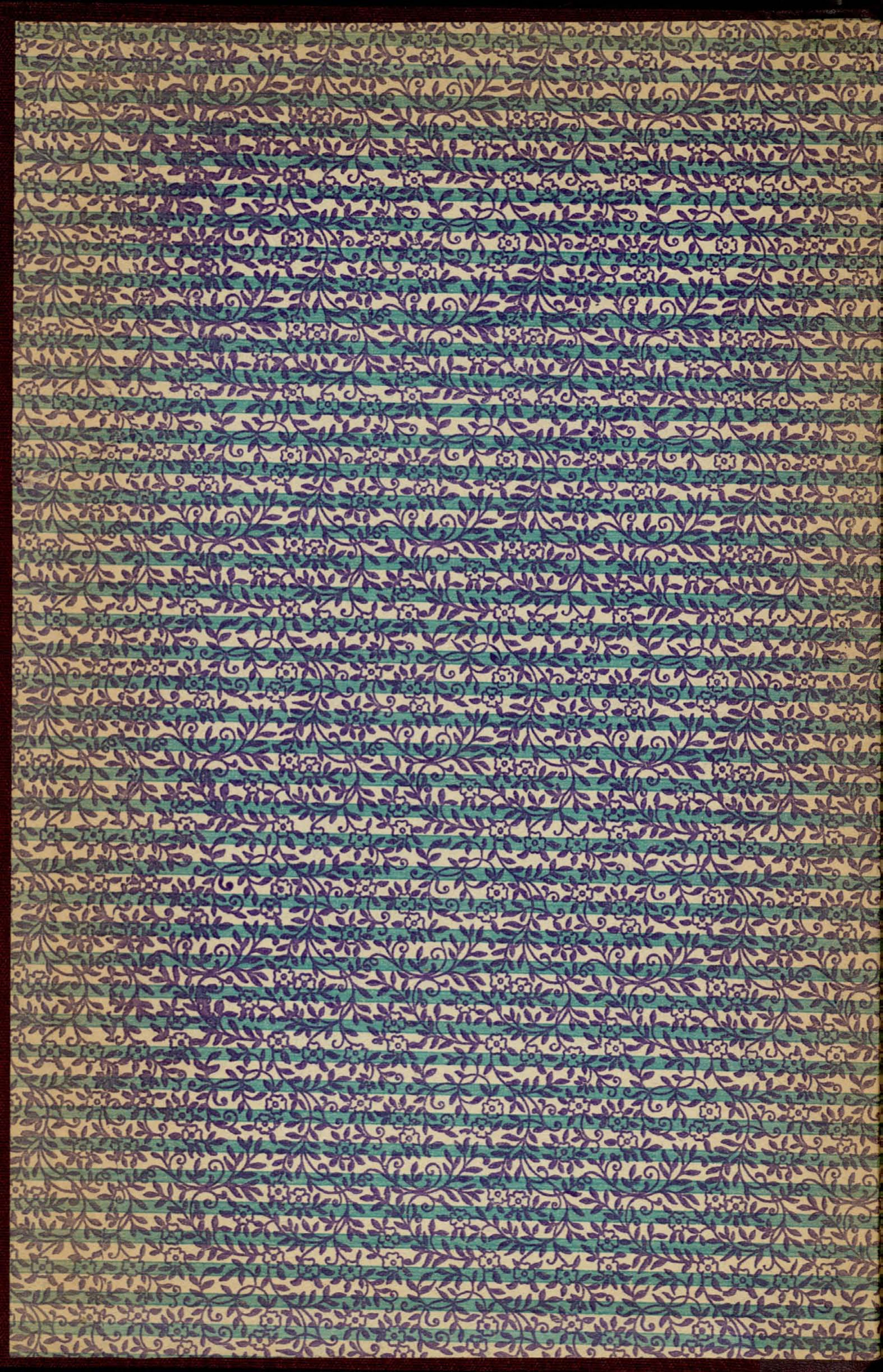
PERFORACIÓN
DEL
TUNEL
DE LOS
ALPES

FONDO ANTIGUO

A-3301

Bib. Regional







A-3301

TUNEL DE LOS ALPES.

OBSERVACION IMPORTANTE.

En el mes de julio del año 1860 fuí comisionado para estudiar las obras de perforacion del Túnel de Mont-Cenis en compañía de los entonces alumnos de sexto año D. Manuel Pardo y don Luis Vasconi, y á nuestro regreso presentamos en el Ministerio de Fomento la memoria que hoy se publica.

En aquella fecha ni habian comenzado los trabajos de perforacion por los nuevos procedimientos, ni los aparatos estaban aun montados : por otra parte los ingenieros constructores guardaban gran reserva sobre el sistema de ejecucion, y eran casi desconocidos, sobre todo en sus detalles, los mecanismos que habian de emplearse. En ninguna publicacion estrangera hallamos, no ya descritas las obras, que mal podía describirse lo que aun no existía, pero ni aun el plán general de los trabajos.

Muy incompleta es la memoria que hoy se publica, mas por entonces pudo en virtud de las razones expuestas presentar algun interés

Desde el año 60 hasta hoy, es decir, en un espacio de mas de tres años, las obras han avanzado rápidamente : como sucede en trabajos de este género, á medida que la experiencia ha

ido aconsejando nuevas mejoras, se ha modificado el plan primitivo, y esto ha sucedido por ejemplo con los aparatos de condensacion de aire establecidos en Madane: la apertura del Túnel que en aquella fecha era solo un proyecto, hoy está en vía de ejecucion: y por último, aquella natural reserva que guarbaban en un principio los ingenieros ha desaparecido al fin, y descritos están hoy en la mayor parte de las publicaciones estrangeras el sistema y los aparatos y mecanismos empleados en el rompimiento del túnel. Razones son estas por las que á depender solo de mí, no se publicaria ya este trabajo, que forzosamente es, y ha de parecer, inexacto é incompleto, y cuya oportunidad pasó. Mas puesto que al fin ha de ver la luz pública, he preferido que salga tal como fué escrito, á redactarlo de nuevo; agregando, sin embargo, en un apéndice las nuevas noticias que he podido adquirir, y corrigiendo tambien en dicho apéndice algunos de los errores cometidos en el cuerpo principal del escrito.

Madrid 30 de junio de 1863.

JOSÉ ECHEGARAY.

MEMORIA

SOBRE

LOS TRABAJOS DE PERFORACION

DEL

TUNEL DE LOS ALPES,

ESCRITA EN EL AÑO 1860

DURANTE LAS PRÁCTICAS

DE LA ESCUELA ESPECIAL DE INGENIEROS

DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.

MADRID:

IMPRENTA DE LA VIUDA DE D. J. C. DE LA PEÑA,
calle de Afocha, núm. 149.

1863.



MEMORIA

SOBRE

LOS TRABAJOS DE PERTORACION

DEL

TUNEL DE LOS ALPES.

ESCRITA EN EL AÑO 1863

DEBANTE LAS AUTORIDADES

DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIEROS

DE CARMINES, CÁDIZ Y BILBAO.

IMPRESA

IMPRESA DE LA VIUDA DE D. J. C. DE LA PLAZA

Calle de Mocho, núm. 119.

1863.



ADVERTENCIA.

COMISIONADOS por la Direccion general de Obras públicas en el verano de 1860 para estudiar durante las prácticas de la Escuela especial de Ingenieros de Caminos el sistema de perforacion del Túnel de los Alpes, y sabiendo por las publicaciones extranjeras que ni estaban montados los aparatos, ni por lo tanto habian comenzado los trabajos, creimos conveniente estudiar en las oficinas centrales de Paris el proyecto en cuestion antes de ir á Modane ó á Bardoneche, para formarnos desde luego una idea exacta del nuevo sistema, lo cual no hubiéramos podido conseguir de una manera completa en la misma localidad por las razones espuestas precedentemente. Mas á nuestra llegada á Paris supimos, que en virtud de un reciente convenio celebrado entre Francia y el Piamonte, convenio de que no teniamos noticia, se habia hecho cargo este último pais de la ejecucion de la obra, por cuya causa habia recogido el Gobierno cuantos datos y antecedentes obraban en dichas oficinas: imposible nos fué por este motivo realizar nuestro primer pensamiento. Al mismo tiempo nos manifestó Mr. Laffite, representante de la Compañía del ferro-carril Victor Manuel, cuan difícil sería que pudiésemos estudiar los nuevos aparatos de perforacion, no solo

por no hallarse aun establecidos, sino mas principalmente porque deseaban los Ingenieros guardar el mayor secreto sobre cuanto al nuevo procedimiento para taladrar túneles se referia. La natural desconfianza que á todo inventor aqueja, sobreexcitada por las muchas reclamaciones que respecto á la originalidad del nuevo sistema habian hecho otros Ingenieros, esplicaba, y hasta cierto punto justificaba tambien, este recelo.

Al llegar á Turin nos convencimos de la exactitud de cuanto Mr. Laffite nos habia dicho; y si bien gracias á la eficaz y amable recomendacion del Embajador español Sr. Coello, y á la galanteria del Sr. Menabrea, pudimos vencer en parte los obstáculos que á la realizacion de nuestros deseos se oponian, se comprende desde luego que el exámen que de las obras hicimos fué rapidísimo, y por lo tanto incompleto y superficial. No hemos tenido á la vista, al redactar la presente noticia, plano ni memoria alguna; pues si bien los Ingenieros directores nos permitieron visitar los trabajos y examinar los mecanismos, sin duda por sus muchas ocupaciones no les fué posible proporcionarnos varios datos que hubiéramos deseado adquirir y que á nuestra salida de Bardoneche nos prometieron. Para redactar, pues, la siguiente noticia, nos hemos atendido tan solo á los recuerdos que de nuestra visita al Túnel hemos podido conservar, y hé aquí por qué conceptuamos necesarias las esplicaciones que preceden: por ellas se comprenderá cuán desfavorables han sido las circunstancias en que nos hemos visto obligados á redactar esta memoria, y tal vez se nos dispensen los involuntarios errores que hayamos cometido, y las inexactitudes en que seguramente habremos incurrido, bien á nuestro pesar. Madrid 25 de febrero de 1861.— José Echegaray.— Manuel Pardo.— Luis Vasconi.

TUNEL DE MONT-CENIS.

INTRODUCCION.

Años há que lucha el Piamonte por conquistar el puesto que en Europa le corresponde, y del que su constancia y su fé en el porvenir, tanto como los talentos y los esfuerzos de sus hijos, le hacen digno. Centro y núcleo de la gran nacionalidad italiana, comprende cuán grande es la mision que debe cumplir, y trabaja sin descanso para realizarla; así se le halla en todas partes afanándose por la gran obra, y alzando á todas las esferas el espíritu de vida y de progreso que le anima; y natural es, que en medio de este gran movimiento, que se hace sentir lo mismo en el órden intelectual que en el órden físico, dirija una buena parte de sus fuerzas hácia el elemento civilizador de la época, y procure completar y poner en relacion su red de vias férreas con las de los Estados limítrofes.

Grandes intereses comerciales le ligan en efecto á Suiza, Alemania y Francia; altas miras políticas le aconsejan que estreche mas y mas sus relaciones con esta última potencia, á la que pudiera decirse, que hasta el agradecimiento y la historia moderna le unen (1); y si por punto general toda red

(1) Esto se escribía en el año 1860.

de ferro-carriles debe enlazarse con las restantes, á menos de quedar rota y aislada, y como miembro segregado del cuerpo sin recibir de él sangre y vida, bien se comprende que aspire á poner en inmediata relacion sus vias férreas con las estensísimas redes que cubren ya el continente europeo, llevando á todas partes el bienestar y la riqueza.

La red italiana, que entre líneas construidas ó en construccion comprende mas de 1.500 kilómetros, puede por el pronto llenar las necesidades del pais; mas si ha de dar los grandes resultados á que se aspira, es de todo punto indispensable que se ponga en inmediata relacion con los ferro-carriles suizos, alemanes y franceses. Sin entrar aquí en detalles ajenos á nuestro objeto, oportuno será sin embargo, para que cuando menos se aprecie toda la trascendencia de la importantísima obra que nos proponemos describir, y que es la clave, por decirlo así, del gran problema de los ferro-carriles italianos, recordar algunos datos, bien conocidos ciertamente, pero siempre interesantes y dignos de estudio.

Solo dos observaciones haremos entre las muchas que pudiéramos presentar. Basta para convencerse de la importancia que dá, y que en efecto debe dar el Piamonte, á la pronta terminacion del ferro-carril Victor Manuel, observar cual fácil y ventajosa competencia podria hacer Génova á Marsella en la plaza de Ginebra.

La distancia de Marsella á Ginebra por Lion es de 510 kilómetros; la de Génova á Ginebra por Mont-Cenis, de 450 kilómetros; y esta diferencia de 60 kilómetros entre ambos trayectos, representa, á igualdad de las demas condiciones, una ventaja de seis francos por tonelada en favor de la última línea. La competencia entre Marsella y Génova es por lo tanto posible, al menos entre ciertos límites, y será gérmen de prosperidad para esta última plaza comercial.

Pero si al presente el enlace de la red piamontesa con las líneas francesas, suizas y alemanas, daría nueva vida á los ferro-carriles italianos, aun las ventajas serían mayores, y mayor la circulacion y el movimiento mercantil, tan luego como se

realice una de las empresas mas gigantescas del siglo: nos referimos á la apertura del Istmo de Suez. Terminada que sea esta gran obra, y rota al propio tiempo la barrera de los Alpes, el Piamonte, y puede decirse que la Italia entera, vienen á ser puntos de paso para el comercio entre Oriente y muchos de los centros mercantiles de Europa; pero si por desgracia este obstáculo existe cuando el canal de Suez se abra al comercio, y si la red piamontesa continúa aislada en medio de las grandes vías que llegan hoy hasta la frontera italiana, la corriente comercial retrocederá ante la altísima barrera de los Alpes, y abrirá nuevos cauces, llevando á paises mas afortunados fecundos elementos de progreso.

Las consideraciones que brevemente acabamos de presentar prueban cuanta importancia tiene el problema del paso de los Alpes, no tan solo para el Piamonte sino para la Europa entera; pues por fortuna se va comprendiendo ya que los intereses de los pueblos son armónicos, y que no es la ruina de uno motivo de verdadero engrandecimiento para los demas. Mas el problema, fuerza es confesarlo, es difícil y complicado de suyo, y á mas de esto, puede decirse que es múltiple, porque varias son en efecto las soluciones que á la vez han de elegirse y realizarse para unir los ferro-carriles italianos á los de Suiza, Alemania y Francia, por diversos puntos convenientemente elegidos á lo largo de la frontera piamontesa.

Así es como se han propuesto en diversas ocasiones las líneas siguientes:

Comunicacion entre Tolon y Génova por el litoral del Mediterráneo.

Paso por el Mont-Cénis.

Paso de los Alpes por el pequeño San Bernardo.

Línea de union entre Suiza y el Piamonte por el gran San Bernardo.

Paso por el Simplon, por San Gotardo, por Splugen, por Lukmanier etc. etc.

Estas diversas soluciones han ido sucesivamente surgiendo del estudio de las localidades, y representan intereses diversos

por poderosísimas influencias defendidos: así es como el Piemonte y la Francia apoyan el paso por los Alpes franco-piamonteses; como Austria sostiene la conveniencia de una línea por Splugen; y como Alemania defiende el paso por los dos Lukmaniers; pero entre estos diversos proyectos el que ha merecido la prioridad, y el que se hallará en breve terminado, exceptuando el Túnel de Mont-Cenis, es el conocido con el nombre de ferro-carril Victor Manuel.

Todas las dificultades del paso por Mont-Cénis han venido pues á reconcentrarse en el ya célebre túnel, y contra ellas luchan los distinguidos ingenieros que se hallan al frente de la obra, no con absoluta seguridad de un buen éxito, pero con grandes esperanzas y con esforzado ánimo al menos. Hé aquí porqué, como digimos al principio, es hoy el túnel de Mont-Cénis la clave del paso de los Alpes, y cómo hay altísimos y trascendentales problemas íntimamente enlazados con esta gran cuestion de arte.

Paso de los Alpes por Mont-Cénis.

Débese á Mr. Médail la primera idea del paso de los Alpes por Mont-Cénis: en una memoria que publicó hácia el año 37 hizo notar: 1.º, que los valles de la Doire y del Arc corren paralelamente en una gran estension de su curso, de Poniente á Levante el primero, y de Levante á Poniente el último: 2.º, que si se imaginaba una línea directa entre Turin y Paris, los puntos en que dicha línea cortase á ambos rios estarian próximamente á nivel; 3.º, que su distancia seria de unos 10 á 12 kilómetros, y que correspondia este paso al máximo estrechamiento de la cadena de los Alpes en la direccion indicada.

Pero aun eligiendo dicho punto como el mas conveniente para el paso en cuestion, quedaba otro problema que resolver, y era este, la manera de salvar la distancia de 12 kilómetros que entre uno y otro rio mediaba.

O bien podia pasarse por la parte superior de la divisoria

marchando siempre sobre el terreno con el desarrollo conveniente y pequeños túneles, ó bien podia intentarse la construccion de uno solo que fuera de uno á otro valle corriendo bajo la cordillera de los Alpes en una estension de 10 á 12 kilómetros.

Una y otra solucion tuvieron naturalmente sus defensores, y aun para realizar la primera se presentaron algunos proyectos: llegaron á proponerse pendientes de 10 por 100, desmontes de 120 metros de altura, y ruedas hidráulicas como motores auxiliares; mas tan imperfectos eran estos sistemas que al fin fueron desechados, y todos los esfuerzos de los ingenieros se dirigieron de consuno á vencer las enormes dificultades que la construccion de un paso subterráneo trae consigo; pero que aun siendo grandes se consideraban inferiores á las que el paso superior de la cordillera habria de ofrecer necesariamente. Y en efecto, de escoger este último sistema era preciso elevarse á unos 700 metros sobre los valles de la Doire y del Arc, lo que equivale, suponiendo que el trabajo necesario para subir 5 metros es igual al que se desarrolla para recorrer un kilómetro sobre la horizontal, á un aumento en la longitud de la línea de $\frac{700}{5} \times 1^k = 140$ kilómetros, ó sean 25 leguas próximamente.

Todos los proyectos que suponen un paso superior y exigen por lo tanto que la línea suba 700 metros con pendientes del 8 y del 10 por 100 para bajar en seguida de esta altura con iguales dificultades, no resuelven, pues, el problema del paso de los Alpes. «No se trata, dijo el ilustre general Menabrea en la Cámara de los Diputados, de *pasar* los Alpes, sino de *suprimir* los Alpes; no de ir por *encima* de la gran masa de montañas, sino de atravesar por su centro;» y aun suponiendo que el gasto inicial y el tiempo, y las dificultades de construccion sean mayores en este último caso que en el primero, debe sacrificarse sin titubear el coste de primer establecimiento á las inmensas ventajas que proporciona una esplotacion regular y fácil.

Tal era al menos, y prescindiendo de algunas consideraciones que sobre este punto pudieran hacerse, la idea dominante en las Cámaras piamontesas, y de muchos distinguidos ingenie-

ros de aquel país; y tal es una de las principales razones que se tuvieron presentes para resolver definitivamente la perforación del túnel de Mont-Cenis.

Parte histórica del sistema de ejecución.

Cuando de problemas tan difíciles se trata, no se llega de una vez y sin algunas tentativas al resultado, y así ha sucedido en el caso presente: se propusieron en efecto diferentes sistemas mas ó menos completos, mas ó menos ingeniosos; pero entre todos solo merece recordarse el presentado por Mr. Maus.

Este distinguido ingeniero propuso la construcción de una galería de 12.250 metros entre Modane y Bardoneche que pasaba á 1.600 metros bajo el puerto de Fréjus; la boca del túnel en Bardoneche se fijaba á 1.363 metros sobre el nivel del mar, y á 1.150 metros el extremo de la galería por la parte de Modane, resultando, pues, una pendiente de $\frac{1.363-1.150}{12.250} \times 100 = 1,74$ por 100 para la rasante del túnel.

Los trabajos, según el proyecto, debían comenzar por las dos estremidades, y á fin de acelerar la apertura del subterráneo, había ideado el autor una máquina para dividir la piedra por medio de la percusión en hiladas horizontales, practicando al efecto una série de rozas á diferentes alturas, y destacando después con el auxilio de grandes cuñas los bloques de piedra que ya habrían quedado adheridos solo por una cara al fondo de la galería.

El sistema propuesto por Mr. Maus comprendía pues tres partes principales.

1.^a *El aparato móvil ó sea el útil.* Debía este avanzar á medida que fuese penetrando la galería en la montaña, y estaba destinado á ejecutar, por el procedimiento que acabamos de exponer, el trabajo de perforación.

2.^a *La parte fija ó el motor.* Se establecía fuera del túnel y estaba formado de varias ruedas hidráulicas puestas en movimiento por algunas caídas de agua.

5.^a *El mecanismo de trasmision del motor al operador.*

Consistia en un sistema de cuerdas y poleas análogo al del plano inclinado de Lieja, con las modificaciones no obstante que las circunstancias de la localidad y el nuevo uso á que se destinaba hacian necesarias.

Este mecanismo fué examinado por personas entendidas en la materia y mereció por el pronto una aprobacion completa; mas posteriormente surgieron algunas dificultades, y ante ellas se detuvo el Parlamento. No pudo, pues, llevarse á cabo el proyecto de Mr. Mauss, proyecto muy ingenioso sin duda alguna y digno del nombre de su autor, pero que sin embargo ofrecia una grave dificultad: no presentando el suelo del túnel mas que una sola pendiente era imposible, ó por lo menos en extremo difícil, el desagüe de la parte superior.

Desechado este sistema, no por eso se renunció á ejecutar la gran obra de la perforacion de los Alpes, y bien puede decirse que se ha presentado anualmente este proyecto á las Cámaras piemontesas, hasta que al fin los ingenieros Sommeiller, Grandis y Grattoni, despues de estudiar detenidamente el asunto, propusieron un nuevo método que mereció la superior aprobacion, y con arreglo al cual se procede hoy á la apertura del túnel.

Grandes dificultades ofrece este trabajo y no falta por lo tanto quien, aun hoy mismo, duda que el éxito corone los esfuerzos de los ingenieros italianos: á fin, pues, de dar una idea tan completa como sea posible de los obstáculos que á la realizacion de la obra se oponen, indicaremos ante todo algunos de ellos, dejando para mas adelante el exámen detallado de los que en nuestro concepto son mas dignos de estudio y consideracion.

Dificultades que ofrece la ejecucion del túnel.

Todas ellas pueden reducirse en último análisis á los cinco puntos siguientes:

- 1.º Alineaciones.
- 2.º Nivelacion.
- 3.º Desagüe de las filtraciones.
- 4.º Ventilacion.
- 5.º Tiempo necesario para la terminacion de la obra.

Examinemos cada uno de ellos separadamente.

1.º *Alineaciones.* Hay una circunstancia que dificulta en extremo el establecimiento de las alineaciones, y es esta, la falta de pozos que de distancia en distancia den puntos de comprobacion, y reduzcan por lo tanto los errores máximos á los que en cada una de estas distancias parciales puedan cometerse. Es, pues, indispensable trazar, desde las dos bocas, alineaciones de mas de 6.000 metros cada una, que en el centro del túnel se encuentren y coincidan, y esta operacion es en efecto, ya que no imposible, como algunos han creído, difícil y delicada al menos; y aun mas difícil si se tiene en cuenta que lo escabroso del terreno hace imposible el establecimiento de las alineaciones en la parte superior del suelo. (Véase el Apéndice, núm. 1.)

Segun las esplicaciones que verbalmente se nos dieron, pues fué imposible poner á nuestra disposicion documento alguno relativo á este punto, un sencillísimo cálculo trigonométrico, y un cuidado y esmero esquisitos en las operaciones han resuelto, á lo que es de esperar satisfactoriamente, el problema, el cual por otra parte solo buenos instrumentos y operadores hábiles exigia.

Las figuras 1, 2, 3 indican varios métodos que pueden seguirse y de los cuales, segun parece, el segundo es el que se ha empleado para establecer las alineaciones del túnel.

Primer método. Supongamos (fig. 1.º) que se quiere establecer la alineacion AB sin dirigirse directamente de uno á otro punto. Si partimos del punto A y formamos en el terreno un polígono AB' C' D' E' F' B que termine en el segundo punto B, cuidando de medir sus ángulos B', C', D', E', F', así como todos los lados, fácil nos será calcular los ángulos $\alpha = A'' A B'$ y $\beta = B'' B F'$ que las dos alineaciones A A'', B B'' han de formar con los dos últimos lados AB', BF', para que dichas alineacio-

nes coincidan exactamente con la línea A B. En efecto, en el triángulo $AB'C'$, del cual conocemos los dos lados AB' y $B'C'$, y el ángulo comprendido B' , calcularemos el lado AC' y los ángulos $B'C'A$ y $B'A'C'$: en el triángulo $C'AD'$, del cual conocemos el lado AC' y el ángulo $AC'D'$, diferencia de los ángulos $B'C'D'$ y $B'C'A$, calcularemos el lado AD' y los ángulos $D'AC'$ y $AD'C'$; y continuando de este modo el cálculo de los triángulos $AD'E'$, $A'E'F'$ y ABF' , podremos hallar el ángulo $\alpha = B'A'C' + C'AD' + D'AE' + E'AF' + F'AB$ y el ángulo β que resultará inmediatamente del cálculo del último triángulo.

Segundo método. Este procedimiento puede combinarse con el anterior ó con el siguiente, sirviendo por lo tanto de método de comprobación; ó bien puede emplearse exclusivamente para determinar los ángulos α y β . Supongámonos que partiendo de un punto F, (fig. 2.^a) se trazan dos líneas poligonales $FC''B'A$, y $FC'B'B$ que terminen en las dos bocas del túnel A, B, y que para mayor exactitud se vuelva al punto de partida F, cercando los dos circuitos $FC''B''AE''D''F$ y $FC'B'BE'D'F$: es claro que si á cielo abierto y sobre un terreno llano se marca en escala natural la figura formada por los dos polígonos, —partiendo á este fin de un nuevo punto F_1 , (que no está indicado en la figura), con dos alineaciones F_1C_1' , F_1C_1'' que formen con la meridiana ángulos iguales á α y γ , —uniendo los puntos extremos se podrá trazar la alineación AB, y de este modo se medirán sobre el terreno los ángulos α , β que forman las dos alineaciones Aa , Bb con la meridiana ó con los lados AB'' , $B'B'$. Como se vé inmediatamente por lo que acabamos de esponer, este método está reducido á copiar, digámoslo así, en escala natural la figura formada por la alineación del túnel y por los dos polígonos, midiendo despues directamente en el terreno los ángulos α y β . Es claro por otra parte, segun digimos al principio, que puede aplicarse á la figura 2 el cálculo trigonométrico y hallar de este modo directamente dichos ángulos.

Tercer método. Si aun pudiera haber alguna duda sobre la exactitud de los métodos anteriores, nada mas fácil que dar todo el rigor apetecido á dicha investigación: bastaria para ello

partir de una base C D (fig. 3.ª) convenientemente elegida, y formar una red de triángulos que terminasen en las dos bocas del túnel: de este modo y por operaciones bien sencillas, podrían calcularse los ángulos que forman las dos alineaciones Aa, Bb con uno cualquiera de los lados de los triángulos estre-mos ó con la meridiana.

Respecto, pues, á las alineaciones, teniendo en cuenta por una parte la perfeccion de los instrumentos que hoy se construyen, y al propio tiempo la conocida habilidad y la merecida reputacion de los ingenieros que estan al frente de los trabajos, no creemos que deba abrigarse duda ni temor alguno sobre el éxito de dicha operacion.

2.º *Nivelaciones.* Se han fijado con la mayor exactitud las cotas de las dos bocas del túnel por medio de dos nivelaciones, varias veces repetidas, que partiendo de un mismo punto, cuya cota se conocia de antemano, terminaban en los dos estre-mos del subterráneo.

Las precauciones que se han tomado para llevar á cabo esta operacion, y la bondad de los niveles, así como la habilidad de los operadores, infunden la mayor confianza acerca de la exactitud de los resultados. (Véase el Apéndice, núm. 2.)

3.º *Desagüe de las filtraciones.* A fin de proporcionar desagüe á las filtraciones que aparezcan en el curso de los trabajos, se han proyectado dos pendientes para el fondo del túnel; una hácia Bardoneche de 5 por 1.000, y otra hácia Modane de 25 por 1.000; de este modo los filetes de agua que se presenten podrán recogerse en una cuneta de desagüe practicada en el suelo de la galería, y el agua correrá hácia las dos bocas sin entorpecer los trabajos, á menos que no tengan lugar circunstancias extraordinarias que no es fácil prever, pero que hasta el presente no parecen probables. (Apéndice, núm. 3.)

4.º *Ventilacion.* El problema de la ventilacion es uno de los problemas capitales para la apertura del túnel. La gran distancia á que penetra en el interior de la montaña; el ser indispensable para el trabajo un gran número de lámparas constantemente encendidas; la acumulacion de obreros en el fondo del

subterráneo ; y sobre todo la circunstancia de haber necesidad de atacar la roca con pólvora , hacen de todo punto indispensable la renovacion periódica de una gran masa de aire. Es, pues, necesario lanzar al fondo del túnel cierta cantidad de aire puro que alimente la combustion , que sirva para la respiracion, y que se mezcle en proporciones convenientes con los gases que de la voladura de los barrenos resulten. A este fin propuso M. Colladon , distinguido físico de Ginebra , el empleo del aire comprimido ; pero sin indicar ni el modo de comprimirlo , ni la manera de servirse de él. (Apéndice , 4.) Aprovechando esta primera idea y desarrollándola convenientemente , combinaron los ingenieros Grandis , Grattoni y Sommeilleur un sistema de aparatos , que es el que en la actualidad se está preparando, y que bien pronto comenzarán á funcionar ; mas como este punto está íntimamente enlazado con la cuestion de motores, dejaremos su estudio para mas adelante.

5.º *Tiempo necesario para la ejecucion del túnel.* Una de las primeras cuestiones que debian resolverse era la relativa al estudio geológico de las grandes masas que el túnel habia de atravesar. Es sin duda difícil en extremo y casi nos atrevemos á asegurar que punto menos que imposible, leer, si así puede decirse , en las entrañas de la tierra á un kilómetro de profundidad y á seis kilómetros de distancia horizontal ; sin embargo , la ciencia geológica dá , ya que no *resultados positivos é indicaciones seguras para nuestro objeto*, algunos datos que siempre importa conocer.

Muchos geólogos , entre los cuales se encuentra Mr. Beaumont, el sabio Angel Sismonda y el señor de Collegno, han estudiado la gran masa de rocas en que ha de abrirse el Túnel, y de sus estudios y observaciones se deduce que la montaña del puerto de Frejus , bajo el cual pasa la galería , está formada por un levantamiento del terreno, debido sin duda á una enérgica presion subterránea, y que en virtud de esta circunstancia aparece en el valle del Arc un gran corte geológico , en el cual puede estudiarse la naturaleza de las diversas capas que constituyen el terreno , y que son en su mayor parte calizas

de diversas clases, cuarcitas, arcillas cuarzosas, etc., etc.

De la naturaleza de las rocas que la galería ha de atravesar, y de las circunstancias en que ha de hallarse, nacen, por decirlo así, dos series de dificultades, por las que en último resultado, y aun suponiendo que no fuesen tales que hicieran imposible la prosecucion de los trabajos, resultaria siempre ser necesario un número considerable de años para terminar la obra. Y en efecto, siendo imposible practicar pozos que multiplicando los puntos de ataque reduzcan considerablemente el tiempo preciso para la ejecucion de la galería, pues como hemos indicado al tratar de las alineaciones, la longitud de dichos pozos seria de 800, 1.000 y 1.200 metros; no quedando por consiguiente mas recurso que atacar el túnel por las dos bocas; y por último, teniendo que atravesar constantemente calizas y cuarcitas, es decir, rocas en extremo duras y resistentes; la perforacion habia de ser lenta y difícil, á menos que no se acudiera á métodos hasta hoy no empleados ni conocidos, y que por su escelencia y perfeccion permitieran acelerar notablemente los trabajos. Empleando los procedimientos ordinarios, y teniendo en cuenta la resistencia de las rocas, solo podria avanzar el túnel en 24 koras 0^m,5 por cada uno de los puntos de ataque, ó sea un metro por dia; y aun esto organizando los trabajos de suerte que ni de dia ni de noche cesara la perforacion. Resultan, pues, en esta hipótesis 12.500 dias, ó sean 34 años próximamente para la apertura del túnel, aun sin contar con obstáculos imprevistos, que no es imposible se presenten. Ante esta dificultad el dilema era terminante: ó inventar algun sistema, algun método especial para la perforacion del túnel; algo que saliera de lo comun y de lo ordinario; mas enérgico en cuanto á fuerza, y mas veloz en cuanto á tiempo que todo lo que hasta aqui se conocia; ó renunciar por completo á una obra que, suponiendo que marchase felizmente hácia su término, solo allá á fines del siglo podria terminarse. Mas este invento existe: su ensayo en gran escala dentro de poco comenzará, ó quizá haya comenzado cuando estas líneas vean la luz pública; y si un éxito feliz corona los esfuerzos y los traba-

jos de los inventores, bien puede decirse que los Ingenieros Sommeilleur, Grandis y Grattoni habrán hecho dar un gran paso á la ciencia de la construccion, en lo que á la apertura de túneles y subterráneos se refiere.

Aceptando la pólvora como medio de atacar la roca, y considerando los Ingenieros piamonteses que el elemento que mas influia en el tiempo necesario para la preparacion de los barrenos era el empleado en abrirlos, y que las demas operaciones de carga, voladura, etc., solo representaban una fraccion mínima del tiempo total, plantearon y resolvieron los dos problemas siguientes: 1.º, buscar un mecanismo rápido y seguro para abrir en la roca los agujeros de los barrenos, el cual mecanismo reemplace al trabajo á mano de los obreros, siempre lento y pesado. 2.º, buscar un motor que ponga en movimiento este mecanismo, que ademas pueda establecerse fuera de la galería para no embarazar las faenas, y cuyo efecto se transmita al punto de ataque fácilmente.

La resolucion de estos dos problemas se funda en dos aparatos que mas adelante describirémos, y que han recibido los nombres de *compresor hidráulico* y *perforador*. Al mismo tiempo han procurado los inventores poner en armonía la solucion de ambas cuestiones con el problema de la ventilacion, y á este fin eligieron como motor el aire comprimido, desechando el vapor que ni hubiera podido llevarse á grandes distancias por medio de tubos sin que se condensase, ni dado caso que fuera posible su preparacion en el interior del túnel podria emplearse por el insufrible calor que desarrollaria. (Apéndice, núm. 5.)

Así, pues, el compresor hidráulico condensa grandes cantidades de aire que lanzadas al fondo de la galería se utilizan, del modo que mas adelante explicarémos, ya como fuerza motriz, ya para la ventilacion.

Hasta aquí nos hemos referido á la dificultad relativa al tiempo, pero íntimamente enlazadas con ella surgen otras muchas, ó cuando menos, asaltan al ánimo graves temores sobre los obstáculos que pueden presentarse en el interior de la montaña; ¿no podrán encontrarse en efecto grandes cavernas sin

fondo que imposibiliten la continuacion de la obra; depósitos interiores de agua, que se rompan repentinamente é inunden la galería; estensos y profundos lagos que interrumpen el paso; rocas en descomposicion que se desplomen? ¿Y todo esto y quizá algo mas que no es fácil predecir, no ocasionará dificultades inmensas, y quién sabe si hasta hará imposible la ejecucion de los trabajos?

Cuando se trata de una galería que ha de practicarse á 1.600 metros bajo la cresta de una montaña y que ha de recorrerla en una estension de mas de dos leguas, todo esto por desgracia es posible; que no es fácil adivinar lo que podrá suceder en el interior de los Alpes, y solo conjeturas mas ó menos probables pueden hacerse. Y sin embargo, cuando de obras de tal importancia se trata, no solo por lo que significa la obra en sí misma, sino por las aplicaciones que del nuevo sistema podrán hacerse á otros casos análogos, algo hay que dar al genio, y algo hay tambien que arriesgar en la empresa en cambio de las grandes ventajas que racionalmente deben esperarse. Bien sabemos que generalmente se juzga de las cosas por el éxito, y que se aplaude al que triunfa y se menosprecia al que es vencido; mas ello es lo cierto que cuando una obra como la de la perforacion de los Alpes se intenta y con tanta inteligencia se inicia, la reputacion de los Ingenieros Directores queda siempre muy alta, sean cuales fueren los resultados.

Si por una parte debe considerarse que la imaginacion crea obstáculos y quizá abulta exageradamente los que existen, como suele abultar todo lo desconocido; debe por otra parte notarse tambien que la galería de Mont-Cénis solo es, comparada con el volúmen total de la montaña, una fraccion mínima, un filete infinitamente estrecho que de una á otra vertiente, y á una gran distancia de la cumbre la atraviesa; y que no es por lo tanto probable, —á menos que no se suponga que son los Alpes una especie de esponja en que el volúmen aparente es la décima ó la centésima parte del verdadero, — que no es probable, repetimos, aunque es posible, que se encuentren esas grandes bolsas de agua, esos estensos lagos, esas cavidades enormes á

las cuales precisamente ha de ir á dar el túnel, y de las que es imposible, en sentir de algunos, que pueda pasar. Quizá se encuentren de trecho en trecho pequeñas cavernas; pero en tal caso, como dice el Sr. Menabrea en su discurso sobre el paso de los Alpes, « tanto mejor, eso nos ahorramos de escavacion; » tal vez se presenten, ya grandes filtraciones, ya rocas durísimas, ya por el contrario masas blandas que amenacen desplomarse; mas obstáculos son estos que ha vencido en mil ocasiones el arte, y que es de esperar venza tambien en la ocasion presente.

Pero dejando aparte este punto, del cual sin embargo mucho mas pudiera decirse, aun se ha señalado otra dificultad para la perforacion, y es esta la elevada temperatura que reinará en el interior de la galería. Calculando por término medio de muchas observaciones que la temperatura aumenta un grado por cada treinta metros de profundidad, y teniendo en cuenta que el túnel se halla á 1.600 metros bajo la cima de la montaña, resulta una temperatura de $\frac{1.600}{30} = 50$ grados próximamente, para el centro del túnel; y aunque se trabaja en algunas minas con temperaturas mas elevadas, es la verdad que en tales condiciones los obreros trabajan fatigosa y difícilmente. Por fortuna hay una causa poderosa de enfriamiento en el fondo del túnel, y esta es la repentina dilatacion del aire comprimido que se lanza, ya para purificar el ambiente, ya como fuerza motriz, y que absorbiendo una gran cantidad de calórico, produce un rápido descenso en la temperatura. Es tan enérgica esta causa, que en las esperiencias emprendidas en grande escala en Coscia para juzgar del efecto de los nuevos aparatos, el aire comprimido al salir de los perforadores y dilatarse, helaba, por el rápido descenso de temperatura, el agua con que estaba en contacto.

A mas de esto, los 50° de temperatura son un límite superior que solo podrá tener lugar en el centro del subterráneo, y de ninguna manera en los primeros kilómetros inmediatos á las bocas ó puntos de ataque.

Así, pues, en resumen, el aire comprimido tiene aun triple objeto; *se utiliza como fuerza motriz, se emplea como medio*

energico de ventilación, y por último, reduce la temperatura á limites convenientes.

Procuremos ahora, y antes de entrar en mas detalles, dar una idea general del sistema de organización de los trabajos, así como de los elementos principales de la obra.

Idea general del sistema seguido para la perforacion del túnel.

Elegidos los dos puntos en que han de establecerse las dos bocas del túnel, y determinada la proyeccion horizontal de su eje, cuestiones en que no entraremos por ser completamente ajenas á nuestro objeto, cumplia ante todo fijar las dimensiones y la forma de la seccion trasversal, y como principal elemento de esta el ancho en la parte inferior, ó sea en el suelo de la galería.

Aunque las líneas de empalmé con Susa y con Modane no son mas que para una vía, el túnel debe necesariamente construirse para dos: de otro modo, la menor detencion, el menor accidente, podrian traer consigo sensibles consecuencias; y á mas de esto es necesario que el humo tenga espacio en que estenderse, y no sea arrastrado por el tren y arrojado sobre los coches. Así pues varios Ingenieros han juzgado que era indispensable dar á la galería una seccion de 70 metros cuadrados, y de esta hipótesis, como de la única aceptable, parte Mr. Flachat en una obra que ha publicado recientemente, al hacer algunas observaciones sobre el túnel de Mont-Cénis.

La seccion sin embargo, no será uniforme en toda la longitud en razon á que en una de las bocas el eje del túnel presenta una curva de entrada, y que por este motivo ha sido preciso dar en toda la estension de dicha curva mayor ensanche al subterráneo.

Quizá en algunos trozos del túnel sea inútil el revestimiento por la dureza y consistencia de la roca; pero en cambio será preciso revestir otra gran parte, y esto es lo que ha sucedido ya

en el extremo de la galería correspondiente al lado de Bardoneche; mas como la buena piedra de sillería es sumamente escasa en la localidad, ha sido forzoso acudir á un sistema misto, revistiendo el túnel con sillarejos próximamente hasta los arranques, y volteando sobre estos dos muros una bóveda de ladrillo. (Véase el Apéndice, núm. 6.)

Resueltas las diversas cuestiones que acabamos de apuntar ligeramente, pues tienen poca relacion con nuestro principal objeto, debemos indicar cuál es el orden seguido en los trabajos de perforacion. La causa que principalmente se opone á que la obra marche con la rapidez que fuera de desear, es la poca estension que presenta para el trabajo el fondo del túnel; y como en tan corta superficie es imposible colocar á la vez gran número de obreros, por mucha que sea la gente de que se disponga, de aquí que la rapidez de la perforacion quede subordinada y sujeta á la velocidad con que la cuadrilla que ataca el fondo de la galería pueda avanzar.

Hé aquí como se ha tratado de vencer este inconveniente.

Se abrirá, valiéndose de los perforadores y aplicando los nuevos procedimientos inventados al efecto, una pequeña galería de 6 á 8 metros cuadrados de seccion (Apéndice, núm. 6) que siga el eje del túnel, la cual avanzará tres metros por día segun el cálculo hecho por los Ingenieros piamonteses; y de este modo se aumentará en los dos costados la superficie de trabajo, á fin de que nuevas cuadrillas desmonten el resto de la roca y ensanchen el túnel hasta su seccion definitiva, mientras la pequeña galería continúa avanzando y preparando, por decirlo así, nueva superficie de trabajo.

La rapidez de la obra depende pues de la velocidad con que la galería de ataque penetre en la monaña, y como segun el cálculo que acabamos de indicar será esta de tres metros por día, ó sean seis metros contando con los dos puntos de trabajo correspondientes á las dos bocas, resulta que el tiempo necesario para la terminacion del túnel será $\frac{12,500}{6} = 2083$ dias, ó sean próximamente seis años.

A fin de tener grandes cantidades de aire comprimido que

puedan llevarse al fondo de la galería, ya para la ventilación, ya como fuerza motriz, se están disponiendo á cierta distancia de las dos bocas varias calderas de palastro, en las que se inyectarán valiéndose del compresor hidráulico 98.064 metros cúbicos de aire cada 24 horas, reduciéndolos á la sextaparte de su volumen, ó sea á la presión de seis atmósferas. Estas calderas son grandes depósitos de fuerza motriz y de aire respirable que según las necesidades lo exijan se llevará por medio de tubos al fondo de la galería. El pensamiento de los Ingenieros Sommeilleur, Grandis y Grattoni es pues sencillo y natural en el fondo, á la par que grande y valiente, si se nos permite esta palabra, en la forma, tanto por la novedad que ofrece como por la gran escala en que se aplica.

El exámen de la figura 4.^a que representa la planta del túnel en un momento cualquiera de los trabajos, hará comprender mejor lo que acabamos de explicar; pero debemos advertir que tanto esta como las demás figuras y proyecciones que presentamos no están sujetas á escala, pues nos fué imposible copiar plano alguno ni aun tomar las dimensiones principales de la obra; y aparte de algunos datos importantes que con la mayor amabilidad nos proporcionó el general Menábrea, solo á lo que verbalmente se nos dijo y á lo que hemos podido conservar en la memoria, hemos tenido que atenernos para redactar esta noticia.

He aquí la disposición de los trabajos.

- $m n m' n'$. . . Parte ya hecha del túnel.
- $a b a' b'$. . . Pequeña galería de ataque.
- $b b'$. . . Superficie de la roca contra la cual trabajan los perforadores
- A . . . Perforadores.
- ab . . . Superficie de ataque para desmontar la parte $B B'$.
- $a' b'$. . .
- B . . . Prisma que se ha de desmontar para ensanchar
- B' . . . la galería de ataque hasta la dimension $n n'$.
- $M. N.$. . . Revestimiento.
- $M' N'$. . .

- P. } Espacio que ha de ocupar el revestimiento.
P'. }
v. v. v. . . . } Tubos que conducen el aire comprimido á los per-
v' v' v'. . . } foradores.
FF. }
FF. } Vias de servicio. A lo largo de una de ellas corre
FF. } el perforador A.
C. }
C. } Cuneta de desagüe para las filtraciones.

De la descripción que antecede resulta, que el objeto de la galería de ataque *a b a' b'* no es otro que el de preparar una extensa superficie de trabajo *ab, a' b'*, en la cual puedan colocarse un número suficiente de obreros.

Entremos ahora en la descripción detallada de los diferentes aparatos que mas arriba hemos indicado, y que constituyen la parte esencial del sistema empleado para la ejecución de la obra, dividiendo para mayor claridad cuanto vamos á esponer en los dos grupos siguientes:

- 1.º Compresores : tubos de conduccion : obras accesorias.
- 2.º Perforadores.



COMPRESOR HIDRÁULICO.

TUBOS DE CONDUCCION, OBRAS ACCESORIAS.

Compresor hidráulico.

Noticia histórica. Sucede casi siempre que aparece un invento útil ó del que al menos se esperan grandes ventajas, que se disputa acaloradamente sobre la prioridad de la invencion, y que nunca faltan buenas razones en que fundar sus derechos á cada uno de los inventores: esto en efecto ha sucedido con el mecanismo que nos ocupa. Han disputado á los Ingenieros piamonteses el mèrito de la invencion del compresor hidráulico, no solo algun otro Ingeniero italiano, sino el célebre Ingeniero francés Mr. Anatolio de Caligny. En su escrito titulado, «Notice historique et critique sur les machines á compression d'air du Mont-Cenis», se esfuerza en demostrar que el principio de física en que se funda dicho aparato ha sido descubierto por él; y que entre los muchos mecanismos que en su larga carrera científica ha inventado se hallan los que han podido servir de modelo á los Ingenieros piamonteses. Poseído de esta idea, y deseando sostener sus derechos científicos, ya que no otro género de derechos á que, segun dice, renuncia generosamente, hizo reiteradas reclamaciones y hasta acudió á la embajada francesa en Turin para que se le facilitáran todo género de de-



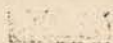
talles y noticias sobre las experiencias relativas á los aparatos de compresion, pretendiendo ejercer, por decirlo así, una especie de tutela ó alta direccion sobre los Ingenieros, y sobre las obras. Sin prejuzgar la cuestion de prioridad, ni mucho menos poner en duda el indisputable mérito de Mr. Caligny, á quien su claro talento, su gran ingenio y su extraordinaria laboriosidad han dado una merecida y envidiable reputacion, es lo cierto, que el principio que sirve de base á los compresores hidráulicos es tan sencillo y tan trivial, si así puede decirse, que bien ha podido ocurrir á los Ingenieros piamonteses, como á él mismo, ó como á otro cualquiera, sin que haya en todo ello, ni copia, ni imitacion.

Mas dejando esto aparte, conviene recordar que cuando se consigna una verdad científica ó una ley de la naturaleza en una obra, y esa obra es leida y estudiada, y el nuevo descubrimiento es de todos conocido, viene á fundirse en la masa general de verdades que son patrimonio y propiedad de todos los hombres, y no de este ó de aquel en particular; y que por lo tanto han podido aprovechar los Ingenieros Grandis, Grattoni y Sommeilleur, aun sin haberla descubierto, la ley física que sirve de base á su mecanismo del modo que han creido mas conveniente, sin que esto confiera á Mr. Caligny derechos de ningun género que justifiquen sus estrañas pretensiones, y más aun, cuando él mismo renuncia á los derechos que las leyes podrian haberle dado si hubiera obtenido privilegio de invencion por cada uno de los aparatos que há mas de 25 años viene inventando, ó por cada una de las leyes físicas que ha descubierto, ó que ha dado nueva forma.

Teoría del compresor. Indicarémos ante todo las partes principales de que se compone el aparato, y véase para la mejor inteligencia de la esplicacion la figura 5:

A A A... Representa un depósito de agua que supondrémos
es de nivel constante.

A B C D... Tubo doblemente encorvado en forma de sifon invertido, y que se une por su parte superior á una caldera ó depósito de aire.



B y C. Son dos llaves ó válvulas: la primera sirve para establecer la comunicacion entre los dos brazos del sifon, y la segunda para dar salida al agua contenida en la rama C D.

a. Válvula que se abre de fuera adentro y que sirve para dar entrada al aire en dicha rama C D.

D. Válvula que se abre girando hacia el interior del depósito E.

E. Caldera ó depósito de aire comprimido. Al comenzar el aparato á funcionar está lleno de agua, cuyo nivel descende hasta M M á medida que se inyecta aire en la caldera.

b b'. Tubo que pone en comunicacion la caldera con un depósito F de nivel constante.

F. Depósito de nivel constante por el cual se mantiene el aire de la caldera E á la misma presion próximamente mientras trabaja el compresor. Esta presion está representada por el peso de una columna de agua cuya altura es la distancia entre los dos niveles *ff* y M M.

Supongamos que el aparato comienza á funcionar y que se halla en las siguientes condiciones: que las llaves B y C estan cerradas; el sifon lleno de agua desde A hasta C; la válvula *a* abierta y el tubo C D lleno de aire; por último que la válvula D está cerrada y la caldera E llena de agua.

Si abrimos la llave B el agua se precipitará en la rama CD en virtud de la diferencia de nivel que existe entre *cc* y A A, comprimirá el aire contenido en dicha rama y cerrará la válvula *a*. La tension del aire en la rama ascendente del sifon aumentará de una manera continua, y oprimirá cada vez con mas fuerza la válvula D, hasta que al fin escediendo la presion que ejerza sobre dicha válvula á la que el agua del depósito produce en virtud de la diferencia de nivel que hay entre *ff* y el punto D, la válvula se abrirá y una cierta cantidad de aire comprimido pasará al depósito E desalojando un volúmen de agua igual al suyo que subirá por el tubo *b b'*.

700 Cuando la fuerza viva de la columna líquida se amortigüe, la válvula D se cerrará por su propio peso, y si en este instante se cierra la llave B y se abre la C, la columna líquida $cc'e'$ saldrá del tubo produciendo en él un vacío; la presión atmosférica abrirá la válvula a , y una masa de aire igual á la que ha penetrado en el depósito E entrará en la rama ascendente del sifon. Así, pues, el aparato se hallará en las mismas condiciones que al principio, y si de nuevo se abre la válvula B y se cierra la C, una nueva escursión comenzará y se recogerá otro nuevo volúmen de aire igual al primero en dicho depósito E. 150 De este modo se almacenará, por decirlo así, en la caldera E un cierto volúmen de aire á una presión representada por la altura h h' .

702 Tal es la sencillísima teoría del compresor, análoga á la de otros muchos aparatos de columna de agua empleados, ya para elevar agua á cierta altura, ya para la ventilación.

703 Antes de concluir este punto debemos hacer algunas observaciones.

704 1.ª *Observacion.* En el movimiento de la columna líquida conviene distinguir dos periodos. *Primero*; desde el instante inicial hasta aquel en que la superficie de la columna líquida llegue á una posición $d d'$ tal que la presión del aire contenido en D $d d'$ sea igual á la correspondiente á la altura $m n$. Si fuera posible que la masa líquida llegase á esta posición sin velocidad adquirida ó sin fuerza viva, el sistema estaria en equilibrio; mas como en todo el trayecto $c d$ la fuerza motriz ha sido superior á la resistente, la masa líquida llega á la posición $d d'$ con una cierta fuerza viva acumulada y pasa por esta razón de dicho punto d . *Segundo*: desde esta posición dd' hasta la posición final cc' . En todo el trayecto dc' la resistencia es superior á la fuerza motriz, y la fuerza viva del sistema disminuye continuamente hasta reducirse á cero.

705 Debe notarse ademas que la inercia del aire y del agua del depósito E, así como los rozamientos, codos y otras resistencias pasivas reducen las dos longitudes $c d$, $d c'$ á límites menores que los indicados anteriormente.

2.^a *Observacion.* Si se supone que la altura $h h'$ es muy grande relativamente á la altura $h' k$ de la caldera, es claro que en todos los instantes del trabajo del compresor puede suponerse que la presion del aire en el depósito E es constante é igual á la que corresponde á dicha altura $h h'$.

3.^a *Observacion.* Hemos supuesto para la esplicacion del aparato que se movian á mano las llaves B y C; pero es evidente que aprovechando una pequeña parte de la fuerza del compresor, puede hacerse que la misma máquina las ponga en movimiento en los instantes oportunos por medio de mecanismos sencillísimos análogos á los empleados en las máquinas del vapor.

4.^a *Observacion.* La superficie del depósito regulador F puede, y para el caso de que se trata debe ser superior á la superficie AA del depósito principal; pero esta diferencia de nivel tiene un límite teórico que no se puede esceder, y al cual tampoco debe nunca llegarse. Véase acerca de la determinacion de este límite la nota II.

Conocida la teoría del compresor hidráulico, pasemos á su aplicacion al caso que nos ocupa, y calculemos á este fin *cuál es el efecto útil del aparato; cual la cantidad de aire necesaria, tanto para el trabajo de los perforadores como para la ventilacion; y examinemos por último, si con las caidas de agua que en Modane y Bardoneche existen puede obtenerse una fuerza motriz suficientemente enérgica.*

Para ello estudiaremos las tres cuestiones siguientes:

1.^a *Cuestion.* Trabajo que es necesario desarrollar para reducir 6 decímetros cúbicos de aire con la presion de una atmósfera á la 6.^a parte de su volúmen, ó sea á un decímetro cúbico.

2.^a *Cuestion.* Trabajo que puede desarrollar el compresor y efecto útil del mismo.

3.^a *Cuestion.* Cantidad de aire necesaria para la perforacion del túnel.

PRIMERA CUESTION; TRABAJO NECESARIO PARA REDUCIR SEIS
DECÍMETROS DE AIRE Á UN DECÍMETRO CÚBICO.

Imaginemos (fig. 6.^a) un cilindro $AB A' B'$ cerrado por uno de sus extremos, y dentro del cual desliza un émbolo CD : supongamos además que el espacio $CD B B'$ está lleno de aire á la presion P . Si el émbolo pasa de la posicion CD á la $C' D'$, el aire que ocupaba el espacio $CD B B'$ ocupará un espacio menor $C' D' B B'$, y para producir este efecto, habrá sido preciso ejercer cierto esfuerzo sobre la varilla del émbolo á todo lo largo del camino CC' ; ó dicho de otro modo, desarrollar cierto trabajo motor igual al trabajo resistente del aire. Ahora bien, si la fuerza que actuaba sobre el émbolo cesa en su accion, el aire comprimido reobrará, y suponiendo que la velocidad del émbolo es infinitamente pequeña, le empujará hasta su posicion primitiva, desarrollando un trabajo motor igual teóricamente al que se empleó para comprimirlo, y que representará por lo tanto el trabajo acumulado en el volúmen $C' D' B B'$ de aire comprimido. En resúmen, para apreciar el trabajo acumulado en un cierto volúmen de aire comprimido, basta calcular cual es el trabajo necesario para reducirlo á dicho volúmen; y por consiguiente si queremos calcular el trabajo acumulado en cada decímetro de aire á la presion de 6 atmósferas, basta que calculemos el trabajo necesario para reducir 6 decímetros cúbicos de aire, con la presion atmosférica, á un decímetro cúbico á la presion de 6 atmósferas.

Admitamos para facilitar el cálculo las notaciones siguientes:

- ω Area del émbolo, ó sea de la seccion del cilindro.
 - CD Posicion inicial del émbolo.
 - $C' D'$ Posicion final.
 - cd Posicion intermedia.
 - $c' d'$ Posicion infinitamente próxima á la anterior.
 - L
 - L'
 - l
 - $l - cc' = l - dl$
- } Distancias de estas cuatro posiciones al plano BX .

- $c c'$ Es la diferencial de l y la representamos por $d l$.
 V Volúmen de $C D B B'$.
 V' Volúmen de $C'D'B B'$.
 v Volúmen de $c d B B'$.
 P Presion inicial del aire encerrado en el espacio $C D B B'$.
 p Presion correspondiente al volúmen $c d B B'$.
 T Trabajo acumulado en el volúmen V' .

En virtud del principio de Mariotte, y suponiendo invariable la temperatura, tendremos

$$\frac{p}{P} = \frac{v}{V} \text{ ó bien } p v = P V;$$

de donde resulta para la presion por unidad de superficie en un instante cualquiera, correspondiente á la posicion cd del émbolo,

$$p = \frac{P V}{v}.$$

La presion sobre toda la superficie del émbolo será

$$p \omega = \frac{P V}{v} \omega;$$

y el trabajo resistente del aire al pasar el émbolo de la posicion $c d$ á la $c' d'$

$$p \omega d l = \frac{P V}{v} \omega d l.$$

El trabajo resistente, ó su igual el trabajo motor, ó por último el trabajo acumulado sobre el volúmen V' , será, prescindiendo del signo,

$$T = \int \frac{P V}{v} \omega d l,$$

tomando la integral desde la posicion $C D$ hasta la $C'D'$.

Finalmente, poniendo en vez de v su valor ωl , simplificando é integrando, tendremos:

$$T = \int \frac{P V}{\omega l} \omega d l = P V \int_{L'}^L \frac{d l}{l} = P V \log. \frac{L}{L'}.$$

ó tomando logaritmos ordinarios,

$$T = P V \log. \frac{L}{L'} \times \text{módulo.} \quad (1)$$

Apliquemos esta fórmula al cálculo del trabajo acumulado

en un decímetro cúbico á la presión de seis atmósferas.

Tendremos en este caso

$$V = 6 \text{ decímetros cúbicos} = 0,006;$$

$$P = 4 \text{ atmósfera} = 10,330 \text{ kilogramos por metro cuadrado};$$

$$V' = 1 \text{ decímetro cúbico} = 0,001;$$

$$\text{módulo} = 2,303.$$

Sustituyendo en la fórmula (1), y observando que $\frac{L}{L'} = \frac{V}{V'} = 6$, obtendremos por último:

$$T = 0,006 \times 10,330 \times 2,303 \times \log. 6 = 111 \text{ kilográmetros} = 1,48.$$

Resulta del cálculo precedente, que cada decímetro cúbico de aire á la presión de seis atmósferas, contenido en el espacio E, puede por su expansión ejercer un trabajo equivalente á 111 kilográmetros, ó sea caballo y medio de vapor próximamente; y que por lo tanto el compresor hidráulico ha trasformado el trabajo de la caída de agua en otro trabajo mecánico, condensado, por decirlo así, en la caldera E. Este trabajo acumulado puede emplearse segun convenga, ya como motor para los perforadores, ya para:

tando una pérdida de la mitad ó de las tres cuartas partes del total. Mas aun prescindiendo de estas consideraciones, es evidente que emplear una fuerza cualquiera, una caída de agua por ejemplo, en comprimir aire, para que este aire comprimido obre despues como motor, es dar un rodeo, ó introducir sistemas intermedios de trasmision que han de ocasionar una pérdida del efecto total, y cuyo uso nunca estará justificado, á menos que, como aquí sucede, el motor primitivo no pueda directamente ejecutar el trabajo útil por la naturaleza y circunstancias del problema.

En efecto, la imposibilidad de situar el motor en el interior de la galería, la dificultad de transmitir su accion por cuerdas y poleas desde la parte exterior á distancias de 2, 3, y hasta 6 kilómetros, como en el sistema de Mr. Mauss se proyectaba, y sobre todo la circunstancia de ser indispensable una gran masa de aire puro para la ventilacion, hacen ventajoso el empleo del aire comprimido en el caso presente, en que mas bien que como fuerza motriz, se necesita y se utiliza para purificar la atmósfera.

Cuando calculemos cuál es el volúmen de aire que á cada uno de estos dos objetos corresponde, verémos comprobada esta verdad, y podremos apreciar mejor las ventajas del compresor hidráulico, que sin alcanzar ese grado de perfeccion que algunos le atribuyen, es sin duda uno de los mejores entre todos los sistemas que se han propuesto para la ejecucion del túnel.

SEGUNDA CUESTION: CÁLCULO DEL EFECTO ÚTIL DEL COMPRESOR.

Antes de aceptar el sistema propuesto por los Ingenieros Sommeilleur, Grandis y Grattoni, el gobierno piamontés nombró una comision que examinase los nuevos aparatos, para que sometiéndolos á esperimentos repetidos, pudiese apreciar sus ventajas y sus inconvenientes, y de este modo se procediese en adelante sobre un dato cierto y positivo.

El resultado de estas esperiencias fué en extremo satisfactorio: la máquina, segun dice uno de los miembros de la comi-

sion, «marchaba con una regularidad perfecta, debida á su gran sencillez y á la armonía de sus diferentes elementos, y superaba, por su bondad intrínseca y por su efecto útil, á cuanto respecto á la compresion del aire se habia hecho en la industria anteriormente.»

Entremos ahora en algunos detalles respecto al cálculo de dicho efecto útil.

Segun los datos de la comision, en 55 golpes ú oscilaciones del compresor se gastaban 25.478 litros de agua cayendo de 23^m,95 de altura, y se obtenian en el depósito E (fig. 5) 2.682,86 litros de aire á seis atmósferas: así, pues, el trabajo motor de la caída en dicho periodo es igual á

$$25.478 \times 23^m,95 = 562.298 \text{ kilográmetros.}$$

Por otra parte, como cada decímetro cúbico de aire comprimido á seis atmósferas puede desarrollar teóricamente un trabajo igual á 111 kilográmetros, se deduce que los 2.682,86 litros de aire comprimido representan un trabajo acumulado en la caldera E igual á

$$2.682,86 \times 111, \text{ ó bien } 297.797 \text{ kilográmetros.}$$

Resulta, pues, que con 562.298 kilográmetros se han acumulado 297.797 kilográmetros, y que por lo tanto el coeficiente práctico de efecto útil, ó sea la relacion entre el trabajo consumido y el acumulado, es igual á

$$\frac{297.797}{562.298}; \text{ ó bien, } \textit{coeficiente de efecto útil} = 0,53.$$

Debemos advertir, sin embargo, que en otras experiencias los resultados no han sido tan ventajosos, y que debe tomarse por este motivo un coeficiente algo inferior á 0,53: la comision fija este nuevo valor en 0,50. (Véase el Apéndice, núm. 6.)

Antes de pasar adelante debemos hacer sobre este punto dos observaciones.

1.^a *Observacion.* Mr. Minotto, Sub-director de Telégrafos eléctricos en Cerdeña, ha publicado un juicio critico del sistema seguido para la perforacion del túnel, y en dicho trabajo, al examinar el punto relativo al compresor hidráulico, sostiene que el coeficiente de efecto útil, arriba indicado, es algo superior al verdadero por no haber tenido en cuenta 257,5 litros, que al fin

de la operacion quedaron en la caldera E, procedentes del depósito F situado á 51^m,5 sobre el nivel M M. Estos 237,5 litros gastados ademas de los 23.478 del depósito A, y que han caido de 51^m,5 de altura, representan, dice Mr. Minotto, un trabajo motor consumido igual á

$237,5 \times 51,5 = 12.231,25$ kilográmetros, cantidad que debe sumarse con los 562.298 kilográmetros anteriormente calculados, para apreciar la fuerza motriz total.

El coeficiente de efecto útil será en esta nueva hipótesis $\frac{239.797}{574.529} = 0,518$.

Aunque la diferencia entre uno y otro resultado es pequeña, debe notarse sin embargo, para desvanecer todo género de duda, que la observacion de Mr. Minotto no tiene la fuerza que á primera vista pudiera creerse. En efecto, estos 237,5 litros no constituyen un verdadero gasto de fuerza motriz, ni se consumen constantemente por cada 2.682,86 litros acumulados en la caldera: puede gastarse este volúmen de aire, volverse á llenar el depósito, y repetirse esta operacion dos, tres, y hasta cien veces, y al cabo de estas cien operaciones, es decir, despues de haber comprimido 268.286 litros, el volúmen de agua en el depósito E no excederia del volúmen primitivo 237,5 litros, pérdida constante que se reparte en un número de litros cada vez mayor: y se comprende desde luego que así debe ser, porque el agua del depósito F no hace otro oficio que el de una verdadera válvula hidráulica cargada con una presion de 51^m,5 de agua.

El gasto que por este concepto se origine dependerá tan solo de las filtraciones, evaporaciones, interrupciones en el trabajo del compresor, y será insignificante en comparacion del total.

2.^a Observacion. Segun indica Mr. Minotto se midieron los 2.682,86 litros acumulados en el depósito, despues de haberse verificado la compresion; pero como esta dá lugar á un exceso de temperatura sobre la del ambiente de mas de 22°, resulta que se ha medido dicho volúmen á una temperatura muy elevada, y que se ha calculado por lo tanto un volúmen mayor que el correspondiente á la temperatura de la atmósfera.

La fórmula $V = V' (1 + \alpha 22)$, en la cual V representa el volumen 2.682,86 medido directamente, V' el volumen á la temperatura ordinaria, y α el coeficiente de dilatacion, dá el volumen reducido V' : tendremos pues,

$$V' = \frac{V}{1 + \alpha 22} = \frac{2.682,86}{1 + 22 \times 0,00366} = 2.484,13.$$

En esta nueva hipótesis el trabajo acumulado solo seria $2.484,13 \times 111 = 275.738,^{k.m} 43$, y el coeficiente de efecto útil $\frac{275.738}{562.298} = 0,49$.

Este coeficiente aun resultaria menor, si en vez de suponer el aumento de temperatura de 22°, hubiéramos tomado una cifra mas elevada, como lo fué en algunas esperiencias, segun se deduce de las esplicaciones dadas por la comision.

Sin embargo, hay una circunstancia que modifica este resultado, y es esta, que si bien despues de varias escursiones de la columna líquida la temperatura se eleva, la nueva temperatura queda próximamente constante, y por lo tanto, debe tenerse en cuenta al calcular la tension del gas, como representando dicho aumento de temperatura cierta cantidad de trabajo utilizable: con esta nueva correccion el coeficiente de efecto útil resulta próximamente igual al que mas arriba hemos calculado. (Véase el Apéndice, núm. 6.)

Estas variaciones de temperatura, así como las que experimente el aire al pasar desde las calderas á las bocas del túnel, atravesando una atmósfera que podrá estar á 10 y 12 grados bajo cero, para penetrar despues en la galeria donde quizá halle temperaturas de 40°, son ciertamente dignas de tenerse en cuenta al hacer un estudio profundo de la marcha y variaciones de la tension del aire en los tubos; pero no deben influir en el coeficiente de efecto útil que estamos calculando, el cual mide tan solo la bondad mecánica, por decirlo así, del aparato.

A fin de apreciar debidamente las condiciones de este, debemos todavía detenernos un tanto en el estudio de las circunstancias en que la compresion del aire tiene lugar.

Observaciones generales sobre el compresor hidráulico.

Hemos supuesto hasta aquí, que la compresion del aire en el aparato de la fig. 5.^a se verifica del mismo modo que en el cilindro de la fig. 6.^a, lo cual dista mucho de ser exacto. En este último caso el aire queda siempre dentro del mismo cilindro, y prescindiendo del trabajo que se consume en vencer la inercia de su masa, ó en comunicar una pequeña fuerza viva á sus moléculas, el cálculo que hemos hecho es absolutamente riguroso; mas si pasamos ahora al compresor hidráulico, deberémos distinguir dos momentos en la compresion. Mientras la tension del aire en la rama CD sea inferior á 6 atmósferas, que es la tension del aire contenido en el depósito E, la válvula C permanecerá cerrada, y habrá igualdad absoluta entre las condiciones de compresion de dicha masa de aire de la rama CD, y el caso de la fig. 6.^a; pero desde el momento en que la tension en la rama ascendente del sifon es superior á 6 atmósferas, se establece una corriente de aire desde dicha rama hácia el depósito E, y por lo tanto, cada decímetro cúbico de aire que obtengamos en el interior de dicho depósito, supone un trabajo motor igual á 111 kilográmetros,—que es el necesario para la compresion,—y ademas otro trabajo mecánico, del cual hasta ahora nada hemos dicho, y que será sin embargo necesario para lanzar dicho decímetro cúbico al interior del depósito. (Apéndice, núm. 7.)

Calculemos este segundo elemento del trabajo motor, gastado en la acumulacion de aire en la caldera.

Seria largo, aunque no muy difícil, apreciar dicho elemento con toda exactitud, y por este motivo indicaremos tan solo un método aproximado, aunque suficiente, á nuestro entender, para el objeto que nos proponemos.

Cuando la presion en la rama CD es superior á 6 atmósferas la válvula D se abre, y un volúmen infinitamente pequeño de aire pasa del tubo á la caldera; este aumento en la masa de aire del depósito E produce asimismo un aumento infinitamente pequeño de presion, y como la carga del depósito F sobre la superficie MM solo es de seis atmósferas, la masa de aire re-

obra sobre el líquido, y arroja por el tubo bb' un volumen de agua, igual á dicho volumen de aire.

El trabajo motor necesario para producir este efecto se compondrá de dos partes: 1.^a, trabajo empleado en vencer la inercia del aire contenido en la rama CD y en la caldera, ó sea en comunicar á sus moléculas una pequeña cantidad de fuerza viva. 2.^a, trabajo empleado en poner en movimiento la columna líquida bb' . El primero de estos efectos es insignificante y puede despreciarse; el segundo es el único que tendremos en cuenta y trataremos de calcular. Así, pues, consideraremos al aire como un medio de trasmision, ó como un resorte, y despreciaremos su masa, con lo que no nos separaremos mucho de la verdad.

Esta hipótesis conduce naturalmente á descomponer un periodo cualquiera de trabajo en instantes sumamente pequeños, y á suponer que en cada uno de estos instantes un decímetro cúbico de aire pasa del tubo al depósito, y un decímetro cúbico de agua pasa del depósito al tubo bb' : aun cuando este efecto, que hemos supuesto que se verifica por oscilaciones periódicas y discontinuas, se verificará realmente por la ley de continuidad, y aunque el aumento de presión no se transmitirá instantáneamente del punto D hasta la superficie MM , así como tampoco coincidirán los movimientos de las dos masas infinitamente pequeñas de aire y de agua, el resultado á que lleguemos será tan exacto como para las esplicaciones prácticas pueda desearse.

Supongamos que sea ω la sección del tubo bb' (fig. 7.^a) y representemos para abreviar el razonamiento, por V el volumen de un litro de agua: todos los puntos de la columna líquida bb' deben recorrer un espacio $cc' = dd' = l$, tal que el volumen de agua $dd'e'$ que entre en la parte inferior del tubo sea igual á $V =$ un litro.

Tendremos, pues, para determinar la longitud l , ó sea el camino recorrido por la columna líquida bb' , la ecuacion

$$V = \omega l, \quad \text{y de aquí deduciremos } l = \frac{V}{\omega}.$$

El trabajo necesario para elevar la columna líquida á la altura l será: *peso de la columna* $bb' \times l = \pi \omega L \frac{V}{\omega} = \pi L V$, representando por π el peso de la unidad de volúmen, y por L la distancia entre los dos niveles ff y MM .

Sustituyendo en vez de π , L y V sus valores $\pi = 1.000$ kilogramos, $L = 51,^m5$, $V = 0,001$, tendremos $T = 51,^k5$: resultado que hubiéramos podido obtener directamente.

Así, pues, para obtener en el depósito un litro de aire comprimido se necesita teóricamente un trabajo igual á

$$444 + 51,5 = 495,5 \text{ kilográmetros.}$$

Debemos ahora, para apreciar la pérdida de trabajo motor que origina el compresor hidráulico, comparar este resultado con el que se deduce de la experiencia. Segun los datos que indicamos anteriormente, se necesitan 562,298 kilográmetros para obtener 2.683 litros de aire comprimido, lo que dá para un litro la cantidad

$$\frac{562,298}{2,683} = 209,^k8.$$

Veamos como puede esplicarse esta diferencia entre el resultado teórico que es « 463^{km} por litro, » y el resultado práctico ó sean 210^{km}, para la compresion del mismo volúmen.

Esta diferencia de 47 kilográmetros depende de varias causas que examinaremos separadamente.

1.° Al calcular la cantidad de trabajo motor necesario para la compresion de un litro, hemos prescindido completamente de todas las resistencias pasivas, á saber: rozamientos, pérdidas debidas á los codos, estrechamiento por llaves y válvulas, trabajo empleado en vencer la inercia de las masas, (es decir, trabajo convertido en fuerza viva y destruido inútilmente al terminar la oscilacion, por choques ó reacciones), y todas estas causas, difíciles de apreciar, deben estar, sin embargo, representadas por un cierto sumando en los 47 kilográmetros anteriores.

2.° Hay una causa que ha influido notablemente en esta pérdida de fuerza motriz, y que es tanto mas digna de notarse,

cuanto es mas fácil, ya que no corregirla completamente, por lo menos reducirla á menores proporciones. Una parte del aire comprimido en la rama CD quedaba en el sifon al terminar la oscilacion ascendente, sin pasar por lo tanto al depósito E, y al abrirse la llave C y salir el agua contenida en el tubo, recobraba por expansion su volúmen primitivo: de donde se deduce que todo el trabajo empleado en la compresion de esta masa de aire era completamente perdido para el efecto útil. Segun resulta del informe de la comision esta pérdida puede valuarse en 8 por 100, ó sea de una manera aproximada en 16 kilográmetros.

3.° Por último, la longitud del tubo horizontal del sifon sometido á las esperiencias, era muy pequeña relativamente á las dimensiones generales del aparato, y sabido es, por el estudio del ariete hidráulico y por los trabajos de Mr. Caligny, que cuando se trata de aprovechar la fuerza viva de una columna oscilante, conviene aumentar la longitud horizontal del sifon.

Mr. Caligny, en el folleto que hemos citado anteriormente, combate la disposicion del compresor hidráulico, fundándose en que se dá salida á la columna líquida C D al terminar la oscilacion ascendente, sin aprovechar dicha masa de agua para producir un nuevo efecto útil; pero esta observacion pierde una gran parte de su fuerza, si se tienen en cuenta las dimensiones y la disposicion de los aparatos que actualmente se estan montando en Bardoneche. (Véase el Apéndice, núm. 7.)

Resumiendo lo que llevamos dicho resulta, que para comprimir seis litros de aire, hasta reducirlos á la sexta parte de su volúmen, se necesitan 210 kilográmetros, que pueden distribuirse del modo siguiente:

111 km. para la compresion.

52 km. para arrojar el aire comprimido al depósito.

16 km. por el aire comprimido inútilmente.

31 km. por resistencias pasivas, inercia de las masas, imperfecciones del aparato, etc., etc.

Total 210 kilográmetros.

El coeficiente de efecto útil es como digimos al comenzar el exámen de este punto,

$$\frac{111}{210} = 0,53;$$

sin embargo, es probable que, con las modificaciones que la comision encargada de examinar el aparato indica, se mejore este, y se logre un coeficiente de efecto útil igual á 0,60.

Mas no debe perderse de vista que este coeficiente de efecto útil se refiere únicamente al compresor hidráulico, y que al aplicar el aire contenido en las calderas, ya como fuerza motriz, ya para ventilar la galería, solo se aprovechará una fraccion del trabajo acumulado, que será, cuando mas, equivalente á las dos terceras partes del total; de donde se deduce que el verdadero efecto útil será $0,6 \times 0,6 = 0,36$ del trabajo motor que representa la caida de agua.

Fácil nos seria ahora completar el estudio del compresor presentando la teoría matemática de su movimiento y de su efecto útil; pero á fin de no interrumpir la exposicion general del sistema, ni la descripcion de los aparatos empleados en perforar el túnel, solo trataremos dicho punto al final de esta noticia, en la primera de las notas que forman el complemento de nuestro trabajo.

TERCERA CUESTION: CANTIDAD DE AIRE NECESARIA PARA LA PERFORACION.

Conociendo ya la naturaleza del receptor, sus ventajas y sus inconvenientes, y su coeficiente de efecto útil, debemos examinar ahora dos puntos importantísimos para la aplicacion práctica de este mecanismo al paso de los Alpes.

- 1.º ¿Qué cantidad de aire se necesita para la perforacion?
- 2.º ¿Hay fuerza motriz suficiente, en las dos bocas ó puntos extremos del túnel, para acumular dicha cantidad de aire en las calderas, y para lanzarla al fondo del subterráneo?

Estudiemos separadamente estos dos problemas.

Cantidad de aire necesaria para los trabajos de perforacion. Dos elementos, aunque en proporciones muy distintas, forman el gasto de aire durante un periodo fijo, á saber;

1.° Volúmen de aire necesario para el trabajo de los perforadores.

2.° Volúmen necesario para la ventilacion.

El primero de estos elementos representa una parte sumamente pequeña del total, pues, segun el cálculo de la comision, en 24 horas no es superior á 4.000 metros cúbicos á la presion de una atmósfera, ó sean $\frac{4.000}{6} = 667$ metros cúbicos á la presion de seis atmósferas.

Para calcular el gasto relativo á la ventilacion, se supone que la galería de ataque avanza 3 metros en 24 horas, y que se va ensanchando á medida que penetra en la roca, pero de tal suerte, que el túnel siga, por decirlo así, á dicha galería de ataque, á la distancia de 150 ó 200 metros próximamente.

Esto supuesto, hé aquí el cálculo que se ha hecho á fin de apreciar el volúmen de aire necesario en 24 horas para la ventilacion de la galería principal.

Para 167 trabajadores á 240 metros cúbicos de aire por cada uno.	40.080
Para 83 lámparas á 168 metros cúbicos por ca- da una.	13.944
Para la mezcla con los productos de la combus- tion de 80 kilogramos de pólvora, á 250 me- tros cúbicos de aire por kilogramo.	20.000
Total.	<u>74.024</u>

La comision hace ademas notar, que los resultados prece-
dentes suponen el empleo de pólvora de guerra y no de pólvora
ordinaria de mina, en razon á que la combustion de esta úl-
tima pólvora produce óxido de carbono, que es altamente daño-
so á la economía animal aun en pequeñas dósís, al paso que la
pólvora de guerra dá principalmente ácido carbónico.

Fundándose en los datos anteriores, fija la comision en
12.000 metros cúbicos el aire necesario para la ventilacion de
la galería de ataque; y por lo tanto el volúmen total de aire será
igual á la suma de las tres partidas espresadas, á saber :

Volúmen de aire para el trabajo de los perforadores en 24 horas.	4.000 m. c.
Volúmen de aire para la ventilacion de la galería principal.	75.924 m. c.
Volúmen de aire para la galería de ataque.	12.000 m. c.
Total.	<u>89.924 m. c.</u>

á la presion de una atmósfera.

Sin embargo, teniendo en cuenta que los 4.000 metros cúbicos empleados como fuerza motriz en los perforadores, después de haber actuado en dichos aparatos, se esparcen en la galería y contribuyen á la ventilacion, se rebajó este volúmen de aire de la suma anterior, quedando por lo tanto reducida esta á 85.924 metros cúbicos.

Así, pues, resulta que la cantidad de aire necesaria en cada uno de los puntos de ataque para el trabajo de la perforacion, es próximamente de 86.000 metros cúbicos á una atmosfera, y este dato ha servido de base á la comision para demostrar la posibilidad práctica del sistema propuesto por los ingenieros piamonteses, si bien es cierto que se ha combatido como excesivamente bajo por algunos ingenieros. Ya veremos mas adelante las razones que en apoyo de esta opinion se han presentado, y las objeciones que sobre este punto se han hecho: por ahora continuemos el exámen general de los principios y bases que han servido de fundamento al proyecto de perforacion que tratamos de describir. (Véase el Apendice, núm. 8.)

Cantidad de aire que puede condensarse con la fuerza motriz de que se dispone en Modane y en Bardoneche. Debemos ante todo observar que, segun se deduce de los datos de la comision y de los presentados por el general Menabrea en la Cámara de Diputados, el problema está resuelto en cuanto á la estremidad norte de la galería, en razon á que el río Arc lleva un caudal mínimo de 5 metros cúbicos por segundo con una pendiente rapidísima; de tal suerte, que bastaria hacer una derivacion á corta distancia de la boca del túnel para obtener una caida de 10 metros. En esta hipótesis podrá disponerse de un

trabajo motor de $10^m \times 5.000^k = 50.000^k$ por segundo, y como se necesitan 214^k para condensar 6 litros de aire, resulta que en cada segundo puede comprimirse

$$\frac{50.000}{214} \times 6 = 1.401,84 \text{ litros á 1 atmósfera,}$$

ó en 24 horas $1.401,84 \times 86.400 = 121.118.976$ litros

ó bien $121.118^m, 976$;

cantidad muy superior á los 86.000 metros cúbicos anteriormente fijados.

Respecto á la fuerza motriz de que se dispone en la estrechidad del túnel correspondiente á Bardoneche, los resultados no son tan satisfactorios, y aun hay alguna contradiccion sobre este punto, tanto entre los diferentes escritos que hemos consultado, como entre los datos que en ellos se consignan y los que verbalmente se nos dieron.

Segun se dice en el documento parlamentario antes citado, el Ministro de trabajos públicos dispuso que el Inspector señor Bella reconociese los torrentes que corren en la proximidad de Bardoneche, y que midiese el volúmen mínimo de agua que conducian, así como la caída de que podria disponerse; resultando del trabajo hecho por dicho Ingeniero con todo esmero y prolijidad, que en la estacion mas desfavorable del año pueden utilizarse 700 litros por segundo cayendo de una altura de 50 metros, lo que equivale á un trabajo motor de $700 \times 50 = 35.000$ kilográmetros por segundo, ó sean $3.024.000.000^k$ en 24 horas, con cuya fuerza pueden condensarse en el mismo tiempo

$$\frac{3.024.000.000}{214} \times 6 = 84.785 \text{ metros cúbicos, en la hipótesis de}$$

que se necesiten 214 kilográmetros por cada litro de aire á seis atmósferas, ó que el coeficiente de efecto útil sea 0,55; pero como la comision supone que con las modificaciones que se introduzcan en el compresor podrá obtenerse un coeficiente de efecto útil igual á 0,6, calcula en esta nueva hipótesis que podrán comprimirse en 24 horas hasta 98.064 metros cúbicos.

A decir verdad, el supuesto de que parte la comision es algo aventurado, pues aunque sea probable, no es completamente se-

guro que se mejore la construccion de los compresores hasta el punto de subir el coeficiente de efecto útil de 0,53 á 0,60, y si esta hipótesis no se realizára, resultaria en el volúmen de aire necesario un déficit, que seria cuando menos de 86.000 — 84.785 = 1.215 metros cúbicos en 24 horas.

Mr. Minotto aun obtiene un déficit mayor: y en efecto, partiendo de la hipótesis de que se necesitan 214^{km} para la compresion de cada 6 litros de aire, y 51,5^{km} para lanzarlos del depósito á la cañería, ó sean 265^{km} por cada litro de aire á 6 atmósferas que salga por el extremo del tubo de conduccion, obtiene para el volúmen máximo de aire que podrá llevarse en 24 horas al fondo del túnel,

$$\frac{3.024.000.000}{265} \times 6 = 68.468 \text{ m. c.}$$

resultando un déficit de 86.000 — 68.468 = 17.532 m. c. en 24 horas.

Finalmente, partiendo de los datos que nos dió el ayudante que por órden de Mr. Sommeilleur nos acompañaba al visitar las obras, se obtiene todavía otro resultado enteramente distinto de los anteriores.

La derivacion del agua para los compresores se ha hecho del torrente Melezot, que lleva como mínimo 2 m. c. por segundo, ó sean 2000 litros: y por otra parte, aun cuando podría aprovecharse una caída de 40, como se ha situado el depósito de alimentacion solo á 24^m sobre el punto mas bajo de los compresores, solo se obtiene un trabajo motor igual á

$$2.000 \times 24 = 48.000^{\text{km}} \text{ por segundo, ó sean } 4.147.200.000 \times \text{k. m. en 24 horas.}$$

Con esta cantidad de fuerza motriz podrán acumularse en 24 horas y á la presion de una atmósfera $\frac{4.147.200.000}{214} \times 6 = 116.276 \text{ m. c. de aire, cantidad muy superior á los 86.000 m. c. que se necesitan.}$

En resúmen, partiendo de cuatro hipótesis distintas, hemos obtenido los cuatro resultados siguientes, que para mayor claridad presentaremos en forma de tabla:

SUPUESTOS.	Cantidad de aire que puede com- primirse en 24 horas. — Metros cúbicos.	DÉFICIT.	SOBRANTE.
1.º 700 litros de agua : cai- da de 50 ^m ; coeficiente 0,55	84.765	1.215	„
2.º 700 litros de agua : caída de 50 ^m : coeficiente 0,60.	98.064	„	12.064
3.º 700 litros de agua ; caída de 50 ^m ; coeficiente 0,42.	68.468	17.552	„
4.º 2.000 litros de agua ; cai- da de 24 ^m ; coeficiente 0,55	116.276	„	50.276

Si, como creemos, son exactos los datos que corresponden á la última hipótesis, se cuenta con un trabajo motor suficiente para llenar el servicio de los perforadores y de la ventilación, y aun en cualquiera de los demás casos, esceptuando el tercero, el déficit puede cubrirse fácilmente. Solo puede ocurrir alguna duda sobre la exactitud de la cifra que nos ha servido de base para este cálculo, y mas adelante examinaremos, para el completo esclarecimiento de este punto, las razones que aducen algunos ingenieros á fin de demostrar que los 86.000 metros cúbicos que fija la comision son insuficientes para el objeto á que se destinan. (Véase el Apéndice, núm. 8.)

Tubos de conduccion.

El problema de los motores y de la ventilación se descompone en dos: primero, comprimir una masa suficiente de aire

hasta la presión de 6 atmósferas; segundo, llevar este volumen de aire al fondo del túnel. El primer punto queda completamente resuelto con el establecimiento de los compresores; pero este volumen de aire comprimido y acumulado en los depósitos ¿podrá utilizarse á tan gran distancia de dichos depósitos? Al recorrer tubos de 1.000 , 2.000 7.000 metros de longitud ¿conservará la presión necesaria para producir el efecto que se desea? ¿cuáles serán las circunstancias de su movimiento y qué parte de su presión inicial perderá? ¿hasta qué punto podrá utilizarse esta presión? Todas estas cuestiones se presentan naturalmente, y á todas ellas era forzoso dar solución satisfactoria, si había de tenerse alguna confianza en el sistema de perforación propuesto por los ingenieros piamonteses: y tanto mas era esto necesario, cuanto que las objeciones y las dudas menudeaban sobre el nuevo invento. Se negaba la eficacia y la bondad del compresor hidráulico; se negaba que pudieran construirse calderas verdaderos depósitos de fuerza, pues se imaginaba que dejarían escapar gran cantidad de aire comprimido; se negaba aún que pudiera llevarse este á tan grandes distancias sin que recobrara su presión inicial de una atmósfera, y se concluía negando la ventaja de los aparatos de perforación y aun la posibilidad de aplicarlos á la apertura de subterráneos.

A tales objeciones, y tratándose de una obra tan importante, solo prácticamente podía darse contestación satisfactoria: las esperiencias relativas á los compresores, de las cuales en las páginas precedentes hemos dado cuenta, prueban la bondad de estos mecanismos y la posibilidad de su aplicación al caso que nos ocupa; las mismas esperiencias desvanecen las dudas que respecto al segundo punto pudieran abrigarse, y demuestran clara y evidentemente lo que, por otra parte, era fácil prever: en efecto, calderas de ocho metros cúbicos, llenas de aire á la presión de 6 atmósferas, solo pierden en 24 horas un cortísimo número de litros. Por último, á fin de resolver la cuestión relativa al movimiento del aire comprimido por las cañerías que han de conducirlo al fondo del túnel, se emprendieron nuevas esperiencias en gran escala, que procuraremos describir brevemente.

Se adaptó al depósito de aire comprimido un tubo cuyo desarrollo total era de 399 metros, de los cuales 301 estaban formados por tubos de plomo, y 98 por tubos de caoutchouc revestidos exteriormente por otros de palastro.

El diámetro interior de la cañería era de 60 milímetros, y á fin de hacer las esperiencias en las circunstancias mas desfavorables, se establecieron 18 diafragmas que reducian el diámetro de la seccion á 53 milímetros, y se encorvó la cañería de modo que formase 76 espiras de 0,55 metros próximamente, de rádio. Al extremo del tubo se colocaron sucesivamente varios opturadores, en los que de antemano se habian practicado orificios de diversas dimensiones, y de este modo se hizo variar, en la série de las esperiencias, dicho orificio de salida entre 18,13 y 492,84 milímetros cuadrados.

El aire del depósito se mantenía á una presion constante por una columna de agua de 51 metros de altura próximamente, y á fin de medir la pérdida total de presion, que experimentase el aire al recorrer la cañería, se establecieron dos manómetros: uno en el origen del tubo, y otro inmediato al orificio de salida.

La figura 8 representa la disposicion que acabamos de indicar.

E depósito de aire comprimido á 6 atmósferas.

AB cañería de conduccion: se ha prescindido en el dibujo de las diferentes espiras en que está encorvada, así como de los 18 diafragmas.

O₁ Opturador con el orificio de salida.

a b... } manómetros que miden la presion del aire en el depósito ó sea en el origen A de la cañería, y en el punto extremo B.
d f... }

La disposicion de estos manómetros es bien sencilla: se componen de un vaso cerrado *ab* lleno de mercurio, y que comunica con la masa de aire cuya presion se desea conocer, por medio de un tubo *g g'*; otro tubo *cc* abierto por la parte superior penetra en el mercurio, y sirve para medir la tension del aire en el depósito E.

El aire de dicho depósito pasa por el tubo *g g'* al vaso *ab*,

:

opreme al mercurio en él contenido, y le obliga á salir por el tubo *cc'*: la altura de dicha columna de mercurio aumentada con la correspondiente á la presion atmosférica, mide la tension del aire en el punto *g*: otro tanto pudiéramos decir del manómetro *df* colocado en el extremo del tubo.

Midiendo las dos alturas manométricas, y tomando la diferencia de ambos números, el resultado espresará, en altura de mercurio, la pérdida de presion del aire, correspondiente á los 399 metros del tubo: conociendo ademas la velocidad de la masa gaseosa en el origen de la cañería y el diámetro de esta, y variando el rádio del orificio de salida convenientemente, se puede conocer con gran exactitud, por una série de esperiencias, la marcha del aire en los tubos, y las diversas circunstancias de su movimiento.

Por interpolaciones sencillísimas, y suponiendo que á igualdad de velocidad inicial la pérdida de presion varía proporcionalmente á la longitud de la cañería y en razon inversa del diámetro, puede formarse una tabla de pérdidas de presion para tubos de 6.500 metros, con velocidades iniciales que varien entre un metro y seis metros, y diámetros que crezcan desde 0^m,10 á 0^m,55.

No teniendo á la vista la tabla formada por la comision, copiaremos otra que, tomando aquella por base, ha formado Mr. Minotto, y en la cual, ademas de la pérdida de presion en milímetros, consigna otros tres datos interesantes, á saber: la pérdida de presion medida en atmósferas, el coeficiente de pérdida de presion, y el volúmen de aire comprimido que saldrá por segundo en cada una de las diferentes hipótesis que comprende dicha tabla.

Emplearemos para mayor sencillez las notaciones siguientes:

- A. pérdida de presion en milímetros de mercurio.
 - B. la misma pérdida espresada en atmósferas.
 - C. coeficiente de pérdida.
 - D. volúmen de aire que saldrá en un segundo del depósito:
- dicho volúmen se espresa en litros.

TABLA PARA TUBOS DE 6.500 METROS DE LONGITUD.

VELOCIDADES por segundo en metros.		DIÁMETRO DE LOS TUBOS.					
		0m,10	0m,15	0m,20	0m,25	0m,30	0m,36
1	A	39	26	19,5	19,5	13	13
	B	0,0513	0,0342	0,02566	0,017	0,017	0,017
	C	0,01026	0,00684	0,005152	0,0034	0,0034	0,0034
	D	7,854	17,672	31,416	70,685	70,685	96,211
2	A	169	117	84,5	71,5	58,5	52
	B	0,022	0,154	0,1912	0,0941	0,077	0,648
	C	0,0044	0,0308	0,02224	0,0188	0,0144	0,01368
	D	19,708	35,344	62,832	98,174	141,370	162,422
3	A	403	273	201,5	162,5	156,5	117
	B	0,55	0,36	0,2631	0,2158	0,18	0,154
	C	0,106	0,072	0,05502	0,04276	0,036	0,0308
	D	23,562	53,015	94,248	147,261	212,055	288,635
4	A	702	468	351	286	234	201,5
	B	0,924	0,616	0,462	0,3765	0,508	0,265
	C	0,1848	0,01232	0,0924	0,07526	0,0616	0,0530
	D	51,416	70,686	125,665	196,548	282,74	384,844
5	A	1085,5	728	546	455,5	364	312
	B	1,43	0,958	0,7184	0,573	0,48	0,411
	C	0,286	0,1916	0,14568	0,1146	0,096	0,0822
	D	39,370	88,3575	151,708	245,435	353,425	481,055
6	A	1514,5	1014	760,5	611	507	435,5
	B	1,995	1,534	1,0966	0,804	0,667	0,575
	C	0,5986	0,2668	0,20132	0,1608	0,1334	0,1146
	D	47,124	106,029	108,494	294,522	424,119	577,266

Para que se comprenda cómo ha podido formarse la tabla precedente presentaremos un ejemplo:

Supongamos que se quiere calcular la pérdida de presión correspondiente á un tubo de 0m,1 de diámetro y 6.500 metros de longitud, en la hipótesis de que el aire salga del depósito con la velocidad de 5 metros.

Las experiencias hechas por la comision arrojan los siguientes datos:

VELOCIDAD.	DIAMETRO.	LONGITUD.	PERDIDA EN METROS.
5 ^m	0,06	400	0 ^m ,1115

Representando por x la pérdida de presion buscada, tendremos, —suponiendo como dijimos anteriormente, que á igualdad de velocidad variaba proporcionalmente á la longitud y en razon inversa del diámetro,—

$$x = 0,1115 \times \frac{6.300}{400} \times \frac{0,06}{0,10};$$

de donde $x = 1^m,085$,

que es en efecto el número de milímetros que aparece en la tabla anterior.

Por un procedimiento análogo se han hallado todos los números que corresponden á la letra A; en cuanto á los designados por la letra B, basta para obtenerlos pasar de alturas de mercurio en milímetros á presiones medidas en atmósferas, dividiendo á este fin las primeras por 760 milímetros.

Pasemos á los coeficientes de pérdida de presion, y consideremos para fijar las ideas la primera casilla de la tabla.

La presion en el depósito es de 6 atmósferas, ó sean 4560 milímetros de mercurio; la verdadera fuerza motriz será el exceso de esta presion sobre la presion atmosférica, que es la que ha de vencer el aire tanto en el cilindro de los perforadores, como al pasar del tubo de ventilacion á la atmósfera. Tendremos, pues una fuerza efectiva de $4.560 - 760 = 3.800$ milímetros de mercurio; y como la pérdida es de 59 milímetros, el coeficiente de pérdida, ó sea la relacion entre la pérdida y la fuerza motriz, será

$$\frac{59}{3.800} = 0,01026.$$

que es el número dado en la tabla.

Por último, se obtiene la cuartacifra, marcada con la letra D, multiplicando la velocidad en el origen por la seccion de la cañería. Sea por ejemplo la casilla correspondiente á la velocidad 3 y al diámetro 0^m,2; tendríamos

$$D = \frac{1}{4} \pi 0,2^2 \times 3 = 0,094248 \text{ m. c.}$$

ò sean 94 litros, 248,

Veamos ahora si podrá aprovecharse el aire condensado por los compresores, en los trabajos de perforacion.

Supongamos que se establecieran dos tubos de conduccion de 0^m,15 de diámetro: en esta hipótesis, aun admitiendo el caso mas desfavorable, es decir, que la longitud de los tubos fuese la longitud extrema de 6.500 metros, el aire llegaria al fondo del túnel con una presion de

$$6 - 0,958 = 5,042 \text{ atmósferas;}$$

y suponiendo que la velocidad inicial fuese de 5 metros, podrian lanzar ambos tubos al extremo de la galería, en 24 horas, un volúmen de aire, á la presion de una atmósfera, igual á

$$2 \times 88 \text{ litros} \times 6 \times 86.400 = 91238,4 \text{ m. c.}$$

que es próximamente el volúmen que se necesita.

Así, pues, la comision dió por completamente resueltos los dos puntos relativos á la conduccion del aire al fondo del túnel.

Y en efecto, lo dicho prueba, 1.º: que escogiendo convenientemente el diámetro de la cañería, podrá llevarse en 24 horas el volúmen de aire necesario para los perforadores y la ventilacion: 2.º: que se podrá llevar así mismo dicha masa de aire de tal modo, que conserve presiones de 3, 4 y 5 atmósferas, que es la condicion que se exige para que pueda utilizarse como fuerza motriz. (Apendice núm. 8.)

En cuanto á la primera parte, ó sea, al volúmen de aire que llegue al fondo de la galería, aun debiera tenerse en cuenta la pérdida que podrá resultar de las huidas por las uniones de los tubos, pérdida que segun Mr. Minotto será de importancia, en razon á la estraordinaria longitud de la cañería, y á las muchas uniones que por lo tanto será preciso hacer en ella; en efecto, empleando tubos de 5 metros, resultan $\frac{6500}{5} = 1.300$ enchufes, y