

Precios de suscripción:

España, año. . . . 10 pesetas.

Extranjero, año . . . 15 »

Número suelto. . . . 1 »

TÉCNICA

REVISTA TECNOLÓGICO-INDUSTRIAL

Redacción: Pelayo, 9

Teléfono 541-A

B A R C E L O N A

AÑO XLIII

JULIO 1920

NÚM. 31

METALURGIA

TEMPLE DEL ACERO

(Conclusión*)

En todos los puntos situados en el interior de aquella área, el carbono de todos los aceros está combinado y disuelto en el hierro bajo la forma de carburo de hierro. Por debajo de 700° C no se encuentra otra variedad estable que el hierro α y si el acero se ha dejado enfriar normalmente, casi todo su carbono queda precipitado bajo la forma de carburo Fe^3C cristalizado, o *cementita*. En el punto S, correspondiente a 0,9 por 100 de carbono, encontramos el caso más sencillo, porque enfriando un tal acero por debajo de la temperatura correspondiente a S, la austenita se resuelve en una mezcla de hierro y de carburo de hierro. Esta mezcla se separa formando unas placas alternadas características, de aspecto laminar; se la denomina *perlita*; está constituida por 86,5 por 100 de hierro y 13,5 por 100 Fe^3C , aproximadamente, suponiendo que no exista carburo disuelto en el hierro (hipótesis inexacta, pero aceptable en la práctica).

A la izquierda de S (fig. 2), los aceros están constituidos para temperaturas inferiores a 700° C, por una mezcla de hierro y de perlita, mientras que los situados a la derecha de S están compuestos por una mezcla de hierro, carburo y perlita. El examen del diagrama muestra bien el motivo de haber escogido el acero para herramientas con 0,9 por 100 de carbono para el estudio de la teoría del temple. Enfriado partiendo de una temperatura elevada, este acero no presenta más que un solo punto crítico S. El mismo diagrama indica como si un

acero para útiles se le enfría bruscamente a partir de la temperatura del rojo, es decir, alrededor de 800° C, su constituyente será la austenita. El enfriamiento brusco tiene por objeto hacer franquear al acero rápidamente la temperatura correspondiente al punto S, para evitar en lo posible el desdoblamiento del elemento único austenita en los otros dos elementos constitutivos de la perlita.

Estructuras. — Ahora bien, ¿cuáles son las estructuras del hierro γ puro, del hierro γ conteniendo carbono disuelto, del hierro β puro y del hierro α puro?

No se ha logrado obtener por enfriamiento brusco, por muy rápidamente que se haya operado, el hierro γ puro a la temperatura ordinaria. Pero resulta posible con el empleo del manganeso o del níquel bajar el punto crítico hasta la temperatura ordinaria y obtener aleaciones que no contengan sino hierro γ . Estas aleaciones presentan una forma cristalina característica y se componen generalmente de cristales poliédricos con marcada tendencia a acoplarse; estos grupos de dos cristales, uno de los cuales ha girado 180° alrededor de la normal a la cara común (fig. 3), son fáciles de reconocer con el microscopio. Los hierros α y β cristalizan asimismo en cristales poliédricos, pero no presentan la tendencia anotada. Las figuras 4 y 5 muestran estructuras de aceros recocidos.

Siendo la *austenita* una solución sólida de carbono en el hierro γ , deberá cristalizar, y al hacerlo sus cristales deberán presentar los caracteres generales de los del metal puro. La estructura de la

(*) Véase los números de mayo y junio.

austenita obtenida por brusco enfriamiento en el área AGOSE (fig. 2) no corresponde, sin embar-



Fig. 3.—Micrografía de hierro γ (aumentado $\times 150$).

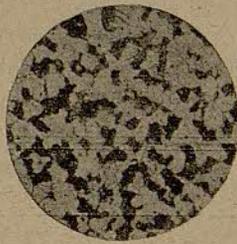


Fig. 4.—Micrografía de acero recocido con 0.3 % de carbono (aumentado $\times 100$).

go, a esta deducción teórica. Tenemos como ejemplo un acero para herramientas con 0,9 por 100 de carbono. Al enfriarlo desde 750° C, se obtiene una estructura en agujas; si la temperatura del enfriamiento se aumenta, esta estructura se acentúa y se obtienen unas agujas más largas (fig. 6); ni

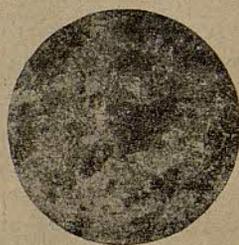


Fig. 5.—Micrografía de acero recocido con 0,8 % de carbono (aumentado $\times 100$).

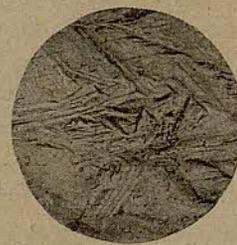


Fig. 6.—Micrografía de acero convenientemente templado *martensita* (aumentado $\times 150$).

empleando las más altas temperaturas es posible obtener cristales poliédricos. Esta estructura en agujas ha recibido el nombre de *martensita*, y se admite universalmente que es la estructura característica del acero bien templado.

Todas las teorías que se han propuesto durante los últimos 40 años referentes al temple de los aceros, giran alrededor de esta sola pregunta: ¿Qué es la *martensita*? El día en que se encuentre la respuesta precisa a esta pregunta quedará contestada esta otra: ¿Por qué el acero se endurece por enfriamiento brusco?

Nos falta todavía señalar dos hechos importantes. Ante todo, hay que notar que el carburo de hierro que existe en libertad en un acero para útiles recocido, es una substancia muy dura, pero como va mezclado de hierro α que es muy dulce, en la proporción de 13,5 a 86,5, el útil resulta relati-

vamente dulce. Puede separarse este carburo del acero con disolventes apropiados que arrastren el hierro. En cambio no es posible separar el carburo de hierro de un acero para útiles convenientemente templado (y no recocido); cuando se ataca por los ácidos diluidos en este estado, se disuelve el acero sin dejar residuo, desprendiéndose una mezcla compleja de hidrocarburos líquidos y gaseosos. Existe, pues, una diferencia fundamental en la forma en que se encuentra el carburo en un acero según éste haya sido templado o recocido; en el primer caso, el carburo está completamente disuelto, y en el segundo queda completamente separado. Cuando se disminuye la dureza de un acero templado por medio del recocido, el carburo de hierro Fe^3C se precipita paulatinamente. Si el recocido se efectúa a baja temperatura, el precipitado se separa en partículas ultra-microscópicas, conocidas con el nombre de *troostita* (fig. 7). Si se eleva la temperatura, se hace pasar la *troostita* a

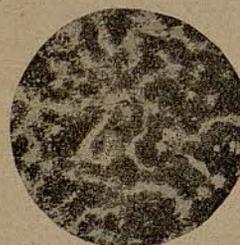


Fig. 7.—Micrografía de un acero templado y recocido a baja temperatura *troostita* (aumentado $\times 100$).

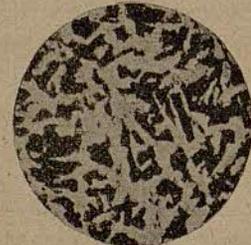


Fig. 8.—Micrografía de un acero templado y recocido a temperatura más elevada *sorbita* (aumentado $\times 100$).

la variedad *sorbita* (fig. 8); con temperatura todavía más elevadas, aparece la *perlita* bien sepa-



Fig. 9.—Micrografía de un acero templado y recocido a temperatura muy elevada *perlita* (aumentado $\times 100$).

rada (fig. 9). La disminución gradual de dureza que comunica el recocido al acero templado tiene por causa la precipitación del carburo de hierro

bajo estas formas, simultáneamente con el hierro α que es dulce. Acerca de este particular no existe divergencia de opiniones.

En segundo lugar, hay que observar que todos los aceros para herramientas, convenientemente enfriados y templados, son magnéticos. Como que la austenita no es magnética, y en el estado actual de nuestros conocimientos, la única forma de hierro magnético es la variedad α , la deducción lógica es que debe existir hierro α en los útiles templados y que la martensita es la austenita que ha sufrido una modificación.

Antiguas teorías acerca del temple.—Hasta hace poco tiempo existían dos teorías principales para explicar el temple: la teoría alotrópica (francesa); la teoría carbonista (inglesa). Cualquiera que sea el juicio que merezcan a la historia estas dos teorías, lo cierto es que cada una de ellas ha contribuido esencialmente al adelanto de la ciencia. La teoría alotrópica se debe principalmente a M. Osmond; al estudiar el enfriamiento del hierro puro descubre solamente el punto Ar_3 ; ha denominado β al hierro a temperaturas superiores a este punto y α al hierro a temperaturas inferiores, y admitió dos variedades de hierro, cuyos átomos respectivamente agrupados en moléculas constituían o hierro dulce o hierro duro independientemente de la presencia o ausencia de carburo. En un hierro calentado al rojo, la masa puede ser dulce, pero las moléculas son duras, es el hierro β ; este hierro, enfriado lenta o rápidamente, resulta dulce; se convierte en hierro α por no oponerse a ello obstáculo alguno. Si existe carbono, un cierto número de moléculas se mantienen en la misma forma en que existían a temperatura elevada, especialmente bajo la forma β que es dura; se obtiene acero duro. De este modo atribuye la dureza del acero enfriado, directamente al hierro y sólo de modo indirecto al carbono. Más tarde, perfeccionando su método de experimentación, M. Osmond descubrió el punto crítico Ar_2 , que reconoció finalmente ser independiente del Ar_3 ; la consecuencia lógica fué admitir tres variedades de hierro: γ por encima del punto Ar_3 , β entre Ar_3 y Ar_2 y α por debajo de Ar_2 (quedando siempre el hierro β como el más duro). De este modo la dureza del acero era debida a una variedad del hierro intermedia entre las variedades α y γ estables a baja y alta temperatura respectivamente. Según esta teoría, la martensita procedía del hierro β .

Podemos hoy día avanzar dos consideraciones que destruyen esta teoría. En primer lugar, al examinar el diagrama del equilibrio (fig. 2), vemos que en todos los casos de aceros para herramientas (es decir, aquéllos que contienen de 0,7 a 1,5 por 100 de carbono), el hierro γ se transforma directamente en hierro α , sin pasar por la variedad β , siendo difícil imaginarse cómo podría formarse el hierro β . Se contesta, de ordinario, a tal objeción, diciendo que el diagrama se refiere únicamente a variedades estables de acero y que durante el enfriamiento, se forman variedades fugaces e inevitables, una de las cuales puede ser el hierro β . Esta respuesta no es admisible. En rigor podía aceptarse en la época en que se lanzó la teo-

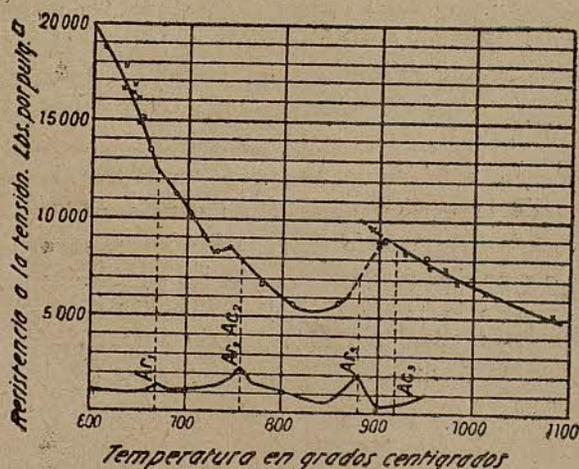


Fig. 10.—Curva representativa de las variaciones de la resistencia de ruptura del acero, con las variaciones de temperatura.

ría alotrópica, en que se distaba mucho de tener de dicho diagrama conocimientos tan completos como hoy.

En segundo lugar, recordemos los trabajos publicados por MM. Rosenhain y Humfrey, que se dedicaron a investigaciones sobre la tenacidad del acero dulce conteniendo 0,1 por 100 de carbono, entre 1,070° y 612° C. Tal acero contenía pues hierros α , β y γ . En rigor, el estudio no se dirigía precisamente sobre la dureza, pero no puede negarse que el estudio de la tenacidad de un material da indicaciones sobre su cohesión, íntimamente ligada a la dureza. Al examinar la curva de la fig. 10, vemos que el hierro presenta una tenacidad mucho mayor justamente en la región superior a Ar_3 ; siendo así que lo lógico era suponer una disminu-

ción de tenacidad, debida a la elevación de la temperatura. A 950° C, en la región correspondiente al hierro γ , la tenacidad resulta mayor que a 850° C, región de β . Lo que es interesante hacer constar es que los resultados de Rosenhain y Humfrey casan mejor con la primitiva teoría de Osmond (teoría del hierro γ) que con la teoría moderna.

Es poco probable que el hierro β y el hierro α que aparte de las propiedades magnéticas no presentan sino muy pequeñas diferencias, y ninguna desde el punto de vista de su forma cristalina, las presenten tan marcadas en el caso particular de la dureza. Los trabajos de sir George Beilby confirman por otra parte que dos variedades de un metal que presenten la misma forma cristalina tienen idéntica dureza.

La otra teoría del temple se funda en la influencia del carbono. Tiene su origen en los trabajos de Sorby, de Sheffield, que ha hecho un detallado estudio de las microestructuras de los aceros enfriados y recocidos. Por lo que respecta a la dureza del acero enfriado, se la atribuye a la transformación de la perlita, estable por debajo de A_1 en un compuesto amorfo llamado *hardenita*, cuya fórmula empírica es $Fe^{24}C$. Según los partidarios modernos de la teoría *carbonista*, aquella dureza es una propiedad de esta solución sólida supuesta amorfa; consideran que la totalidad del carbono ha quedado aprisionado por el enfriamiento bajo la forma de solución sólida.

Las investigaciones recientes justifican la hipótesis de que todo el carbono queda disuelto en un acero enfriado de modo conveniente; pero en su deseo de descalificar la teoría alotrópica, los "carbonistas" han llegado hasta el extremo de negar a las formas alotrópicas toda influencia sobre la dureza del acero que consideramos.

Al recordar que el carburo de hierro es prácticamente insoluble en los hierros α y β , siéndolo solamente en el hierro γ , resulta poco científico seguramente negar al hierro γ toda participación en el temple. Mas aun los mismos hechos contradicen aquella afirmación. No resulta exacto decir que el constituyente que se forma cuando un acero se enfría por encima del punto A_1 , es amorfo, si se quiere significar con ello que es totalmente amorfo, ya que la estructura de un acero para herramientas enfriado es en gran parte cristalina. La teoría carbonista no explica la estructura martensítica de un acero enfriado, que debería com-

ponerse de cristales poliédricos que es la estructura típica de las soluciones sólidas. Además la dureza de un acero enfriado es muy superior a la que podría dar lugar la subsistencia del carburo de hierro en el hierro. Mac Cance ha sentado que al añadir carbono al hierro, la dureza de los aceros templados crece hasta la proporción de 0,7% de carbono, para mantenerse luego constante hasta que el carbono alcanza la proporción de 1,18%; la teoría carbonista no tiene explicación para este hecho. Mac Cance deduce de esto que para cualquier proporción de carbono una parte de la dureza obtenida por el temple es debida al hierro mismo, existiendo un límite en esta participación del hierro a la dureza comunicada por el temple. Debemos deducir de todo lo que antecede, que tanto los alotropistas como los carbonistas cometen un grave error atribuyendo exclusivamente al hierro la acción del temple o negándole toda participación.

Investigaciones de sir G. Beilby.—Otras investigaciones han modificado las ideas dominantes acerca del temple; en particular los importantes trabajos de sir George Beilby referentes a los estados dulce y duro de los metales. Se trata en ello de metales puros sin puntos críticos. Por lo tanto estas investigaciones no se han verificado acerca del hierro ni del acero; sin embargo, no por ello dejan de presentar extraordinario interés para los metalógrafos. Los experimentos se han llevado a cabo en su mayor parte sobre el oro, plata y cobre; se ha estudiado con el microscopio la estructura de estos metales y la manera cómo se comportan reducidos a hojas delgadas. El experimentador ha comprobado que durante la operación del pulido, se forma una capa superficial sobre la superficie pulimentada, lo cual es señal indiscutible de que ha pasado por un estado de perfecta movilidad como un líquido, aunque la operación haya sido efectuada a la temperatura ordinaria, que es inferior de algunos centenares de grados a los puntos de fusión de los metales de que se trata.

El metal mismo recocido se compone de cristales; pero la película formada por el pulimentado posee cualidades distintas que permiten diferenciarla netamente del resto de la materia inalterada situada debajo. Es mucho más dura y hasta cuando interesa una de las caras de un cristal, cuya dureza varía de ordinario según la dirección, le comunica la misma dureza en todos sentidos.

Puede disolverse esta capa superficial progresivamente; puede también formarse de nuevo por el pulido. Este descubrimiento ha abierto un nuevo campo de investigación sobre la estructura interna de los metales que han sufrido un endurecimiento por un trabajo en frío.

Sir George Beilby ha propuesto una teoría sobre los estados duro y dulce de los metales, según la cual la dureza resulta de la formación, en todas las superficies internas de señalamiento o de cortadura, de unas capas móviles semejantes a las que el pulimentado produce sobre la superficie exterior. Estas capas sólo conservan su movilidad durante un breve período, solidificándose en seguida al estado amorfo vítreo, formando un cemento en todas las superficies, de deslizamiento o de cortadura a través de toda la masa.

La base de esta teoría es, pues, la liquefacción instantánea seguida de la solidificación de láminas de moléculas durante las deformaciones mecánicas.

No se ha logrado jamás convertir un metal cristalino en un metal completamente amorfo, por la sola deformación. Sir G. Beilby ha tenido buen cuidado de explicarnos que, en su mente, amorfo significa no cristalino, en el sentido de que las moléculas no están agrupadas en el orden y sentido cristalinos, al paso que el calificativo *vítreo* queda limitado a aquellas substancias que toman la forma del vidrio al enfriarse, tales son los silicatos. El vidrio es una substancia amorfa típica, cuyas cualidades usuales dependen esencialmente del hecho de no presentar el estado cristalino; es también una substancia muy dura.

Gracias a minuciosos experimentos, sir G. Beilby ha podido demostrar que el constituyente amorfo que se forma por el trabajo en frío no es estable térmicamente, sino que por medio del recocido a temperatura conveniente, vuelve a aparecer el estado cristalino. Se han establecido diferencias muy marcadas en las propiedades de un metal, según que se presente completamente al estado cristalino o como un compuesto complejo de elementos cristalinos y vítreos amorfos. De este modo se ha reconocido que la fase cristalina de un metal determinado era térmicamente estable e inestable mecánicamente, mientras que sucede lo contrario para la fase amorfa.

Sir. G. Beilby ha dado la explicación siguiente del hecho de ser más duro el metal vítreo amorfo

que el metal cristalino. Un metal duro, es un metal más o menos rígido que resiste los esfuerzos sin sufrir deformación permanente. La rigidez depende de la estructura molecular. Una de las propiedades fundamentales de las moléculas individuales, es la de llenar el espacio oponiéndose a que las demás entren en su recinto; sus superficies de limitación son probablemente de naturaleza cinética, oponiéndose asimismo a la penetración. Otra propiedad fundamental de estas moléculas es la atracción que se ejercen mutuamente dando origen a la cohesión. En una masa de metal, como en todo aglomerado sólido, existe un determinado grado de cohesión que es el producto de la cohesión específica de cada molécula por el número de moléculas. Si adoptamos como forma molecular la más simple, que es la esfera, se pueden presentar distintos modos para realizar una estructura homogénea. Bajo el agrupamiento correspondiente a la mayor densidad cada esfera presenta contacto con otras doce; es la condición de máxima rigidez. Una tal disposición no es nada corriente en la estructura cristalina; pero existe.

En el cristal, la estructura no es necesariamente la más rígida posible. En las uniones de esferas menos bien dispuestas, podemos imaginarnos que la rigidez de la estructura puede aumentarse por el mero hecho de un ligero desplazamiento relativo de las distintas capas de moléculas.

Consideremos un agrupamiento de aquellas esferas moleculares en que cada una de ellas tendría contacto solamente con otras 6; si un desplazamiento tiene por efecto poner cada esfera en contacto con otras 12, claro está que la rigidez del nuevo agrupamiento será doble de la del anterior.

En los metales que cristalizan en el sistema regular, tales como el oro, la plata, el cobre, el hierro, etc., las moléculas no están agrupadas lo más juntas posible; el estado cristalino presenta una gran inestabilidad mecánica y por consiguiente una tenacidad reducida. De lo que resulta que las variaciones por deformación producen verdaderas rupturas que destruye la estructura cristalina, con liquefacción momentánea de determinadas capas y agrupamientos moleculares. Si esto tiene lugar por debajo de temperatura de cristalización, las partes nuevamente solidificadas no pueden ya adquirir la constitución cristalina; se solidifican dentro de un tipo de estructura más rígida, que permite una mejor utilización de la cohesión.

—En los metales dúctiles, la fluidez seguida de resolidificación, quita a un cierto número de moléculas algunas libertades de vibración.

—Si, pues la cohesión de la masa puede efectivamente utilizarse para restringir la vibración de las moléculas individuales, no tiene nada de extraño que se sujeten entre ellas fuertemente de tal modo, que su desplazamiento relativo bajo la acción de esfuerzos exteriores de deformación exija una fuerza mayor.

Podemos examinar ahora a la luz que arrojan estas importantes investigaciones, el temple del acero producido por un enfriamiento brusco, desde un punto de vista más elevado. Se sabe hoy día que existen cuatro medios distintos para endurecer los metales:

1.º Los metales dúctiles por el laminado en frío.

2.º Los mismos metales por su unión con otro metal, o con ciertos elementos no metálicos, tales como el hidrógeno, nitrógeno, carbono, etc.

3.º Si estas aleaciones son dúctiles, podemos endurecerlas todavía más por el laminado en frío, como se hace con el latón (70 de cobre y 30 de zinc).

4.º Pueden endurecerse algunas aleaciones por enfriamiento brusco. El temple del acero por enfriamiento pertenece a este caso.

Hay que recordar que una disminución brusca de temperatura puede actuar de dos maneras:

a) Haciendo permanente la forma de combinación química o de estructura, cristalina o amorfa, que estaba en estado de equilibrio a la temperatura en que el descenso brusco de la misma se ha iniciado.

b) Dando origen a esfuerzos de contracción en la masa enfriada, esfuerzos que pueden quedar, en totalidad o en parte, dentro de los límites elásticos o rebasarlos. Cuando estos esfuerzos rebasan el límite de elasticidad produciendo deformación permanente, hay endurecimiento como en el caso 3.º

Modernas teorías sobre el temple.—a) Teoría de Mac Cance.—Dos teorías han sido formuladas en mayo de 1914, la tercera en noviembre de 1914.

El Dr. Mac Cance, a quien se debe la primera, ha demostrado que la acción del carbono sobre el temple es indirecta, obteniéndose el máximo de dureza con 0,7 % de carbono, siendo el propio hierro el elemento que adquiere el temple. Consi-

dera que en el punto Ar_3 , el hierro γ pasa directamente al estado α (el hierro β considera que es el mismo α no magnético a causa de la temperatura).

Explica el desprendimiento de calor en Ar_2 por la rápida variación de calor específico que necesariamente acompaña la transición ferro-magnética, y dice: "Puesto que el hierro α pierde sus propiedades magnéticas a partir de una determinada temperatura, el hierro γ que a temperaturas aún más elevadas no es magnético, podría convertirse en magnético a temperaturas más reducidas." Sin embargo Hadfield ha demostrado que el acero al manganeso (hierro γ), no magnético, no se convierte en magnético, ni aun a la temperatura del aire líquido. Según Mac Cance, ya que no existe tratamiento alguno capaz de transformar en magnético el acero austenítico sin que el volumen específico quede aumentado al propio tiempo, hay que deducir que se ha transformado en hierro α , ya que la transición magnética no produce modificación sensible del volumen específico. He aquí las bases de su teoría acerca del temple. Puesto que aceros que a la temperatura del temple no son magnéticos, resultan serlo una vez endurecidos, es preciso que este cambio se haya efectuado durante el tiempo que ha durado el enfriamiento; por consiguiente ha habido transformación de hierro γ no magnético en hierro α magnético. Mediciones efectuadas sobre su resistencia eléctrica demuestran por otra parte que el carbono ha quedado en solución; así, pues, en las condiciones de rápido enfriamiento, la transformación de hierro γ en α puede tener lugar con entera independencia del paso del carbono del estado de solución al de precipitado. De modo que estas dos transformaciones, que con un calentamiento y un enfriamiento lentos tienen lugar simultáneamente, pueden comportarse como si fuesen dos reacciones independientes en un sentido limitado. Aunque puede considerarse la martensita como una solución concentrada de carbono en el hierro α , no hay que olvidar que subsiste todavía hierro γ con el carbono, el cual es absolutamente necesario para mantener la solubilidad, y que cualquier cambio de estado del carbono arrastra esta transformación de hierro γ en hierro α . Podría creerse que el hierro está combinado químicamente con el carbono; pero el examen de la curva que representa la pérdida de la intensidad de saturación magnética en función de la proporción de carbono, demuestra que el hierro γ

aumenta mucho más rápidamente que el carbono, lo que indica influencias puramente físicas, Mac Cance considera después el enfriamiento de un acero hipoeutéctico, es decir, con menos de 0,9 % de carbono. La transformación completa en hierro y cementita implica dos transformaciones distintas: a) cambio de estado del hierro γ que pasa a α ; b) cambio de estado del carbono. El primer cambio puede tener lugar con independencia del segundo; por el contrario, el segundo implica necesariamente que se produzca el primero. Por consiguiente tres casos son posibles:

1.º Las dos transformaciones tienen lugar, produciendo el acero perlítico que es dulce.

2.º Las dos transformaciones han quedado suprimidas. Este caso no se ha dado todavía en una aleación compuesta exclusivamente de hierro y de carbono; precisa una determinada cantidad de manganeso. En este caso se obtiene la austenita que aunque endurece más el acero que la perlita, resulta sin embargo más dulce que un acero templado.

3.º La transformación a) tiene lugar, pero no la b). Se obtiene la estructura martensítica. Según Mac Cance, el hierro α así formado está forzado y es muy duro.

El tercer caso es el más importante desde el punto de vista del temple. Para que sea posible, es preciso que exista una diferencia entre las velocidades respectivas de las transformaciones a) y b), de tal modo, que para una apropiada velocidad de enfriamiento, la transformación más lenta quede suprimida al paso que la más rápida podrá verificarse todavía.

Según Mac Cance, la causa del temple reside en el hierro α forzado. No acepta, pues, la teoría de Beilby de una fase dura amorfa vítrea, y dice que "al estado normal no forzado, los metales son cristalinos, dicho de otro modo, constituidos por grupos de átomos bien ordenados. Investigaciones efectuadas con la ayuda de los rayos X lo han demostrado; así, en el cobre se ha comprobado el sistema cúbico, con un átomo en cada vértice y otro al centro de cada cara. La deformación de tal sistema modifica la posición de cada átomo respecto del átomo próximo; una deformación permanente produce tal alteración que a lo largo de las superficies de deslizamiento, los átomos ya no pueden volver a ocupar la posición de equilibrio anterior. Esto es lo que corresponde al estado for-

zado de los átomos del que resulta el temple de la materia." Mac Cance admite que la destrucción de la estructura cristalina puede llegar hasta a producir, en los planos de mayor movimiento, materia realmente amorfa; pero no admite que esta fase amorfa sea dura.

La importante relación que existe entre la velocidad de enfriamiento y el temple está demostrada por el modo como se comportan las aleaciones de acero.

El manganeso agregado al acero, disminuye la temperatura de las transformaciones y su rapidez; de modo que con una proporción suficiente de Mn, aún en los casos de enfriamiento corriente la estructura resulta martensítica, y el acero duro y quebradizo. Una nueva adición de manganeso, impide toda transformación aunque el acero se haya enfriado a la temperatura ordinaria; se obtiene un acero austenítico. Enfriado al agua, el acero martensítico al manganeso, no solamente no queda templado, sino que resulta más dulce. Análogos resultados se obtienen con el níquel.

He aquí algunas cifras dadas por Mac Cance:

Un acero con 3,6 % de Ni y 0,19 % de C poseía una dureza normal de 183; calentado a 1000° C y templado al agua la dureza pasó a 444.

Otro acero con la misma cantidad de carbono, pero sin níquel, tratado del mismo modo pasó de 143 a 218. Como que en las condiciones del ensayo, el Ni no forma carburo y el estado del C queda el mismo en las dos aleaciones, el aumento de dureza es debido a la influencia del níquel sobre el hierro; Mac Cance da como explicación que el hierro se encuentra en las condiciones de sufrir un estado forzado de mayor intensidad, como consecuencia de la disminución de la temperatura de transformación del hierro γ en α . Se ha producido en este caso un aumento de rozamiento interno que retarda la transformación, conservando estados poco estables.

Según M. Carpenter, la teoría del temple de Mac Cance se apoya en un raciocinio ingenioso y sobre hechos bien sentados. Pero, actualmente, resulta incompleta ya que la acción del "forzamiento" constituye por sí solo una cuestión digna de estudio.

b) *Teoría de MM. Edwards y Carpenter.*—La segunda de las teorías más modernas sobre el temple es debida al profesor Edwards y al mismo M. Carpenter. Su punto de partida está en la ob-

servación que los aceros no constituyen las únicas aleaciones susceptibles de adquirir el temple por enfriamiento en el agua partiendo de temperaturas relativamente moderadas; son sencillamente importantes miembros de un grupo de aleaciones que poseen, si bien en grados distintos, las mismas características, aleaciones cuya constitución guarda cierto paralelismo a temperaturas elevadas, que experimentan cambios análogos al enfriarlos hasta la temperatura ambiente y que están sujetas a una descomposición a temperaturas críticas señaladas por fenómenos de recalcificación.

Al aumentar la velocidad de enfriamiento, el punto de transformación disminuye de temperatura y el desprendimiento de calor se hace menos importante. Existe, pues, tendencia a la supresión del punto crítico y del calor de inversión. Si tal caso llega, debe todavía proporcionarse energía a la pieza durante su enfriamiento para dominar la tendencia a la inversión. Se considera que esta energía es proporcionada de dos modos:

1.º Por la contracción brusca de la capa exterior o envoltura de la pieza.

2.º Por una contracción molecular de la masa, en combinación con la presión de disolución o presión osmótica del carbono disuelto, en el caso del acero.

Esta explicación es general y aplicable a todas las aleaciones que pueden endurecerse por enfriamiento brusco. Cuando en tales aleaciones, la variación de calor (recalcificación) queda suprimida, se desarrollan esfuerzos internos que rebasando el límite de elasticidad ocasionan por consiguiente un estado interior forzado de la materia; en el caso de los aceros, este estado forzado parece ser un hecho bien establecido. La martensita es sencillamente austenita desdoblada por este movimiento interno, produciéndose además, a lo largo de los planos o superficies de separación y deslizamiento, materia amorfa por deformación de los elementos cristalinos, materia que consideramos que es la correspondiente a la fase dura, vítrea, amorfa de Beilby, que produce el trabajo mecánico.

A fin de establecer esta teoría, es preciso probar que estas acciones tienen lugar efectivamente. La idea de un estado forzado interno durante el enfriamiento del acero, presenta, según el Dr. Rosenhaim, una dificultad insuperable y es que con todo y provocar importantes esfuerzos en los aceros, el enfriamiento no ocasiona ni desplazamiento

ni movimiento importante. Es cierto que durante el laminado en frío de un metal, precisan esfuerzos muy elevados para obtener una dureza considerable, pero en tal caso se trata de esfuerzos cuya dirección es constante a través de la masa, de manera que se suman todos los esfuerzos para dar como resultando un gran cambio de las dimensiones exteriores. Pero no sucede lo mismo con los esfuerzos desarrollados en los planos de deslizamiento debidos al temple por enfriamiento. No se dirigen en una misma dirección, sino en sentidos contrarios a lo largo de los distintos planos internos; no producen deformación de la masa en su conjunto. El examen microscópico da una idea manifiesta de estos esfuerzos internos, mostrando gran número de cristales aparejados de modo característico.

La martensita es entonces austenita deformada por la formación de capas amorfas a lo largo de los planos de deslizamiento del hierro γ . M. Carpenter hace observar que ha empezado ya a utilizar la teoría de sir G. Beilby (estado de la dureza amorfa) con el fin de explicar el temple del acero por enfriamiento, sugiriendo que se forma una materia amorfa a lo largo de los planos de deslizamiento del hierro. Lo que es preciso ahora es demostrar, en lo posible, que tales capas amorfas subsisten en el enfriamiento rápido. Beilby ha demostrado que, calentando metales templados, las capas amorfas cristalizan de nuevo y que la temperatura real en que esto tiene lugar varía con la naturaleza del metal y con el grado de temple comunicado. De acuerdo con esta afirmación, si, durante el enfriamiento, el modo de refrigeración es suficientemente rápido, la temperatura de la masa quedará inferior a aquella en que la recristalización es posible. Chappell y Goerens han demostrado, en el caso del hierro puro, que el *mínimum* de temperatura para el endurecimiento por medio de esfuerzos internos es de unos 500° C. Para un acero con 0,9 % de carbono, este *mínimum* es más elevado; no se sabe de cuántos grados. En el temple el acero se enfría a partir de una temperatura no superior a 800° C; queda, pues, un intervalo de 300° C.

Si nos referimos a un experimento de Benedicks, el tiempo empleado en franquear este intervalo ha sido exactamente de un segundo. Si se trata de una herramienta de 25 mm. de diámetro, precisará más tiempo al centro para franquear aquel inter-

valo; es probable que no se necesitarán más de 2 a 3 segundos para la superficie del útil. En tal caso las capas vítreas amorfas formadas no tendrán tiempo de recrystalizar y se habrá obtenido el temple. Por consiguiente, la causa final del temple por enfriamiento brusco es exactamente la misma que la de endurecimiento por el trabajo en frío. En resumen, la teoría de Edwards y Carpenter, es que el temple es debido a la formación de capas duras amorfas vítreas de una solución de carburo en el hierro γ , a lo largo de los planos de deslizamiento de la austenita.

Existe solamente una propiedad de los aceros enfriados que no encuentra explicación en esta teoría, y es que todos ellos son magnéticos. La propiedad magnética es casi seguro que va ligada a una orientación determinada de las moléculas en el hierro y el acero. Admitamos que el ferro-magnetismo sea una propiedad del hierro α ; para que la teoría y el hecho mencionado estén de acuerdo, bastaría adoptar la opinión de Mac Cance, a saber: que existe hierro γ que se transforma en α en el enfriamiento de todos los aceros.

c) *Teoría de M. J. G. Humfrey.*—La tercera de las modernas teorías del temple es debida a M. J. G. Humfrey y se funda en la hipótesis de que la dureza de un acero enfriado es debida a una fase dura amorfa; en esta forma se parece a la teoría anterior. Sin embargo, la formación de esta fase la busca haciendo consideraciones totalmente distintas. M. Humfrey examina primeramente lo que ocurre cuando un elemento pasa de una forma alotrópica a otra. Parte de la teoría de la estructura de un cristal, es decir, que los centros de gravedad de las moléculas están dispuestos según un plano geométrico y que en cada una de las moléculas de tales cristales los átomos están situados de modo semejante.

Si aparece un cambio alotrópico, los átomos de cada molécula cambian de disposición, y si la nueva forma de las moléculas implica una variación de las fuerzas que mutuamente se ejercen entre ellas, la nueva disposición resulta inestable y nace otra diferente. Antes de terminarse esta reorganización, pasarán por un período temporal de desorden; durante este período es cuando Humfrey considera la estructura como amorfa. Este estado intermedio corresponde al líquido que se formaría por la fusión de la fase sólida estable a temperatura más baja, si podía operarse regulando las con-

diciones para evitar la recrystalización subsiguiente.

Las curvas temperatura-tenacidad de Rosenhaim y Humfrey indican que los puntos de fusión del hierro α y del hierro β serían notablemente más reducidos que el del hierro γ , si se podían conservar sin transformación hasta sus puntos de fusión. Es un hecho digno de consideración el que los cambios físicos de estado no tienen lugar instantáneamente en todo el conjunto de la masa, sino que parten de determinados núcleos para dirigirse hacia el exterior. Según esto, Humfrey opina que la fase intermedia amorfa que existe durante una fase alotrópica comienza a recrystalizar, casi en seguida de iniciarse su formación, presentándose en cada momento del cambio, formada de capas delgadas situadas entre las fases cristalizadas co-existentes, aumentando estas capas a medida que avanza la modificación. La transformación de una fase cristalina en fase amorfa, tendría como una tendencia a seguir su curso a lo largo de los planos en que la libertad de movimientos es mayor, es decir a lo largo de los planos de deslizamiento de los cristales y quizás también en los límites inter-cristalinos.

Humfrey indica que la temperatura a la que se forma la nueva fase cristalina no debe ser demasiado reducida con objeto de que las fuerzas de cristalización puedan vencer la viscosidad de la fase amorfa. Si esta viscosidad es suficiente para impedir la recrystalización, la fase amorfa formada será prácticamente estable. Sin embargo aún en casos en que un cambio alotrópico tiene lugar normalmente a una temperatura muy inferior a la en que la viscosidad es suficiente para impedir la recrystalización, circunstancias anormales, tales como un enfriamiento rápido, pueden retardar la modificación muy por debajo de aquella temperatura. Apliquemos estas consideraciones generales al caso del acero. El hierro γ se transforma normalmente en hierro β a unos 900° C. La recrystalización del hierro α endurecido por el laminado es muy lenta por debajo de los 500° C; por lo tanto queda un intervalo, de 400° C. Si se trata de un acero con 0,9 % de carbono, este intervalo queda reducido, pues el hierro γ no se transforma sino a unos 700° C durante el enfriamiento. Se deduce de esto, que el aumento de la proporción de carbono, hace que la formación de la fase amorfa, como consecuencia de la desaparición del hierro γ , sea más

fácil que en el hierro puro. Hay que tener en cuenta otro factor que es el carburo de hierro, aparte del hierro. Cuando la austenita se destruye, se consideran las moléculas de carburo como "mezcladas íntimamente a las del hierro α ". Antes de que la materia amorfa pueda recristalizar, están por separar dos clases distintas de moléculas: las del hierro α y las del carburo de hierro; esta separación tendrá lugar lentamente en una masa viscosa enfriada y se considera un enfriamiento rápido como el medio más apropiado para efectuar el paso por la temperatura mínima de cristalización de modo suficientemente rápido para que ésta no tenga tiempo de efectuarse.

Benedicks ha demostrado que la presión facilita la conservación del estado austenítico en los aceros. El paso del estado cristalino al estado amorfo en los metales va prácticamente acompañado en todos los casos de un aumento de volumen; el hierro γ es más denso que el hierro α y por lo tanto más que el hierro α amorfo.

Humfrey afirma que después de la formación de una determinada cantidad de materia amorfa, la presión será suficiente para conservar la austenita en su estado, sin modificaciones.

Según Humfrey, la martensita es debida a dos constituyentes: 1.º el hierro γ (austenita); 2.º una solución amorfa de hierro α y de carburo; la forma según la cual intervienen estos dos constituyentes es debida a la tendencia de los cristales de austenita a romperse según los planos de formación. Puede observarse que la conclusión de Humfrey es casi idéntica a la del profesor Edwards y de M. Carpenter; la diferencia estriba solamente en el mecanismo de la modificación. Para pasar de una forma alotrópica a otra, Humfrey admite la existencia de un estado amorfo intermedio. Puede observarse que el paso del estado cristalino al estado amorfo implica una absorción de energía; Humfrey no ha explicado de donde puede proceder

esta energía en una masa de materia que se enfría lentamente; su teoría no quedará completa hasta tanto que no dé la explicación de este hecho.

Puede observarse que estas tres teorías modernas ofrecen semblanzas notables, a parte de algunas diferencias superficiales. La teoría de Humfrey y la de Edwards y Carpenter, atribuyen el temple a la existencia de un constituyente amorfo duro, en el acero. Mac Cance no va tan lejos, sino que considera el "estado forzado" como causa del endurecimiento. Es un estado que ocupa una posición intermedia entre las materias cristalinas y amorfas. Tal vez no esté lejos el día que Mac Cance desarrollará una teoría sobre este estado forzado.

Las violentas oposiciones que han dividido los campos de los alotropistas y carbonistas, no han tenido lugar en las escuelas modernas. Sin embargo, es interesante notar que M. Osmond tenía razón al atribuir la dureza a algún intermediario entre el hierro cristalino γ y el hierro cristalino α . La idea de que este intermediario sea un hierro cristalino β no ha quedado abandonada del todo, pero no es tenida en consideración hoy día por numerosos autores. Esta teoría ha cedido el sitio al estado de "forzado" del hierro, de Mac Cance, y al compuesto de hierro amorfo y de hierro-carburo de Humfrey, Edwards y Carpenter.

La importante influencia que ejerce el carbono sobre la cual insistían los carbonistas, está plenamente admitida en las teorías modernas. Las teorías antiguas han contribuido a aumentar el campo visual sobre el particular; las divergencias han quedado reducidas a su cuarta proporción; los elementos verídicos que contenían han sido incorporados a otras teorías que por el momento están en mejor consonancia con los resultados adquiridos, teniendo por seguro que a su vez se modificarán y extenderán a medida que prosperen nuestros conocimientos.

EL PROBLEMA DE LA DEPURACIÓN DE LAS AGUAS POTABLES

(Conclusión)

Con esto llegamos a la guerra europea y a la estabilización de los frentes, en interminables zonas atrincheradas, y todos los ejércitos beligerantes, incluso los alemanes (que hasta entonces se habían mostrado algo refractarios) adoptaron con resultados completamente satisfactorios diferentes variantes de este sistema, que ya en 1903 había sido aconsejado por Mr. Nesfield, del "Indian Army Medical Service", como el más propio para ser adoptado por los ejércitos en campaña para pobilar las aguas infectadas.

Posteriormente ha sido adoptado por otras muchas ciudades, entre otras por Londres, que en 1916 estableció la cloración de más de la mitad del caudal de aguas que abastecen dicha ciudad.

En la mayor parte de las instalaciones europeas se ha empleado el hipoclorito sódico (llamado impropriadamente agua de Javel), que tiene la ventaja sobre el hipoclorito cálcico de que en vez de aumentar la cantidad de sales de calcio en las aguas (que comúnmente ya están sobrecargadas de ellas) aumenta la cantidad de sales de sodio, que son menos perjudiciales que las del calcio. Pero el gran inconveniente del empleo de los hipocloritos, consiste en que su titulación en cloro activo es muy variable, y de ahí la dificultad de fijar la dosis en que deben ser incorporados al agua para que la esterilicen.

Lo muy perturbador que resulta esta variabilidad en el contenido de cloro activo de los hipocloritos, se comprenderá fácilmente si se tiene en cuenta que se ha podido comprobar con exactitud que 0,5 partes por millón (1/2 miligramo por litro) de cloro activo, basta para *destruir el bacterium coli* y por consiguiente el *B. de Ebert*, del agua que contenga muy poca materia orgánica y reducir a un *mínimum insignificante* las restantes

bacterias. Si el agua sólo contiene trazas de materia orgánica (la ausencia absoluta de la misma es incompatible con el hecho de estar el agua contaminada) y el tiempo de contacto es suficiente (de tres a cinco horas según la temperatura) 0,2 partes por millón y aun menos, pueden bastar para obtener resultados satisfactorios, pero si el agua lleva una cantidad de materia orgánica o de otras sustancias oxidables algo apreciable, entonces, según se desprende de la reacción (III), la dosis de *cloro activo* tendrá de estar en relación con la cantidad de sustancias oxidables que contenga el agua que debemos tratar.

Se han hecho *tablas y gráficos* que expresan la antedicha relación, pero la experiencia enseña que la cantidad de *cloro activo* que hay que incorporar en el agua debe determinarse experimentalmente en cada caso y en la propia instalación (1). Precisa, pues, conocer con exactitud la titulación del hipoclorito cálcico o del agua de Javel empleados, para determinar la cantidad en que deben incorporarse al agua, y ésta es la gran dificultad práctica con que se tropieza al tratar de emplear tan valioso recurso. Que no puede vencerse, ni aun preparándose electrolíticamente el agua de Javel en el mismo lugar del empleo, puesto que su riqueza en cloro activo está muy influida por las variaciones de temperatura, voltaje, riqueza de la solución de cloruro sódico, etc. Esta dificultad solamente puede vencerse haciendo numerosos y casi continuos análisis. Pues se comprende que si la dosis de hipoclorito fuese excesiva, como la reacción (III), sólo tiene lugar en presencia de sustancias oxidables,

(1) Así vemos que en la instalación de Jersey City, se empezó el tratamiento con una dosis de *cloro activo* de 1,4 partes por millón y luego por sucesivas reducciones se pudo comprobar que en ciertas épocas del año, 0,2 partes por millón bastaban para obtener buenos resultados.

quedaría ácido hipocloroso libre, que podría comunicar al agua un gusto algo desagradable.

* * *

Pero la solución verdaderamente práctica de este problema ha sido encontrada por los norteamericanos con el tratamiento de las aguas directamente con el *cloro puro*. El gas cloro se obtiene industrialmente en grande escala por la descomposición electrolítica, en determinadas condiciones, de la sal común. Después de secarlo y quitarle cuidadosamente las impurezas del gas, éste se condensa en forma líquida a presiones que varían entre 3.8 Kgs./cm². a 0° y 11.5 Kgs./cm². a 40° centígrados. Este líquido se encierra en depósitos cilíndricos de acero, análogos a los tan corrientemente usados para el gas carbónico, oxígeno, etc. Estos cilindros son de capacidad variable según las fábricas conteniendo desde 27 kgs. de cloro los menores, hasta 68 kgs. los mayores, y el peso del cilindro vacío varía desde 35 a 55 kgs. Al adquirir el cloro, cuando se destina a la esterilización del agua, hay que insistir en que sea lo más puro posible (99,5 por 100), pues el empleo de cloro impuro presenta algunos inconvenientes que luego expondremos.

El proceso de la esterilización del agua por el *cloro* y de su completa desaparición, parece ser el siguiente: El gas cloro se disuelve fácilmente en el agua (la solubilidad del cloro varía de 1 1/2 a 3 volúmenes, a las temperaturas corrientes), y luego bajo la acción de la luz o en presencia de sustancias oxidables, sean o no orgánicas, *la descompone lentamente*, verificándose la siguiente reacción:



se forma ácido clorhídrico y se desprende *oxígeno* y este (que en estado naciente tiene una gran actividad) destruye la materia orgánica y por consiguiente esteriliza el agua. El *cloro* ejerce, además, otra acción secundaria; ataca directamente ciertos compuestos orgánicos, substituyendo parcialmente al hidrógeno en sus propias moléculas, y con este hidrógeno que queda libre, forma también ácido clorhídrico (*). La pequeña cantidad de ácido clor-

hídrico formando en estas reacciones, ataca los carbonatos, transformándolos en cloruros y desprendiendo una pequeña cantidad de anhídrido carbónico. De modo que el resultado final es un aumento insignificante en los cloruros a expensas de los carbonatos, que en nada altera la potabilidad química del agua.

Los primeros ensayos para la esterilización de las aguas por el *cloro puro*, datan de 1910, en que el mayor G. R. Darnell, del ejército norteamericano, ideó el primer aparato para el tratamiento de las aguas con el *cloro líquido*. En 1912, el empleo del cloro líquido se ensayó en Filadelfia, por S. M. Van Loan; en Vilmington, por John A. Kienle; en Brooklyn, por D. D. Jackson, y en Niágara Falls, por H. F. Huy. Los resultados fueron más satisfactorios aún que los alcanzados por los hipocloritos; así fué que este procedimiento se extendió rapidísimamente, de modo que a fines de 1918 (que es hasta donde alcanzan las estadísticas que hemos podido proporcionarnos) había más de 2,500 instaladores en normal funcionamiento, tratándose diariamente por medio del cloro líquido más de 13.000.000 de metros cúbicos de agua. Y en aquella fecha, funcionaban aún en Norteamérica numerosas instalaciones en las que se trataba el agua con hipoclorito (algunas de las cuales sabemos que hoy han adoptado ya el cloro líquido), que depuraban más de 1.800.000 metros cúbicos de agua diariamente. De modo que se abastecía con agua clorinada una población de *más de 22 millones de habitantes*, es decir, mayor que la de toda España.

En la lista de las ciudades que han adoptado la clorinación de las aguas por el cloro líquido, figuran desde Nueva York, Chicago, Filadelfia, Detroit, Baltimore, etc., hasta poblaciones de menos de 5.000 habitantes, como Huntsville, Tex. Rocky River, O., etc.; este procedimiento ha sido también adoptado en la mayor parte de los cuarteles y campamentos del ejército norteamericano. Además, el ejército yankee, en su expedición a Europa, adoptó en todas partes este sistema de depuración de las aguas, no solamente en instalaciones semifijas, como campamentos de concentración de tropas, de reparación y distribución de material, hospitales, etc., sino que llevaba aparatos de campaña montados sobre ruedas, para acompañar constantemente a las tropas y evitar que alguna vez tuvieran que beber aguas infectadas. Los resultados

(1) A esta acción directa, o a otra causa aun no conocida, se atribuye el hecho de que el *cloro* tenga una acción tóxica sobre las bacterias, mucho mayor de la que le corresponde por su poder oxidante.

en campaña fueron tan excelentes como en las instalaciones fijas, y este sistema fué también adoptado por los ejércitos inglés y francés, substituyendo en muchos casos a la javelización, que, como sabemos, se practicaba ya por estos ejércitos, siempre que se veían obligados a usar aguas infectadas, o solamente si había sospechas de que podían estarlo. Es más aún, este sistema resulta tan económico, práctico y fácil de manejar, que últimamente en Norteamérica ha sido adoptado por muchos establecimientos públicos y particulares como asilos, hospitales, hoteles, etc., y resulta tan económico (1) que muchos Casinos y Clubs que tienen instaladas piscinas de natación, al renovar el agua no la tiran al alcantarillado, sino que la someten a una rápida filtración y la esterilizan con cloro líquido, no renovándola en el verdadero sentido de la palabra, sino después de haber circulado varias veces y con el único objeto de evitar que se cargue de una excesiva cantidad de sales.

Ultimamente, este sistema empieza a extenderse también fuera de los Estados Unidos de N. A., pues además del Canadá, en donde su desarrollo fué casi paralelo al de los Estados Unidos, también tenemos noticia de que hay varias instalaciones en la América del Sur y en Europa, entre otras en Buenos Aires, La Habana, Lima (Perú), Barranquilla (Colombia), Richmond, Mansfield y Tombridge (Inglaterra) (hoy podemos dar ya la noticia de que está en estudio la instalación de un aparato en Barcelona) de modo que hoy día, más de 30 millones de personas consumen agua clorinada, es decir, esterilizada con cloro líquido.

La gran dificultad con que se ha tropezado, y que es a nuestro juicio la única que ha retrasado el empleo del cloro puro en la esterilización de las aguas, es su gran poder corrosivo, sobre todo cuando está húmedo; además, como ya sabemos, su actividad es tan grande, que obliga a medir pequeñas cantidades de gas con una gran exactitud.

En vista de los excelentes resultados que se obtenían con el aparato ideado por Mr. Darnell, que, aunque muy imperfectamente, vencía las an-

(1) El cloro (según las últimas cotizaciones) cuesta franco bordo Liverpool a 6 d. por libra sin envase, pues las fábricas de cloro admiten su devolución. Teniendo en cuenta flete, seguro y devolución de los envases, debe contarse a 11 d. por libra franco bordo puerto español. A esta cantidad hay que añadir las aduanas, que no las contamos por estar en período de revisión.

tedichas dificultades, han sido varios los ingenieros y constructores que se han dedicado a construir aparatos para purificar las aguas con cloro líquido, pero casi todos han ido cayendo en desuso, empezando por el de Mr. Darnell, y en la actualidad, sólo hay tres o cuatro talleres que construyen aparatos para esterilizar el agua con el cloro líquido y uno de ellos es el de la casa "Wallace & Tiernan C^o", de Nueva York, que fabrica aparatos de 15 modelos distintos, de modo que entre ellos siempre nos será posible escoger uno que se adapte a las condiciones del abastecimiento que tratamos de depurar.

Estos aparatos, en los que se ha logrado vencer casi en absoluto las antedichas dificultades, se construyen de las más diversas capacidades (el tamaño varía poco) y además tienen una gran elasticidad, de modo que, con el mismo aparato, se pueden suministrar cantidades muy variables de cloro, y por consiguiente, depurar volúmenes muy diversos de agua.

El aparato de menor capacidad puede medir y suministrar con exactitud una corriente de cloro tan pequeña como es 0,187 gramos por hora (62 cm³ a 14^o), que aplicados al agua a la razón más

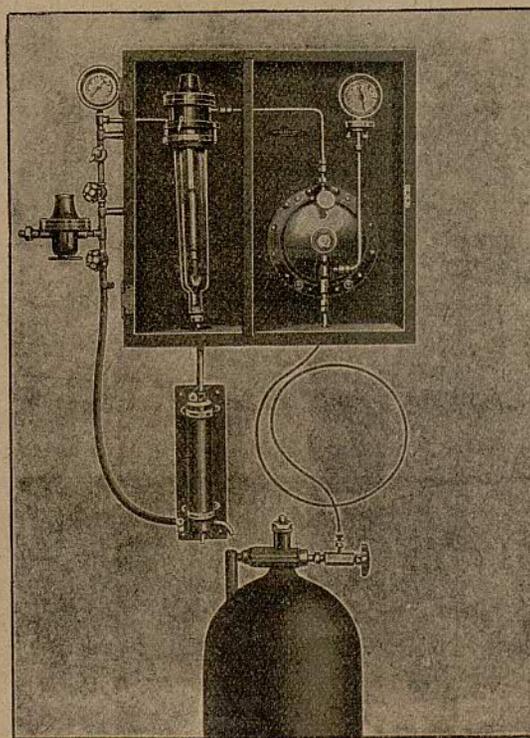


Fig. 1.—Aparato clorinador, modelo M. S. A. de la casa Wallace & Tiernan.

corriente, de 1/2 milígramo por litro, corresponde a unos 375 litros por hora, y el de mayor capacidad puede medir e incorporar al agua una cantidad de cloro que llega a 5,662 kgs. por hora, y que aplicados al agua en la misma proporción antedicha de 0,5 miligramos por litro, corresponden a un caudal de agua de 11,325 m.³ por hora, o sea 271, 800 m.³ de agua diarios.

Los 15 modelos distintos de aparatos que construye la casa Wallace y Tiernan pueden agruparse en dos tipos generales. El uno es el tipo de "alimentación seca" o "directa", el cual conduce el cloro al agua en forma de gas; y el otro es el tipo de "solución" o de "alimentación líquida", el cual disuelve el gas en una pequeña cantidad de agua y luego conduce la solución de cloro que resulta de ese procedimiento al agua que se desea desinfectar. Cada uno de esos tipos se construye con tres distintos sistemas de regulación, a saber, a mano, semiautomático y automático.

En el aparato de regulación a mano es necesario actuar sobre la válvula de regulación con cada aumento o disminución del volumen de agua sometida a desinfección para entonces poderle aplicar el cloro en la proporción previamente determinada.

Los aparatos de regulación semi-automática, difieren solamente de los anteriores, en que la corriente de cloro queda cortada, cuando se interrumpe la corriente de agua que debe esterilizarse y se pone de nuevo en marcha por sí solo, cuando se reanuda la circulación del agua. Pero la cantidad de cloro que se suministra por hora, debe regularse a mano. Conviene principalmente, a los abastecimientos de aguas equipados con una bomba, pues que cuando esta funciona, proporciona un caudal de agua constante que se almacena en un depósito y el mayor o menor consumo se regula con más o menos horas de funcionamiento.

Los aparatos de graduación automática, gradúan la cantidad de cloro suministrada, de acuerdo con el caudal de las aguas que deben ser tratadas. El funcionamiento automático puede obtenerse por medio de un tubo Venturi, un flotador o un tubo de Pitot. De todos modos, las casas constructoras sólo garantizan el exacto funcionamiento, cuando las variaciones de caudal tienen lugar dentro de ciertos límites.

En la descripción de estos aparatos, hoy solamente me referiré a los de la casa Wallace & Tiernan, dejando para otro artículo, la descripción de otros tipos de aparatos, a fin de poder dar idea detallada del tipo que hoy puede considerarse como el más perfecto de los que existen en el mercado; así procuraremos tener a nuestros lectores al corriente de todo lo que se haga sobre esta materia, pues difícilmente encontraremos puntos más interesantes a tratar que los que se refieren a la salud pública.

Estos aparatos constan en esencia de un regulador de presión, una válvula para graduar la cantidad de cloro, un aparato medidor del mismo y un dispositivo para disolverlo, ya sea directamente en el agua que vamos a tratar (aparatos de aplicación directa) ya disolviéndolo previamente en una pequeña cantidad de agua. A estos aparatos se les suministra el cloro conectándolos a uno o varios bidones de acero de los ya anteriormente descritos.

En la fig. 1 reproducimos una fotografía de un aparato tipo M. S. A. *Manual Control solution feed Chlorinator* (Aparato clorinador de regulación manual tipo A de solución). Y la fig. 2 es un esquema del mismo aparato para poder seguir su descripción.

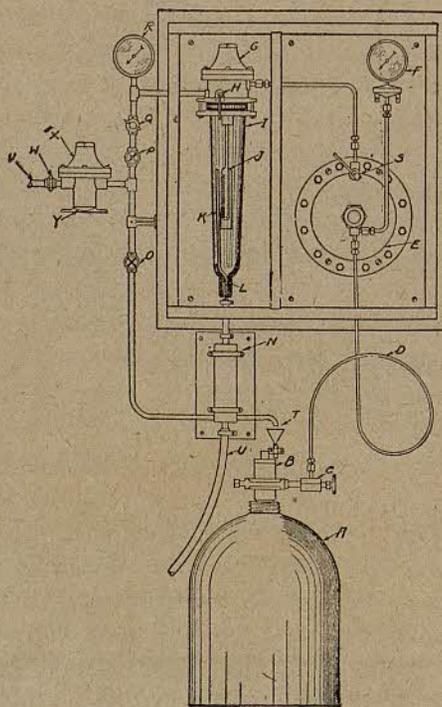


Fig. 2.—Clorinador tipo M. S. A.

ORGANOS Y PIEZAS QUE COMPONEN EL APARATO

- A — tanque o bidón que contiene el *cloro líquido*.
- B — válvula del tanque de cloro.
- C — válvula auxiliar.
- D — tubo de conexión flexible.
- E — regulador de presión.
- F — manómetro que indica la presión del cloro en el tanque.
- S — válvula para graduar la cantidad de cloro.
- G — válvula que impide el retroceso de la humedad al interior del mecanismo de regulación.
- H — válvula para regular la cantidad de agua e impedir que el cloro se introduzca en las conexiones de la toma de agua.
- J — medidor del cloro (tipo de pulsación).
- I — recipiente en el que se verificó la disolución del cloro.
- K — L — tubo por donde sale la solución del cloro.
- V — tubería por la que llega el agua de alimentación.
- P — válvula del agua.
- R — manómetro que señala la presión del agua.
- N — cierre hidráulico.
- O — válvula del agua en el tubo de conexión con el cierre hidráulico N.
- T — derrame del agua del cierre hidráulico.
- U — tubo de conducción de la solución de cloro al punto de su aplicación.
- X — válvula para reducir la presión del agua (cuando es necesario).
- Y — colador.

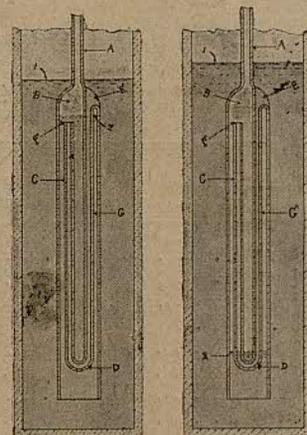
FUNCIONAMIENTO.—Al abrir las llaves *B* y *C* el cloro líquido contenido en el cilindro *A* se expansiona y recobra el estado gaseoso, por el tubo *D* el cloro pasa al compensador de presión *E* (que es del tipo de diafragma metálico) y a la válvula de regulación *S* que, gracias a una doble rosca diferencial, permite regular la cantidad de cloro con una gran precisión; luego, por medio de un tubo de cobre plateado, pasa a la válvula de retención *G*, que sólo se abre en un sentido de modo que impide la entrada de la humedad en el mecanismo de regulación, y entra luego en el *medidor de pulsación J* (que luego describiremos). El medidor de pulsación está alojado en el interior de la cámara de disolución *I*, a la que llega el agua a presión, procedente de la conducción *V*, de modo que el cloro al salir del medidor es inmediatamente

disuelto por el chorro de agua que bate y agita enérgicamente la superficie.

La solución ya formada sale por el tubo *K-L* y por medio del tubo *U* se la conduce al punto donde deba aplicarse al agua que hay que tratar. Cuando por aplicar la solución de cloro, a un tubo de presión variable, como por ejemplo, el tubo de aspiración de una bomba, tenemos variaciones de presión o succiones en el tubo *U*; para que no influyan en el buen funcionamiento de la cámara de absorción, se establece un cierre hidráulico *N*.

El tamaño de este aparato y el de todos los clorinadores en general, es muy reducido, pues que la correspondiente vitrina de pared en la que va encerrado y que puede verse en las figs. 1 y 2 mide tan sólo 51×54 cm.

La parte más importante de un aparato clorinator, es el *medidor del cloro*, pues que dada su extraordinaria actividad nos es indispensable disponer de un aparato seguro y preciso. El medidor del aparato que estamos describiendo, es del tipo de *pulsación* o de *sifón invertido*. En las figs. 3 y 4 podremos ver su construcción y seguir su funcio-



Figs. 3 y 4

namiento. En la figura 3 vemos los niveles del agua 1 y 2 antes de empezar la pulsación y en la fig. 4, vemos los mismos niveles en el instante antes de empezar la descarga del cloro por el tubo *C-D-G*, con lo que se completa una pulsación.

Su funcionamiento es como sigue: El *gas cloro* después de pasar por la *válvula de retención*, llega continuamente por el tubo *A*, se acumula en la cámara *B* y haciendo presión sobre la superficie del agua 2 (fig. 3), la empuja hacia abajo y la hace descender hasta que alcanza el punto *D* (fig. 4), en-

tonces el sifón *C-D-G* se interrumpe en *D* y por consiguiente, deja paso al cloro que se escapa en burbujas por *E*, mientras el nivel del agua en la cámara *B* asciende de nuevo hasta que alcanza el extremo *F* del sifón, con lo que se completa una pulsación. La cantidad de gas entregada por esta pulsación, es naturalmente igual al volumen del compartimento *B* entre los puntos *F* y *D*.

Es este un medidor volumétrico de funcionamiento hidráulico. Por consiguiente, mientras funcione tiene que darnos mediciones exactas. Además tiene la ventaja de que siendo de cristal la cámara de disolución y el medidor, el operario que cuida del aparato ve el cloro a medida que pasa por el medidor. Su funcionamiento es correcto entre límites muy amplios, desde un mínimo de 0,10 libras (45 gramos) hasta un máximo de 12 libras (5,436 Kg.) de cloro en 24 horas.

Cuando se tienen que depurar caudales de agua muy pequeños se usa un aparato análogo al ya descrito, pero equipado con un medidor de borbotamiento, que mide el caudal de cloro por el número de burbujas, de un calibre determinado, que pasan

por minuto y con el cual pueden medirse cantidades de cloro comprendidas entre un mínimo de 0,01 de libra (4,5 gramos) hasta 1 libra (453 gramos) en 24 horas.

Cuando se trata de depurar grandes cantidades de agua, y por consiguiente, de aplicar grandes cantidades de cloro, se utilizan medidores manométricos que miden el gasto de cloro por la pérdida de carga que experimenta al pasar por un orificio, practicado en una placa de cristal y cuidadosamente calibrado. El gasto de cloro se lee en una columna de líquido muy visible en el tubo interior del manómetro. Estos medidores manométricos se utilizan también en todos los aparatos de aplicación seca o directa.

* * *

En cuanto a los resultados sanitarios obtenidos con la clorinación del agua, creo que el adjunto cuadro es más elocuente que todo lo que sobre ello pudiéramos decir.

EFFECTOS DE LA CLORINACIÓN SOBRE EL NÚMERO DE DEFUNCIONES PRODUCIDAS POR LAS FIEBRES TIFOIDEAS

PROMEDIO DE DEFUNCIONES POR TIFOIDEA EN 100,000 HABITANTES (*)

CIUDAD	Fecha en que empezó la clorinación	Antes de usarla		Después de usarla		Tanto por ciento de reducción
		Período	Defunción	Período	Defunción	
Baltimore	Junio 1911.	1900-10	35.2	1912-15	22.2	36
Cleveland	Septiembre. 1911.	1900-10	35.5	1912-16	8.2	77
Des Moines.	Diciembre . 1911.	1905-10	22.7	1911-13	18.4	41
Erie.	Marzo 1911.	1906-10	50.6	1912-14	15.0	70
Evaston, Ill	Diciembre . 1911.	1908-11	29.0	1918-18	14.5	50
Jersey City	Septiembre. 1908.	1900-07	18.7	1909-16	8.4	55
Kansas City	Enero. 1911.	1900-10	42.5	1911-16	14.2	66
Omaha, Neb.	Mayo 1910.	1900-09	22.5	1911-16	10.6	53
Trenton	Diciembre . 1911.	1907-11	46.0	1911-14	28.7	35
Montreal	Febrero . . 1910.	1906-10	40.0	1911-16	25.0	87
Toronto.	Abril 1911.	1906-10	31.2	1912-16	7.8	75
Ottawa	Septiembre. 1912.	1906-10	34.0	1913-17	17.0	50

(*) Tabla copiada de la obra *Chlorination of Water*, de J. Race.

Los resultados que en esta tabla se consignan son únicamente debidos a la clorinación, en estos abastecimientos no se usó otro medio de purificación durante el período a que se refieren. Excepto en Toronto donde una parte del agua se la sometía a la filtración.

Se ve que desde que fué adoptada la clorinación, la mortalidad por fiebres tifoideas se redujo apro-

ximadamente en un 50 % y que los promedios durante el período posterior al establecimiento de la clorinación son casi todos menores de 20 por 100.000 habitantes, siendo esta una proporción que hace pocos años se hubiera considerado como muy satisfactoria.

S. A.

Ing. Industrial.