

aire comprimido; pero en las obras normales estos elementos solamente se precisan cuando se practica la vibración neumática. Fácilmente se comprende que si se pretende practicar la vibración acondicionando una instalación de aire comprimido, el presupuesto ascien- de no a miles de pesetas, sino a decenas de miles de pesetas.

También es muy importante el coste del *funciona- miento* de un vibrador. Tenemos pocos datos sobre el funcionamiento de un grupo compresor de aire, aun cuando suponemos que cada vibrador exigirá, por lo menos, un grupo de 2 K. w. teóricamente, y como no es práctico un conjunto de tan poca potencia, pode- mos asegurar que, en la realidad, la potencia exigida será muy superior.

Respecto al vibrador eléctrico, podemos asegurar que su consumo es insignificante. Primero lo demos- traremos teóricamente, y después serán mencionados los resultados de las medidas verificadas.

En su esencia, el vibrador se compone de un motor eléctrico, dotado de contrapesos que desequilibran el rotor. Si este contrapeso lo descomponemos (fig. 1.^a) en elementos infinitamente pequeños, tenemos que cada uno efectúa una fuerza centrífuga que, en coor- denadas polares y admitiendo la notación indicada en dicha figura, vale:

$$df = d\rho \cdot \rho d\beta \cdot dc \cdot \frac{\delta}{g} \cdot \omega^2 \cdot \rho;$$

en la cual:

ρ es el radio vector.

β es el ángulo polar.

c es el espesor del contrapeso, en cada punto.

δ es la densidad del material que constituye el contra- peso.

g es la aceleración de la gravedad; y

ω es la velocidad de giro del contrapeso, que es igual a la del motor.

Evidentemente, la fuerza resultante del conjunto de cada contrapeso, si sigue la dirección marcada con A en dicha figura 1.^a, tendrá por expresión:

$$F = \frac{\delta \cdot \omega^2}{g} \iiint \rho^2 \cdot d\beta \cdot dc \cdot d\rho \cdot \cos \alpha.$$

Como es natural, esta fórmula se simplifica cuando se adoptan formas constructivas, al poner límites a las integrales.

En resumen, un vibrador giratorio normal está solicitado por una fuerza F giratoria a la velocidad ω .

Si llamamos P al peso del aparato, accesorios y

masa afectada por la vibración, la aceleración instan- tánea será:

$$j = \frac{F}{P} \cdot g;$$

y refiriéndola a dos ejes cartesianos, perpendiculares al del vibrador, y teniendo en cuenta la velocidad ω de giro, tenemos el siguiente sistema:

$$\begin{cases} j_x = \frac{F}{P} \cdot g \cdot \sin \omega t; \\ j_y = \frac{F}{P} \cdot g \cdot \cos \omega t. \end{cases}$$

Integrando una vez, tenemos el sistema de velo- cidades:

$$\begin{cases} v_x = -\frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega} \cdot \cos \omega t; \\ v_y = +\frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega} \cdot \sin \omega t. \end{cases}$$

Las constantes de integración son nulas.

Si integramos otra vez, nos encontramos con el sistema de los movimientos

$$\begin{cases} X = -\frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega^2} \cdot \sin \omega t; \\ Y = -\frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega^2} \cdot \cos \omega t; \end{cases}$$

en el cual las constantes de integración son también nulas.

Con los sistemas anteriores, podemos deducir que el movimiento es circular, alrededor del mismo eje del vibrador, y que la amplitud de este movimiento, que es el diámetro de la circunferencia descrita por el vi- brador, vale:

$$A = \frac{2 \cdot F \cdot g}{P \cdot \omega^2}.$$

Según el modo de realizar el vibrado, estos movi- mientos varían de forma geométrica entre los diver- sos puntos de la zona afectada por la vibración.

Otra consecuencia que se saca de los sistemas anteriores es que la vibración en sí no consume ener- gía, puesto que la expresión de esta energía es:

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ fuerza} \cdot \text{velocidades} &= F_x \cdot v_x + F_y \cdot v_y = \\ &= -F \cdot \sin \omega t \cdot \frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega} \cos \omega t + \\ &+ F \cos \omega t \cdot \frac{F}{P} \cdot \frac{g}{\omega} \cdot \sin \omega t = 0. \end{aligned}$$



Figura 2.ª

Esta es la importante conclusión a que antes se aludía, y que se comprueba experimentalmente, pues los vibradores eléctricos consumen muy poca energía, la suficiente para vencer las resistencias de los rodamientos y el rozamiento interno del hormigón o masa a vibrar.

Prácticamente, este consumo es menor de los 100 vatios, es decir, que el gasto de funcionamiento de un vibrador se reduce a unos céntimos por hora, siempre mucho más económico que el de aire comprimido.

Por último, es importante también la *duración* de los vibradores.

Desconocemos la duración normal de los vibradores neumáticos. Nuestro compañero Gabriel Barceló, destacado paladín de la vibración del hormigón, indica en la página 180 de su interesantísimo libro *Hormigón vibrado*, que la duración normal de estos aparatos es de unas 600 horas.

En los vibradores eléctricos construidos bajo la dirección del que suscribe, la duración está definida por los rodamientos, siendo normal que se adopte la de 4 000 horas.

Desde luego que esta cifra es muy superior a la de los neumáticos; pero, además, hay otra ventaja

importante, y es que se pueden recambiar los rodamientos, una vez utilizados durante algún tiempo, y queda el aparato en perfectas condiciones de funcionamiento para otro período de tiempo.

En resumen: sin pretender que la duración de los vibradores eléctricos sea ilimitada, puede asegurarse que es muy superior a la de los neumáticos de movimiento alternativo.

La fuerza, la frecuencia y la eficacia de los vibradores.

Es usual exigir una frecuencia elevada en los vibradores, aduciendo razones de eficacia, suponiendo ser más útiles los vibradores de gran frecuencia.

Como, por otra parte, siempre hemos considerado fundamental que los vibradores sean aparatos sencillos y toscos, hemos escogido como fundamental el motor de inducción. Ahora bien: para no requerir el uso de instalaciones especiales, tales como generadores de frecuencia superior a la normal, u otros dispositivos, tropezamos con que la frecuencia máxima de los motores de inducción es de 3 000 r. p. m. Pues bien: ¿puede



Figura 3.ª

esperarse una elevada eficacia con esta frecuencia?

Contestaremos a esta pregunta con razonamientos teóricos y confirmación práctica.

Hemos de tener en cuenta que la vibración no hace otra cosa que poner en movimiento las partículas del hormigón (artículo de M. L'Hermite, extractado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, febrero 1946), siendo fundamental la aceleración dada a estas partículas. Ahora bien: considerando análoga la masa afectada por la vibración, la aceleración es función lineal de la fuerza, y es independiente de la frecuencia.

Por otra parte, también Barceló menciona, en la página 166 de su mencionado libro, que, según experiencias realizadas en los Estados Unidos, la eficacia de la vibración viene medida por una cantidad proporcional a

$$A n^2 \cdot t;$$

siendo:

- A*, la amplitud.
- n*, la frecuencia; y
- t*, el tiempo de practicar la vibración.

Sustituyendo en esta fórmula los valores deducidos anteriormente, y teniendo en cuenta que la frecuencia *n* es proporcional al valor ω antes considerado, resulta que la eficacia tiene también por expresión:

$$\frac{2 \cdot F \cdot g}{P \cdot \omega^2} \cdot \omega^2 \cdot t = \frac{2 \cdot g \cdot F \cdot t}{P};$$

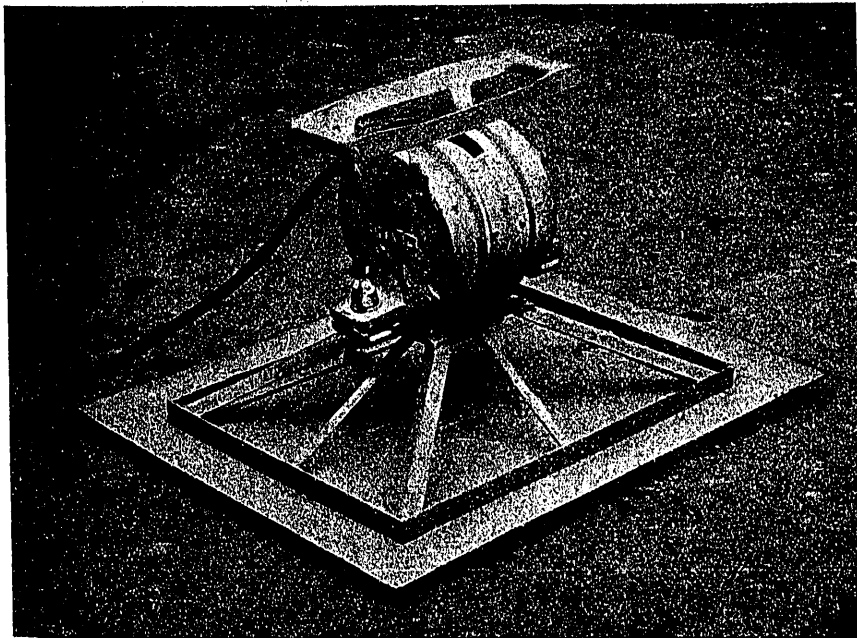


Figura 4.ª

es decir, que es independiente de la frecuencia y proporcional a la fuerza y al tiempo de vibración.

Este resultado es concordante con el anteriormente deducido y con nuestra experiencia. Se han tenido en funcionamiento vibradores de frecuencia muy elevada, hasta 18 000 r. p. m., con fuerza escasa por razones de rodamientos y resultando poco eficaces.

Por todo lo anterior, y sin pretender negar la selectividad de las diferentes frecuencias para los diversos tamaños de áridos que componen el hormigón, ni la conveniencia de utilizar vibradores de diversas frecuencias, se ha llegado a la conclusión de que el vibrador de 3 000 r. p. m. es suficientemente eficaz para el uso normal en obra, si tiene la fuerza necesaria.

El vibrador normal.

Le denominamos *normal* por su facultad de adaptarse a varios usos, utilizando en todos ellos el mismo elemento fundamental o vibrador propiamente dicho.

Está constituido por un motor trifásico de inducción, con rotor en cortocircuito y alimentado por una

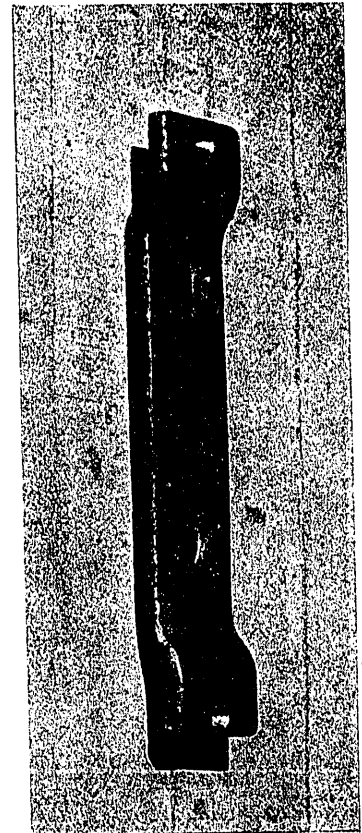


Figura 5.ª

tensión de 30 voltios. Está completamente acorazado por lo que la humedad, goteras, salpicaduras, etc., no le afectan en su funcionamiento.

Se ha escogido una tensión de alimentación tan baja, para que el personal que lo maneje no pueda tener peligro alguno de accidente.

Los contrapesos están alojados en el interior del vibrador, por lo que tampoco hay peligro mecánico para los obreros.

La alimentación se verifica con un sencillo cable flexible, aislado bajo goma, que en su extremo tiene la clavija de un enchufe. Este detalle es insignificante, pero resulta práctico para poderlo guardar las horas en que no funcione. La clavija del enchufe puede fijarse a su hembra correspondiente, que está situada en una caja de mando (fig. 2.^a), en la que están alojados los fusibles, el interruptor y el transformador que reduce la tensión de 220 (que es lo normal) a 30 voltios. Esta caja también está dispuesta de modo que proteja los aparatos delicados de la lluvia, salpicaduras, etc.

Con este aparato se pueden practicar los siguientes aspectos de la vibración:

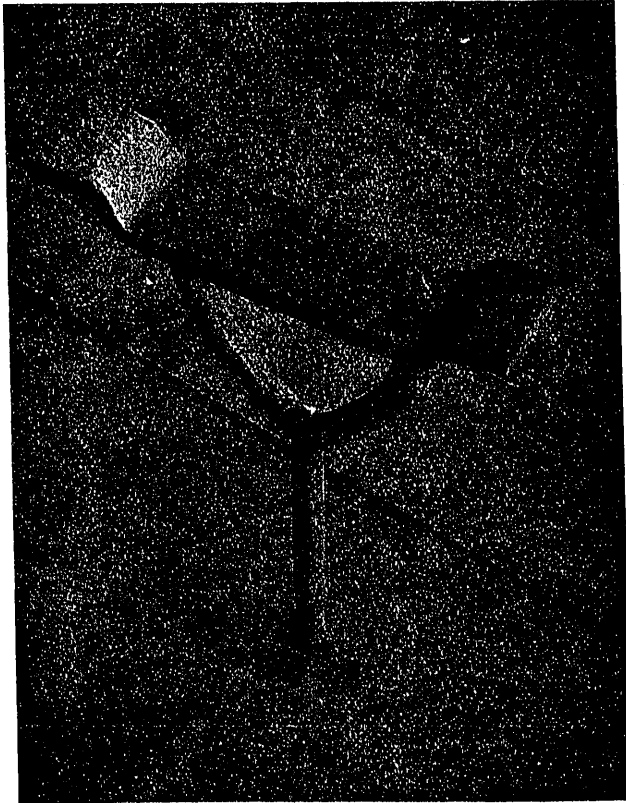


Figura 6.ª



Figura 7.ª

1.º *Vibración con aguja.* — El vibrador, con una aguja y mangos (fig. 3.^a), lo maneja el obrero con ambas manos, oprimiendo la aguja sobre el encofrado, que entra en vibración. También se aplica a las armaduras, oprimiéndolas con las varillas de la aguja, lo que las hace vibrar.

Es un sistema de vibración muy práctico, extremadamente individualista y, por lo tanto, ágil. Lo aplica el obrero al sitio que lo considera oportuno, bastando levantarlo para suspender la vibración.

2.º *Vibración superficial.* — En los escudos del vibrador existen dos salientes en los que se pueden alojar unas mordazas, que tienen unas tuercas con mariposa para ser apretadas a mano. Utilizando estas mordazas, se puede fijar el aparato al accesorio que se desee.

En la figura 4.^a se ha fotografiado el vibrador unido a una bandeja para practicar la vibración superficial.

3.º *Vibración de encofrados en general.* — Se ha resuelto este caso con unas pletinas que se sujetan al encofrado (fig. 5.^a), y cuyos extremos pueden fijarse

a las mordazas ya mencionadas que tiene el vibrador. La operación de fijar o levantar el vibrador sobre una pletina se realiza en unos segundos.

4.º *Vibración del encofrado de placas planas.*— La vibración de placas planas se realiza muy bien con el equipo de aguja (fig. 3.ª), pero para conseguir el elevado rendimiento propio de la vibración de encofrados, puede utilizarse la pieza en Y que se ve en

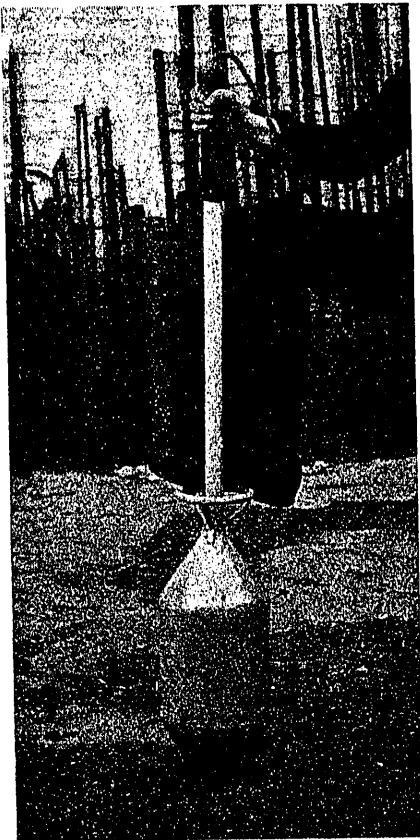


Figura 8.ª

la figura 6.ª, la cual se atornilla en su parte inferior al encofrado, estando situada en su parte superior una pletina análoga a las indicadas anteriormente, a la que se fija el vibrador en el momento deseado.

5.º *Vibración de encofrados elevados (fondos de viga).*— Existen otros lugares de las obras en donde es difícil la materialidad de colocar un vibrador. Por ejemplo, en el fondo de una viga.

En este caso, el accesorio adecuado es un tubo, cuyo extremo está roscado, atornillándose al fondo de la viga o de placa (fig. 7.ª) y que tiene en el extre-

mo opuesto la misma pletina que antes se dijo, a la que se sujeta el vibrador en una postura cómoda.

6.º *Vibración por inmersión (pervibración).*— Cuando deben vibrarse grandes masas de hormigón, sin encofrado ni armaduras, se dispone el vibrador dentro de una envolvente fuselada, con un mango rígido para su accionamiento (fig. 8.ª). También se ha fijado un anillo metálico para que el obrero le oprima con el pie, haciendo entrar al aparato dentro del hormigón.

Variantes del vibrador normal.

No siempre los vibradores resultan idóneos para todos los usos con las características mencionadas, pues hay ocasiones en que es preferible la alimentación directa a 220-127 voltios.

En este caso, el fundamento y equipos son idénticos, pero varía la caja de mando, que no precisa transformador, habiéndosele dotado de un cable de tierra, conectado a la masa del vibrador. De este modo no se puede poner en tensión ni producir, por lo tanto, daño alguno al personal. Cualquier avería que pudiese en contacto una fase con la masa del aparato, hace saltar el fusible de la alimentación.

Otras veces se precisa que la alimentación sea monofásica, por carecer de energía trifásica.

Este caso se ha resuelto utilizando el motor normal trifásico con el esquema eléctrico que se aprecia en la parte derecha de la figura 9.ª, figurando también en la parte izquierda de la misma figura el esquema normal de alimentación trifásica.

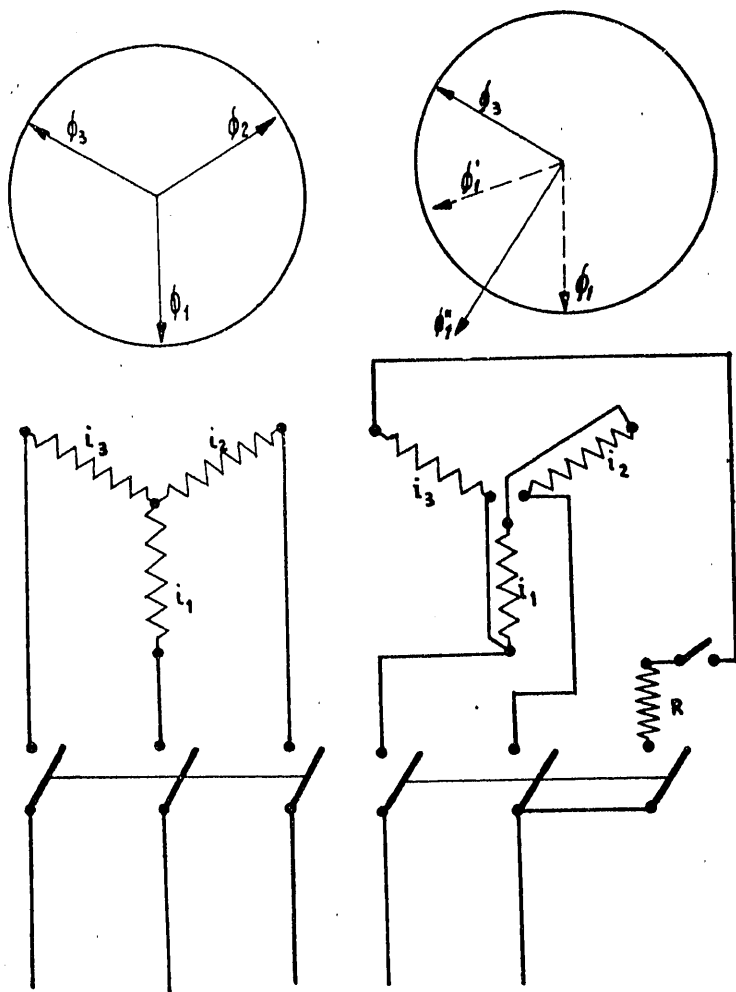
En la alimentación trifásica se producen en el motor los tres flujos ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 , debidos a las respectivas corrientes i_1 , i_2 e i_3 , circulando por los devanados correspondientes.

Con el esquema adoptado se hace que las intensidades i_1 e i_2 sean idénticas, conectando en serie ambos devanados, con la particularidad de que el de la fase 2 debe invertirse. Con esto, en vez del flujo ϕ_2 , nos encontramos con el ϕ'_1 , en fase con el ϕ_1 , pues ambos son creados por la misma intensidad.

La resultante de ambos es un flujo ϕ''_1 , que está en cuadratura con el ϕ_3 . Para tener un campo giratorio, y por lo tanto, par motor, debe hacerse que ambos devanados (el 1 y 2, por un lado, y el 3, por otro) sean recorridos también por corrientes en cuadratura.

Esto lo hemos conseguido colocando una resistencia, R , en serie, con el devanado 3, circuito en el que domina la resistencia, mientras que en el formado

por los devanados 1 y 2 es principalmente inductivo. La resistencia R sólo se conecta en el arranque, pues una vez en marcha normal se prescinde de la fase 3 y continúa funcionando como monofásico.



Alimentación trifásica.

Alimentación monofásica.

Figura 9.

Este artificio de arranque es también interesante para los aparatos que podemos llamar "clásicos" (diferentes de los que se describen en el presente artículo, que están amparados por sus correspondientes patentes de invención), los cuales sólo funcionan para determinado sentido de giro.

La caja de mando es algo complicada y tiene el aspecto de la figura 10, estando también dispuesta para que no la afecte la lluvia ni salpicaduras. El arranque se verifica con un conmutador de dos posiciones: una de arranque y otra de marcha.

Vibradores de pequeño diámetro.

En algunas obras (tales como revestimientos de túneles) se precisan vibradores "de botella" cuyo elemento vibrante tenga pequeño diámetro.

Se ha eludido la necesidad del eje flexible que suelen tener estos aparatos mediante la construcción de motores especiales de pequeño diámetro, sin perder robustez, cuyo motor se aloja en el interior del elemento vibrante o "botella".



Figura 10.

La fotografía de la figura 11 representa uno de estos vibradores, de 95 mm. de diámetro exterior, con su tubo de goma para facilitar el manejo, pero que en su interior lleva un cable de alimentación eléctrica, no un eje flexible.

El citado motor (que llamamos "NONO") tiene características muy interesantes desde el punto de vista eléctrico, pues obedece a una nueva concepción de los motores de inducción, por lo que en publicaciones posteriores daremos detalles de su constitución, después de terminados los ensayos que se están realizando.

Esta solución es mucho más simple que la clásica de eje flexible, pues no sólo elimina este delicado elemento, sino que reduce a la mitad el número de rodamientos necesarios.

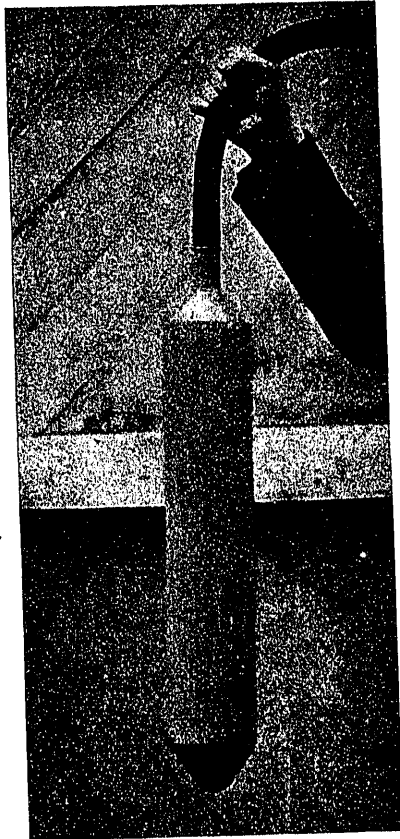


Figura 11.

Vibradores giratorios especiales.

Además de los aparatos de alta frecuencia que ya se han mencionado (hasta de 18000 r. p. m.), con multiplicación mecánica, y que no se han extendido

por su mayor complicación, contraria a la índole práctica de estos aparatos, se han construido, bajo nuestra dirección, vibradores para alimentación por batería de acumuladores del tipo normal utilizado en automóviles.

Con estos aparatos es posible practicar la vibración en sitios donde no hay alimentación de energía

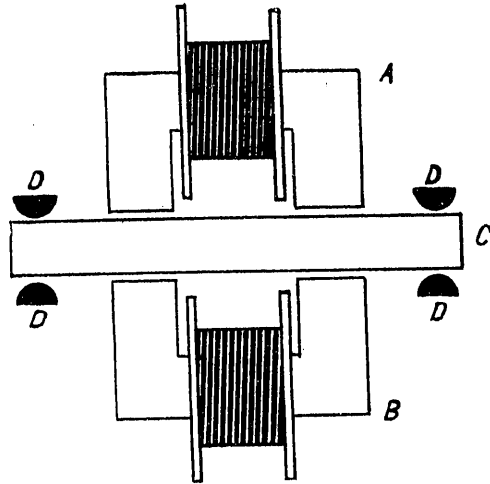


Figura 12.

eléctrica. Con una batería cargada puede funcionar el vibrador de cuatro a cinco horas.

Desde luego que este sistema de vibrado es más caro que el de alimentación normal, pero de todos modos resulta más económico que la vibración por aire comprimido.

Vibradores de alta frecuencia y movimiento alternativo.

También hemos construido el vibrador esquematizado en la figura 13. Consta de dos circuitos magnéticos, A y B, alimentados cada uno por una co-

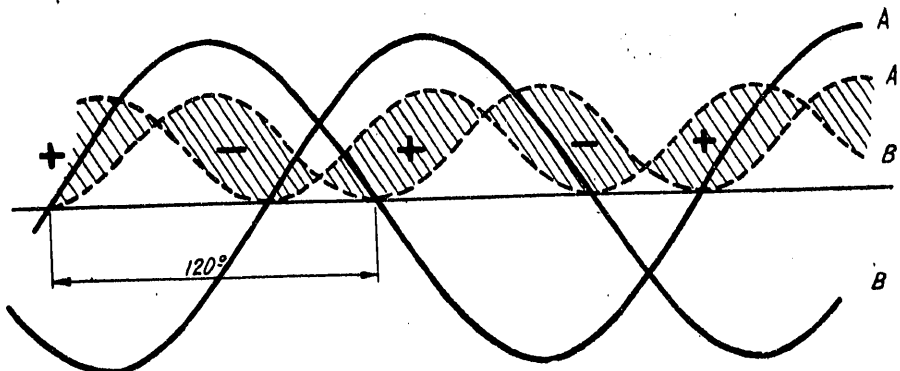


Figura 13.

riente distinta, derivadas de una línea trifásica. Existe, por lo tanto, una diferencia de fase de 120° (figura 13) entre ambas corrientes.

Este vibrador tiene un núcleo flotante, *C* (figura 12), que en determinados instantes es atraído hacia *A*, y en otros, hacia *B*, golpeando los topes *D*, y originando la vibración. Es decir, su funcionamiento es análogo al de los neumáticos.

En estos vibradores alternativos suele contarse su frecuencia por el número de golpes, no de períodos, por lo que en el caso que nos ocupa resulta una frecuencia de 12 000 golpes por minuto. Destacamos que esta frecuencia es sincrónica, es decir, independiente de la carga, y sin oscilación alguna.

También es de destacar que estos aparatos producen una vibración unidireccional.

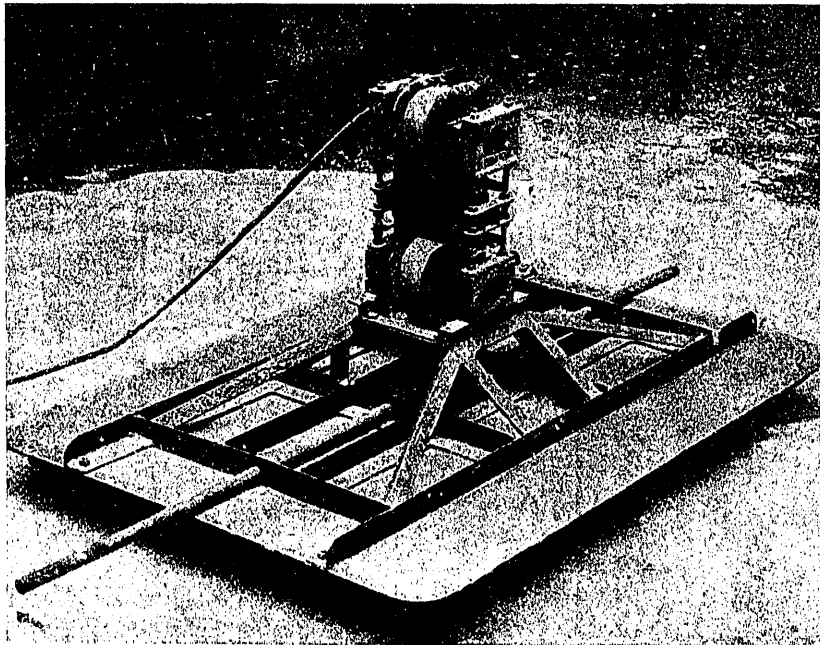


Figura 14.

El fundamento del aparato se indica en la figura 13. Las senoides *A* y *B* representan las intensidades que circulan por los devanados correspondientes. La línea *A'* indica la ley de atracción del núcleo flotante, *C*, hacia la armadura, *A*, mientras que la *B'* representa la ley de atracción hacia la armadura *B*. Estas leyes son proporcionales al cuadrado de la intensidad de magnetización, o sean, senoides de frecuencia doble.

Como sus acciones son de signo contrario, deben restarse, resultando la ley indicada en la zona rayada, de frecuencia doble de la de alimentación. Como ésta suele ser de 50 p. p. s., la frecuencia de vibrado es de 100 p. p. s.

La figura 14 representa una fotografía de uno de ellos, acoplado a una mesa vibradora en construcción.

Resumen.

Mencionados algunos aspectos de nuestro "granito de arena" sobre vibradores eléctricos, estimamos que tales aparatos pueden resolver gran cantidad de casos, tanto normales como especiales, permitiendo vibrar el hormigón de un modo práctico, y con ello alcanzar las importantes ventajas de esta técnica, que por ser muchas y valiosas, se ha impuesto en la moderna construcción.