

Micrometalografía

POR

MIGUEL LETELIER

(Resumen de la conferencia dictada en el Instituto de Ingenieros de Chile,
el 28 de Julio de 1920)

No sin temores bien fundados he de entrar a tratar el tema de esta disertación; es árida en demasía; y si en ello no difiere de los tópicos que ocupan la atención del ingeniero, se distingue de éstos en que aquella propiedad es sólo objetiva, en que la micrometalografía, sea, como lo temo, al ser tratada en nuestro Instituto, objetiva y subjetivamente árida y falta de interés...

En efecto, las aplicaciones de la micrometalografía aún aparecen como innecesarias en el campo de nuestra actividad profesional en Chile, donde aún no producimos industrialmente el hierro y el acero sino en mínima escala, y no está nuestra incipiente industria en situación de seguir los dictámenes minuciosísimos del microscopio para criticar sus productos, ni el consumidor para apreciarlos; donde los artículos elaborados de hierro y de acero apenas si conseguimos se ajusten a un pliego de condiciones amplio y poco riguroso, aplicado sin severidad y que debe, en elevadísima proporción de casos, doblegarse a las exigencias momentáneas de la necesidad urgente y del mercado.

Casos ha habido, sin embargo, y he tenido ocasión de constatarlos dolorosamente, en que el conocimiento y aplicación de la micrometalografía, podría habernos ahorrado accidentes ferroviarios de dolorosas consecuencias, al revelarnos oportunamente los posibles defectos de fabricación que contenían partidas de ejes de locomotoras, de llantas y de rieles, defectos que los ensayos de recepción prescritos por los pliegos de condiciones no son capaces de cautelar eficazmente. Más amplia aplicación tendría también esta nueva rama de la ciencia en la revisión y recepción

del material empleado y recibido, en nuestro material de guerra, terrestre y marítimo, como asimismo para apreciar la calidad de todos los aceros especiales para herramientas y empleos más delicados que necesitan las maestranzas y fábricas del Estado y de los particulares.

Si bien es cierto que el manejo de la micrometalografía en estas aplicaciones, requiere el ejercicio, el criterio y la ciencia de un especialista, no lo es menos que en el estado actual de los conocimientos técnicos no puede ser desprovisto de interés para el ingeniero conocer los fundamentos siquiera de esta especialidad no estudiada hasta hoy entre nosotros, y de que hacen continua aplicación las revistas técnicas que pasan por las manos de los que desean estar al día en el intenso movimiento técnico de nuestra época. Este pensamiento es el que me ha ayudado a aceptar una invitación de nuestro digno y estimado Presidente Sr. Francisco Mardones para que ocupara una de las veladas del Instituto con una disertación sobre esta materia.

No me ha sido por cierto tarea llana y sencilla dar forma precisa a esta materia. Apoyada como está en profundas cuestiones de Química, ciencia que no es de mi especialidad, y en una base de experimentación copiosísima pero repartida en numerosísimas publicaciones y nunca reducida a un cuerpo de doctrina, y teniendo como tercer punto de apoyo, para mí, las aplicaciones de laboratorio que a veces he debido hacer de micrometalografía conforme a reglas de procedimiento y manipulación que mucho tienen aún de empírico, bien se comprenderá que no es tarea sencilla preparar una disertación, si a ello se agregan deficiencias personales bien notorias.

La micrometalografía puede evidentemente ser aplicada a todos los metales y a sus aleaciones y de hecho se extiende de día en día el campo de sus investigaciones; si involuntariamente asociamos en el uso corriente el nombre de esta rama de las investigaciones experimentales al estudio de los materiales férricos, y en especial al acero, es porque allí ha encontrado su campo de mayor amplitud y de más grande interés práctico.

Por esto mismo en la presente disertación nos referiremos únicamente a la micrometalografía de dichos materiales, y será sólo extensiva a otros metales la descripción del instrumental y procedimientos generales de observación.

Un poco de historia de esta rama de la investigación científica, nos permitirá precisar las ideas al respecto.

Las primeras investigaciones microscópicas de los metales se remontan ya

casi medio siglo; en 1864 el doctor Serby de Sheffield y el profesor Martens de Berlín en 1878, hicieron las primeras publicaciones al respecto. A pesar de esta diferencia de fecha los trabajos de Martens presentan todos los caracteres de una completa originalidad. En tanto que el primero se proponía crear una técnica completa para el examen de cortes de los cuerpos opacos bajo fuertes agrandamientos, y aplicaba su procedimiento a los diversos productos de la metalurgia del hierro, el profesor Martens estudiaba de preferencia las leyes generales de las quebraduras, rupturas, sopladuras y cristalización de los metales sin olvidar el estudio de los cortes. El Dr. Weddgin de Berlín hizo ya desde entonces numerosas investigaciones acerca de la estructura de los aceros y a él se deben las primeras reproducciones fotográficas de agrandamientos microscópicos de los cuerpos opacos. En Francia ya en 1880, Mr. Barba había introducido en los talleres del Creuzot el uso del microscopio y daba rumbos de práctica aplicación a las investigaciones de M. Osmond y de Worth.

En seguida este nuevo método de investigaciones se reparte profusamente en todos los centros en que el estudio de los metales tiene algún interés especulativo y práctico; el número de investigadores se multiplica con rapidez y los progresos de la micrometalografía se acrecientan de día en día y sus aplicaciones pasan del gabinete del investigador a los talleres metalúrgicos y de construcción, sus dictámenes empiezan a figurar en los pliegos de condiciones y sus principios a constituir capítulos obligatorios en la enseñanza de los institutos profesionales y politécnicos.

No se puede recordar los orígenes de este método de investigación y también su progreso sin mencionar y repetir principalmente los nombres de Serby, Martens, Osmond, Austen y Le Chatelier.

En Alemania fué donde primero esta ciencia tuvo consagración oficial. Bajo la dirección del profesor Martens el Instituto Técnico de Charlottenburgo estableció una instalación completa de micrometalografía, que permitía no solamente hacer investigaciones aisladas sino que también ofrecía a los industriales los medios de verificar sus productos metalúrgicos.

Pasemos ahora, antes de entrar en la técnica de esta materia, a presentar los fenómenos que, en los productos metalúrgicos del hierro, se propone estudiar.

Séanos permitido plantear la cuestión con los propios y precisos términos que emplea Mr. Osmond en su interesante memoria que sobre esta materia presentó a la "Comisión des Methodes d'Essai des Matériaux de Construction" en 1895, ya que esos términos han sido hasta hoy sólo completados y no modificados.

Supongamos un cuerpo metálico cualquiera (cuerpo simple, aleación o cuerpo

compuesto) que posea, en cada una de sus partes tan pequeñas como se las pueda obtener por los procedimientos mecánicos de división, una composición química constante; este cuerpo es químicamente homogéneo por definición; pero esto no significa en manera alguna que sea mecánicamente homogéneo. En efecto, bajo la influencia de fuerzas cristalinas de una parte y, por otra, de las tensiones o compresiones que determinan durante el calentamiento o enfriamiento las desigualdades de temperaturas de la masa, todo metal se organiza en elementos figurados de estructura. Estos elementos pueden ser, según las circunstancias que han dado lugar a su organización, más o menos diferentes e individualizados; pero si dos elementos idénticos están separados el uno del otro por una zona menos compacta o por planos de clivage o cristalización, o por junturas expandidas o contraídas, es claro que la adherencia entre dos elementos vecinos podrá ser muy diferente de la que existe en el interior de un elemento homogéneo; las propiedades mecánicas del sistema dependerán a la vez de las propiedades individuales de un elemento (que serán estas funciones de la composición química y del estado molecular) y de las relaciones de afinidad entre dos elementos vecinos.

Este mismo tendrá lugar, y con mayor razón, si el cuerpo considerado no es químicamente homogéneo; la masa es en este caso formada de muchos elementos, y cada uno posee propiedades individuales y distintas afinidades de adherencia para con los otros; las propiedades mecánicas del sistema tendrán, por consiguiente, una resultante compleja.

En una palabra, los cuerpos metálicos son análogos a las rocas; y como el estudio de éstas ha dado origen a una ciencia especial, la petrografía, análogamente el conocimiento exacto de los metales exige la creación de una ciencia correspondiente, la metalografía.

Los senderos de esta nueva ciencia habrán de ser bien definidos, como se desprende de las consideraciones anteriores; primeramente amplia plataforma experimental, construida de numerosas observaciones para los diversos metales, en sus diferentes estados de naturaleza, forma, dimensiones, proporciones, distribución local y repartición general de los distintos constituyentes examinados en quebraduras y cortes. Esto habrá de ser y ha sido su etapa descriptiva.

Más tarde, ya en posesión de los datos experimentales suficientes, esta ciencia habría de relacionar los hechos observados:

1.º a sus causas, averiguando cómo un mismo metal cambia de estructura, bajo la influencia de estos tres factores combinados, la temperatura, el tiempo y la presión;

2.º a sus consecuencias, definiendo las propiedades mecánicas que corresponden a una estructura determinada.

Este doble estudio enseñará a los consumidores qué estructura deben exigir en un metal para que satisfaga a necesidades determinadas; a los productores, qué procedimientos deben emplear para obtenerlos; es decir, la metalografía debe ser el lazo de unión necesario entre la fabricación de los metales y su empleo.

*
* *

Pasemos ahora a tratar de la metalografía de los materiales férricos, hierro y acero en especial. Todos los que de esta materia se ocupan, empiezan la descripción de estos cuerpos empleando la figura de comparar el hierro y el acero lentamente enfriado a una roca granítica.

Tal como el granito es un conglomerado, una mezcla mecánica de distintos granos cristalinos de tres minerales perfectamente distintos, cuarzo, feldspato y mica, así el hierro y el acero en su estado usual y corriente a que llega después de enfriado lentamente, consisten en una mezcla de partículas microscópicas de cuerpos casi minerales completamente distintos entre sí; éstos son los designados con el nombre de *Cementita* y *Ferrita*.

Es la primera un carburo triférrico Fe_3C , más duro que el vidrio y tan frágil como éste, probablemente muy resistente bajo esfuerzos axiales y gradualmente crecientes, de cristalización ortorrómbica, en placas. Dureza 6 en la escala de Mohs.

La ferrita es hierro casi químicamente puro, maleable, poco tenaz, de alta conductibilidad eléctrica y en general en todo semejante al cobre, excepto en el color; la proporción de impurezas que contiene es siempre menor 0,05 % y tal vez mayor que 0,02 %.

Si consideramos el hecho que 1% de carbón hace que 15% de dúctil y blanda ferrita es reemplazada por la durísima cementita, no habremos de sorprendernos que aún pequeñísimas cantidades de carbón modifiquen tan profundamente las propiedades del metal.

A más, el carbón afecta las propiedades del hierro, no sólo por la variación de proporción de dura cementita que ocasiona, sino también influyendo muy notoriamente en que el hierro se nos presente en diversas formas alotrópicas, que se designan comunmente con los nombres fierro α , β y γ de que nos ocuparemos más adelante.

Así, por ejemplo, enfriado bruscamente el acero desde la temperatura del rojo, queda el carbón, no en combinación definida, como la cementita, sino en parte disuelto en hierro en sus formas alotrópicas β y γ en el estado que se designa con los nombres martensita y austenita, de que nos ocuparemos más adelante, sustancias

a la vez duras y no desprovistas de tenacidad, que constituyen principalmente los aceros endurecidos y retemplados de los instrumentos cortantes y aceros rápidos. Si la proporción de carbón de un acero sube de 2 %, pasa aquél efectivamente al estado de carbón grafitico que, en sí mismo blando y suave, convierte al hierro, más que lo hiciera ningún otro cuerpo, en poco tenaz y frágil, por dañar sin duda la continuidad de su estructura; es el paso de los aceros hacia el hierro fundido o fundición.

Los fenómenos que hemos mencionado en los párrafos anteriores se hayan sintéticamente definidos en el diagrama llamado de "hierro carbón" o diagrama de Austen (en nombre de su autor) que es el que representa la figura 2.

Para su mayor comprensión, expliquemos cómo se genera.

Sigamos con un pirómetro registrador de gran precisión el curso del enfriamiento de un hierro y elijamos para ello el hierro más puro que sea posible obtener, aquel que sólo contiene 3/10 000 partes de impureza, y elegimos este hierro para no atribuir a las impurezas que contenga, ya que tan mínimas son, las modificaciones de propiedades y fenómenos que vamos a observar durante el proceso del enfriamiento.

Desde el punto de fusión, 1505° centg. hasta 900°.—próximamente, el descenso de la temperatura es gradual y continua y podría representarse por la línea A C del diagrama de la figura 2. Llegado el enfriamiento a la última temperatura mencionada, una brusca y amplia evolución de calor se verifica, capaz de detener el enfriamiento por algún tiempo. En seguida el enfriamiento continúa durante un cierto espacio, hasta que una nueva evolución de calor se produce, pero diferente en carácter y en intensidad a la primera, y se extiende entre un intervalo mayor de temperatura, aproximadamente entre 780 y 740. En este último caso la evolución no es suficiente para detener completamente el enfriamiento.

Más abajo de este punto, nada de anormal presenta la curva de enfriamiento hasta la temperatura ordinaria.

Estas dos zonas de evoluciones de calor fueron notadas y correctamente observadas por los primeros investigadores de estas materias y señaladas como puntos críticos en el proceso de enfriamiento del hierro y fueron denominadas por su descubridor Mr. Osmond Ar₃ y Ar₂. Desde el punto de fusión hasta Ar₃ el hierro es conocido bajo la denominación de hierro γ c austenita; entre Ar₃ y Ar₂ se le llama hierro β y hacia abajo de Ar₂ hierro α .

Estas tres variedades de hierro tienen propiedades características distintas, entre las cuales podemos señalar las siguientes; el hierro γ es completamente no-

magnético y tiene un alto poder disolvente del carbón, propiedad esta última que varía con la temperatura; tiene, a más, forma cristalina característica.

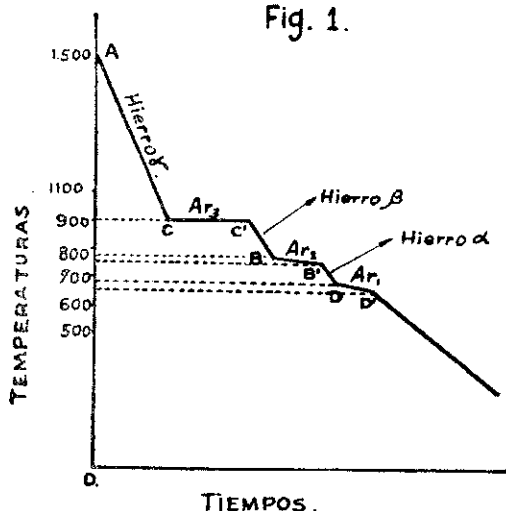
El hierro β es también no-magnético, pero su capacidad para disolver carbón es casi nula, también tiene una forma cristalina característica.

El hierro β es eminentemente magnético, pero por lo demás se asemeja notoriamente al hierro β y la diferencia en sus sistema cristalino no ha sido aún descubierta.

Largas y complejas discusiones se han trabado en los últimos años y aún hoy

LÍNEA DE ENFRIAMIENTO.

Fig. 1.



mismo acerca de si estas tres variedades de hierro son sólo formas alotrópicas del propio metal. La cuestión no ha sido aún resuelta en definitiva, debido talvez, en gran parte, en no coincidir en el sentido y definición del término alotropía. Como hemos de usar repetidas veces este término en esta disertación, empezaremos por definirlo diciendo que entendemos por alotropía la diferencia de aspectos y de propiedades con que una misma sustancia se presenta según modificaciones íntimas de su manera de ser o existir. Si, por ejemplo, un cambio de cristalización se fija como criterio de alotropía, el hierro γ será un estado alotrópico, y los hierros β y α constituirán otro grupo alotrópico, diferenciándose solamente entre sí estos dos últimos en que el estado β es el mismo que el α que ha perdido, por efecto de la temperatura, su poder magnético. Podrían tomar también la capacidad o virtud

magnética como criterio de alotropía, y la formación de los grupos sería entonces diversa.

Añadiendo carbón al hierro y formando así acero, se observa una marcada influencia en los puntos críticos Ar_1 , Ar_2 y Ar_3 y en el punto de fusión del metal, o digamos más bien en la combinación o aleación hierro-carbón.

Así, por ejemplo, el punto de fusión baja hasta llegar a ser de 1150° , cuando el porcentaje de carbón llega a 4,15 %, para volver a subir en seguida: uniendo los diferentes puntos de fusión de los productos férricos, referidos a una proporción de carbón en %, tendremos la curva de fusión representada en A B C en el diagrama hierro carbón; hacia arriba de esa curva existe el metal fundido o fundición. La solidificación del metal que empieza a partir de esta curva A B C, hacia abajo, termina cuando el enfriamiento llegue a las ordenadas de la línea A a B c. El punto especial B indica aquel metal que pasa bruscamente del estado líquido al sólido sin estado intermedio; corresponde, como sabemos, a la fundición comunmente empleada.

Pero, estando ya el metal en estado sólido, y a mucho más baja temperatura, entre 900° , y 600° centígd., tienen lugar una serie de notables transformaciones. G H S a indica la temperatura a la cual, para cada porcentaje de carbón, estas transformaciones comienzan, la línea P S P' las temperaturas a que dichas transformaciones terminan. Estas líneas representan en sus ordenadas, las diversas posiciones de los puntos Ar_1 , Ar_2 y Ar_3 , de que hemos hablado anteriormente, correspondientes a cada composición de hierro o acero, definido por la abscisa correspondiente.

La curva de los puntos de fusión y de solidificación, las que limitan las transformaciones a que acabamos de referirnos, incluidas las que forman las variaciones de los puntos Ar_1 , Ar_2 y Ar_3 a que nos referimos más abajo, dividen el diagrama hierro carbón en ocho zonas, cada una con su propio estado específico de constitución del metal; el estado fundido corresponde a la zona 1; mezcla de metal fundido y austenita sólida a la región 2; austenita solamente a la región 4, etc.; más adelante nos ocuparemos de cada una de ellas y sus componentes.

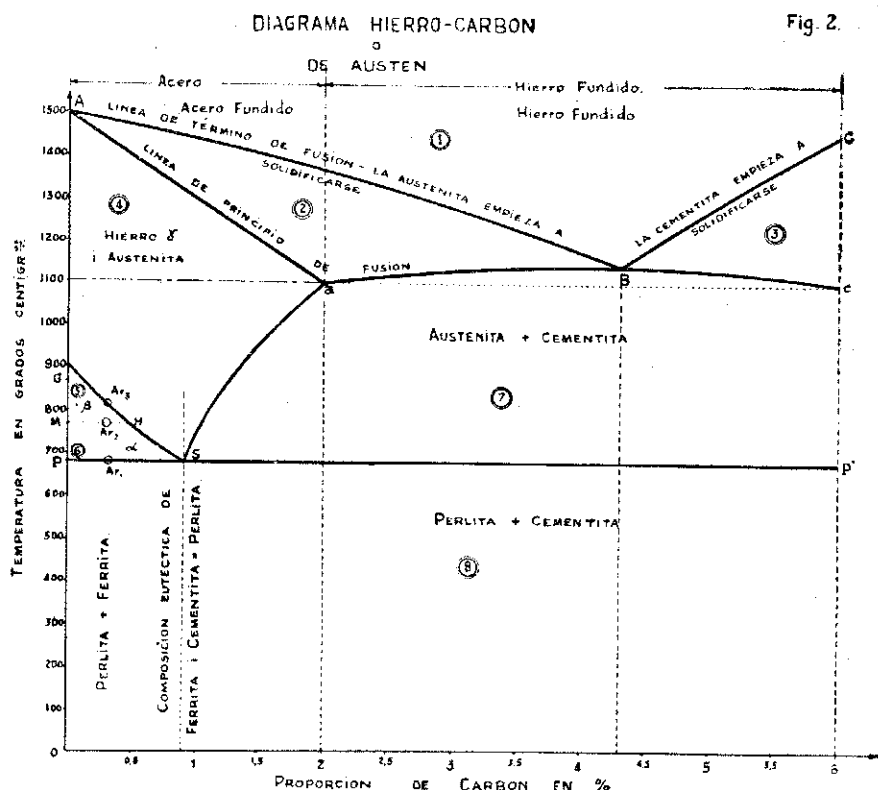
Calentando o enfriando lentamente los aceros y hierros, las reacciones que dan lugar a las variaciones mencionadas, hierro γ β y α y diversos estados de cristalización, se verifican completamente en los puntos críticos correspondiente, y el metal, producto de las reacciones, queda en situación de equilibrio estable.

Pero, como toda reacción requiere un cierto tiempo para verificarse, si el tiempo se altera el estado de equilibrio se altera también.

Si la marcha del enfriamiento es suficientemente rápido, las reacciones que ordinariamente tienen lugar durante un enfriamiento lento, se suprimen y el metal se mantiene en las condiciones en que existe a la temperatura inicial del en-

friamiento rápido. Pero esta última situación es inestable; en lenguaje figurado podríamos decir que es de equilibrio inestable; diversas circunstancias, cambios de temperaturas, vibraciones, etc., permitirán al metal volver lenta o rápidamente al estado de equilibrio estable que corresponde a la temperatura en que se encuentra.

Esta propiedad de permitir sean suprimidas las transformaciones que corresponden a las diversas temperaturas de un metal, y de obtenerlo adornado de las propiedades de que goza a temperaturas muy diversas de la ambiente, es sin duda



ura de las mas preciosas e importantes de los hierros; cuando procedemos a recocer las piezas de una armadura metálica, persiguiendo suprimir el "écrouissage" que haya experimentado en el trabajo a que se le ha sometido en el taller, no hacemos sino restituir al metal las propiedades que en él requeriáramos a la temperatura ambiente, para lo cual habíamos elegido un metal pobre en carbón. Cuando templamos un acero, buscamos tenerlo a la temperatura ambiente con las propiedades de dure-

za correspondiente a la austenita y al hierro β , que sólo podemos obtenerlos en estado inestable a la temperatura ambiente; con estas propiedades de dureza correspondientes a la austenita y al hierro β que sólo podemos obtenerlos en estado inestable a la temperatura ambiente, obtenemos el metal de las herramientas e instrumentos cortantes.

Podríamos multiplicar muchísimo los ejemplos de la utilidad preciosa que en el terreno práctico, industrial, etc., se obtiene de esta propiedad. En el campo científico, ella nos permite conocer, al simple examen microscópico de un metal que nos muestra la presencia de alguno de los estados peculiares, cuál ha sido el tratamiento térmico a que ha sido sometido o trabajado, cuál su composición, ayudado al mismo tiempo de los ensayos físicos corrientes.

Expuesto lo anterior, pasamos a definir y a mostrar lo que son los diversos estados en que se encuentran los productos férricos de que nos servimos a diario, Austenita, hierro β , Martensita, Troostita, Sorbita, Perlita, hierro, α etc.

Después de la profunda anarquía de criterios y nomenclaturas no bien esclarecidos todavía, debido al período de investigación incipiente de muchos observadores muchas veces sin contacto alguno científico durante largo tiempo, y a lo obscuro y variado de esta materia, los criterios tienden ahora a unitormarse. Las muestras que presentaremos, son obtenidas y preparadas en el Laboratorio de Ensayos de la Universidad Católica de Santiago que tengo el honor de dirigir, y las más, tomadas de tipos *standard* bien raros todavía por desgracia y aún menos vulgarizados, que hemos elegido por permitir ellos una más clara y precisa percepción del objeto y estado que define y describe.

La *ferrita* ha sido ya definida anteriormente: como dijimos entonces, es hierro casi puro. Se le encuentra como elemento de composición de varios otros estados, de la perlita principalmente (1). Aisladamente se presenta como lo indica la fig. 3 que reproducimos en la linterna de proyección. Corresponde a una muestra de hierro de 0,06 % de carbón; presenta muy claramente el aspecto de su cristalización en cubos. En la preparación de muestras para ser observadas al microscopio, la ferrita se manifiesta inalterable al ataque con tintura de yodo disuelta en alcohol y conserva su aspecto brillante especular.

Entre las muestras que he preparado en el Laboratorio de mi cargo y que podrán observar aquí mismo los colegas que me escuchan, ayudados del microscopio que tengo aquí a mi disposición, hay una preparación, en que la ferrita se muestra

(1) Véase IV Congreso de l'Association Internationales pour l'Essai des Materiaux. Sección 1. Art. II.

más claramente aún que en la fotografía «standard» que acabo de proyectar en la linterna. Los cubos cristalinos aparecen allí con gran claridad. La muestra corresponde a un acero de puentes, cuya proporción de carbón debe ser 0,25 %.

Austenita es el nombre de la solución sólida de carburo de hierro en hierro γ , que se encuentra en equilibrio estable en la zona 4 del diagrama hierro carbón. En una solución sólida, semejantemente a una solución líquida, la proporción en que se encuentran las diversas sustancias químicas presentes no es fija y determinada sino que varían de un caso a otro, nó por saltos como en la composición de los cuerpos químicos, sino de una manera gradual y continua; las diferentes sustancias se encuentran como si estuvieran disueltas unas en otras, en un estado indefinido de composición, conservando su estado de individualidad y la débil atracción química recíproca característica de una solución líquida.

Enfriando el metal hacia las regiones 6 y 8 la austenita se transforma en ferrita y cementita, después de pasar por los estados intermediarios de martensita, troostita y sorbita. Este cambio puede evitarse, para conservar la austenita a nuestra temperatura ambiente, ya sea completamente, enfriando rápidamente el metal, templándolo en agua si se trata de aceros ricos en carbón, en cuyo caso el carbón actúa como elemento retardador del cambio; o bien completamente, por la presencia de fuertes proporciones de manganeso, tungsteno, níquel o molibdeno, cuyo efecto es extender la zona G H S a A hasta la temperatura atmosférica: estos aceros son de gran importancia comercial, pues son duros y tenaces aún bajo temple poco enérgico, es decir, estas propiedades se consiguen en ellos aún apartándolos muy poco de su estado de equilibrio estable.

La austenita contiene aproximadamente 2,2% de carbón. Se presenta en forma de paralelógramos alargados de tinte claro, de bordes irregulares. Se deja rayar fácilmente por una aguja de coser cuya punta haya sido recocida a la temperatura del rojo.

Todos los reactivos usados la atacan y la coloran de un tinte intermedio; se le reconoce fácilmente por su forma en zig-zag y estructura de agujas. (fig. 4).

La *Cementita* de quien nos hemos ocupado ya antes, carburo triférrico, de extrema dureza, es difícil de observar y distinguir aisladamente; comunmente se le encuentra en combinación con la perlita, formando una red de elementos poligonales cuyos huecos llena este último cuerpo, como podemos observarlo en la fig. 5, en los elementos brillantes de los contornos poligonales que allí aparecen, esta microestructura corresponde a un acero de 1.46 % de carbón.

Aparece en relieve después de pulir la muestra, de calor blanco brillante después de atacarla con ácido nítrico diluido o ácido pícrico.

Es estable en la zona 5 y 6 del diagrama en conjunción con la ferrita, y en la zona 7 con la austenita, y como constituyente con la perlita en la zona 8.

La *Perlita* es constituida por estratas muy delgadas, alternadas de cementita y ferrita, en forma característica que la asemeja en su aspecto a la madre perla. La perlita en su estado eutéctico contiene aproximadamente 6 partes de ferrita y 1 de cementita, aproximadamente; en consecuencia 0.9% de carbón. Enfriado lentamente un acero de esta ley de carbón contiene solamente perlita. El acero y el hierro fundido con más de esta ley de carbón presenta espacios de perlita rodeados de manchas de cementita libre, representativa del exeso de carbón sobre la proporción eutéctica: se les designa con el nombre de "hiper-eutéctico"; son éstos los metales que corresponden a la parte de la zona 8 del diagrama de Austen, hacia la derecha de S D.

Los aceros de menos de 0.9 % de carbón son llamados hipo-eutécticos y son los que corresponden a la zona nombrada del diagrama, hacia la izquierda de S D; su microestructura representa zonas de perlita, rodeada de manchas blanquizcas de ferrita en cantidad suficiente para mostrar el exceso de hierro sobre la proporción eutéctica.

La figura muestra con mucha claridad la perlita: bajo grandes aumentos 360 veces o más, como la fig. 6, puede observarse su forma característica; en agrandamientos más pequeñas no es perceptible su forma peculiar. En las muestras atacadas con ácido pícrico o nítrico diluidos, la perlita aparece de color mas sombrío que la ferrita y la cementita, pero más claro que la sorbita y troostita.

La *martensita*, la *troostita* y la *sorbita* constituyen las etapas sucesivas por que el metal pasa de austenita a ferrita y cementita.

La primera fig. 7 corresponde a la primera faz de dicha transformación; es muy dura, y de forma característica cuando está sola, por su aspecto de agujas cruzadas según inclinaciones de 60°.

Cuando está mezclada con austenita se presenta en forma de agujas en zig-zag, y de hierros de lanza o de flecha.

La martensita es una solución sólida de carburo de hierro en hierro β , y en parte en hierro α : de la primera deriva su dureza; de lo segundo sus propiedades magnéticas. No es estable en ninguna región del diagrama; representa esencialmente la situación inestable en que se encuentran los aceros templados, de que es característica. La fig. 7 representa la martensita.

Las races siguientes de la transformación de la austenita constituyen la *troostita* y la *sorbita* (fig. 8 y 9). De aspecto amorfo sin cristalización definida, en las muestras atacadas por los procedimientos corrientes se presentan en marchas oscuras de gra-

no muy fino y de contornos mal definidos, la troostita más clara y más oscura la sorbita, pero ambas más oscuras que la perlita.

Las figuras (8) y (9) nos permiten ver la troostita y la sorbita respectivamente y entre las muestras que podrán observar los concurrentes en seguida con ayuda del microscopio que aquí tenemos, hay algunas muy características de estos cuerpos.

No corresponde a esta disertación indicar en detalle la técnica de la observación micrometalográfica. Para precisar las ideas indicaré sólo en grandes líneas el procedimiento empleado.

Una pequeña muestra del metal por examinar, de 1 cm² o aún menor si se quiere, se pule por una de sus caras perfectamente plana, con la mayor prolijidad posible hasta hacer desaparecer hasta las rayaduras microscópicas. Para ello se usa el papel de esmeril desde el N.º 2 al principio, hasta el 0000, y finalmente se termina el pulimento frotando la muestra sobre un disco de paño. Algún dispositivo mecánico apropiado abrevia mucho el tiempo que tomaría hacer esta operación con la mano.

La muestra así pulida se observa al microscopio si tienen aún rayaduras, y la operación se prolonga hasta que desaparezcan en absoluto y presente la muestra una superficie perfectamente especular.

Algunas observaciones pueden y deben hacerse antes de atacar la muestra, pues algunos componentes aparecen ya en relieve.

En seguida se ataca la muestra por reactivos apropiados; los más frecuentemente usados son: ácido nítrico diluido al 4%, al 10% y al 25%; solución de ácido pícrico en alcohol amílico; ácido nítrico y potasa, y tintura de yodo concentrado. El ataque por estos reactivos dura sólo algunos segundos; en seguida la muestra se lava en una llave de agua, se enjuga y está lista para ser observada al microscopio.

Un microscopio especial para observar cuerpos opacos es necesario. La muestra debe estar, naturalmente, alumbrada superiormente, es decir, del lado del observador. El microscopio que tenemos a la vista es un excelente aparato para estas observaciones.

Los agrandamientos que se necesitan son de 75, 100 hasta 500, y aún 600 veces. Ello exige un juego completo de oculares y objetivos y un micrómetro.

Al término de esta disertación podrán mis colegas observar al microscopio algunas muestras muy características y claras que tengo el agrado de poner a su disposición, principalmente la que muestra la ferrita cúbica, la martensita un tanto atenuada, la sorbita y la troostita. No me ha sido posible obtener una muestra de austenita sola, que es la de forma más extraña y peculiar.

Inútil me parece continuar describiendo otros cuerpos secundarios que la micro-

metalografía aprovecha en el estudio de los metales férricos. Sin embargo, deberé mencionar siquiera algunos de los cuerpos más interesantes de constatar con ayuda del microscopio, de los defectos de estructura que pueda presentar el material y de otros elementos de interés para el productor y el consumidor de materiales siderúrgicos.

La presencia de escorias es, sin duda, una causa de fallas y debilidades; cualquiera que sea su procedencia, si la cantidad de escorias contenidas en un hierro es grande, el examen de una muestra a la simple vista permite observarle. Pero, si la cantidad es muy pequeña, el examen microscópico, ya sea de una muestra atacada o no, revela su presencia, en forma de manchas oscuras, inatacables e inalterables por los reactivos; manchas alargadas en los hierros y aceros laminados, forma debida a este mismo trabajo mecánico; y manchas redondeadas e irregulares en los aceros fundidos y no sometidos a trabajos mecánicos que implican deformación.

Las figuras N.º 10, 11, 12, y 13 que se proyectan en la linterna muestran bien claro el aspecto microscópico de las escorias.

Las líneas de menor o mayor resistencia que presentan los hierros y aceros laminados, debidos a elementos de heterogénea composición química, después alargados en forma de líneas estiradas, son también advertidas notoriamente al microscopio y con frecuencia sin necesidad de éste, a la simple vista. Dichas líneas en una muestra pulida y atacada se presenta de color o más claro o más oscuro, brillantes u opacas según su composición; las figuras 14, 15 y 16 muestran con claridad estos defectos de composición, que acusan siempre partes débiles del material.

No menor importancia tienen entre las indicaciones que obtenemos con ayuda del microscopio, las relativas a la forma del grano de los hierros y aceros y las indicaciones que esto significa con relación al tratamiento térmico a que un acero haya sido sometido.

Basta recordar las explicaciones que acabamos de dar respecto al diagrama de Austen, y de la permanencia a nuestra temperatura ambiente de situaciones de equilibrio de composición, estables solamente a temperaturas elevadas, para comprender el campo vastísimo de esta aplicación de la observación de los metales al microscopio.

La simple inspección de las figuras 9 y 17 muestran con mayor claridad que cualquier comentario el mal y buen grano de un acero de idéntica composición química, pero sometido a tratamiento térmico diverso. El aspecto del grano no puede ser más diverso; heterogéneo el segundo (fig. 17) en sus manifestos indicios de martensita y austenita, muestra haber sido sometido a tratamientos térmicos violentos que han hecho permanecer el estado peculiar a la zona 4 del diagrama de Austen. En la figura 9 se ve un aspecto sorbítico característico de un tratamiento delicado y cuida-

doso. Las cifras de alargamiento, contracción, ruptura y límites de elasticidad permiten constatar, bajo el punto de vista constructivo, el valor de uno y otro material; ellas son: acero correspondiente a la figura 17.

Límite de elasticidad	= t_E = 27, 4 Kg. por m^2
Fatiga máxima de ruptura	= t_R = 54 Kg. por m^2
Alargamiento	λ_R = 10.5%
Contracción	A = 16.9%
Coeficiente de calidad = 570.	

El mismo acero en el estado que aparece representado en la figura 9.

t_E	= 38.5
t_R	= 58.5
λ_S	= 27.5
A	= 43.3
Coeficiente de calidad = 1600.	

Corolario práctico inmediato del diagrama de Austen es también la posibilidad de reconocer con ayuda del microscopio, de una manera sólo aproximada e incierta, si se quiere, la cantidad de carbón contenido en un acero. Naturalmente este examen requiere que el metal haya sido enfriado lentamente, para que la zona 8 del diagrama de Austen se presente con todas sus características, de perlita solamente en una solución eutectica, es decir de 0.9% de carbón, perlita y ferrita en la solución hipoeutectica, perlita y cementita en la hipereuteca. Partiendo de la proporción entectica cuya ley de carbón es la ya indicada, el exceso de ferrita o de cementita que podemos estimar por la magnitud de campo que ocupa en la vista microscópica, permite inducir aproximadamente el carbón que contenga. Naturalmente este examen requiese un manipulador y un observador experimentado y en ningún caso puede reemplazar el ensayo químico, si se requiere conocer la composición exacta de un metal.

Las constataciones que permite hacer la micrometalografía que dejamos enumeradas muy de ligera en el tiempo que no deseo alargar de esta disertación, y muchísimas otras que ocupan la atención del especialista, no sólo acerca de los pro-

ductos férricos tan numerosos y tan importantes en el desarrollo de todas las manifestaciones y actividades de la vida moderna, ponen por sí solos en evidencia la importancia de esta rama de la investigación científica. Su campo es aún mucho más amplio; todos los metales y sus aleaciones caen dentro del campo de su observación, todas sus preparaciones y métodos de trabajo y de tratamiento necesitan de la micrometalografía, para consultar los resultados obtenidos y las expectativas del buen aprovechamiento de esos mismos productos; permite averiguar el secreto de una ruptura, de un fracaso inesperado, y poner en evidencia la causa de una eficiencia y de un éxito que colma las expectativas y enseña el camino de alguna innovación, que significa economía y progreso.

Salen del campo de esta disertación ya demasiado extensa, encaminada a vulgarizar estos conocimientos, los detalles de estas circunstancias y pido por esto se me permita no entrar en ellos. Pero, convencido de la importancia de esta rama de la ciencia y de la investigación, me permito proponer al Instituto de Ingenieros de Chile un voto en el sentido de estimular la enseñanza de la metalografía y de la micrometalografía en nuestras escuelas técnicas, y el aprovechamiento de sus indicaciones en las reparticiones del Estado y de la industria privada, que necesitan de materiales metálicos de esmerada preparación y delicado aprovechamiento.

Santiago, 28 de Julio de 1920.

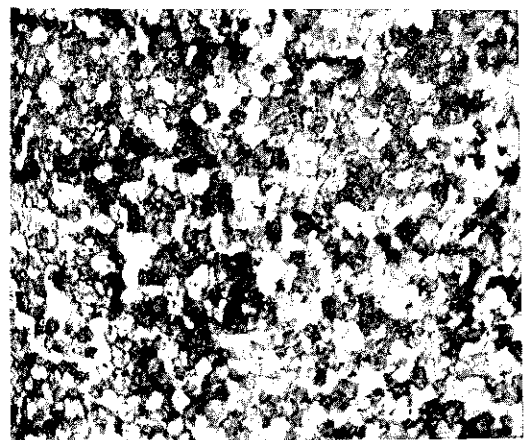


Fig. 3.



Fig. 6.

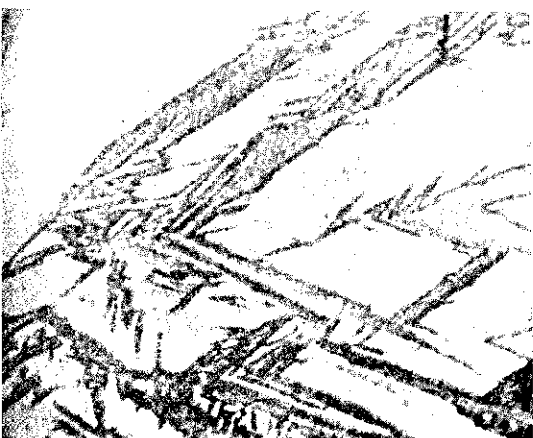


Fig. 4.

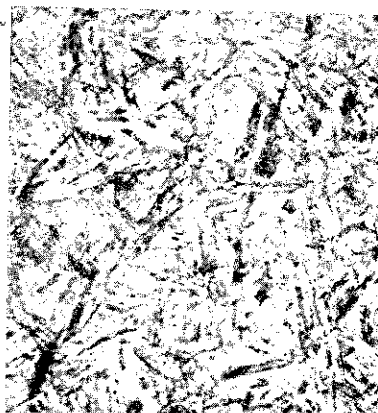


Fig. 7

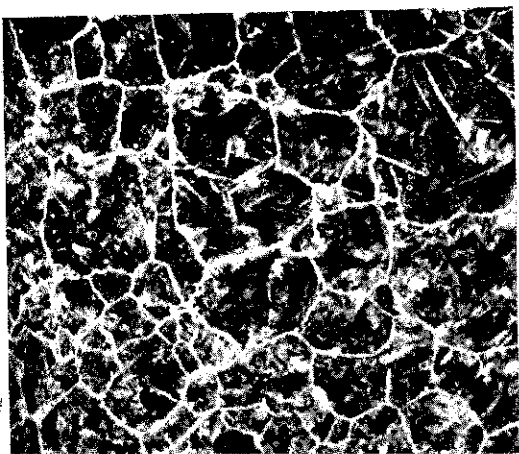


Fig. 5.

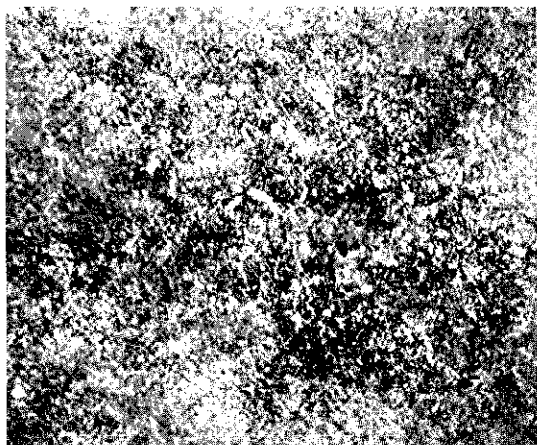


Fig. 8.

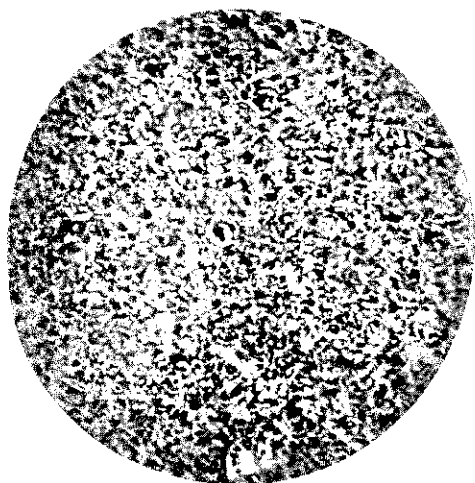


Fig. 9.

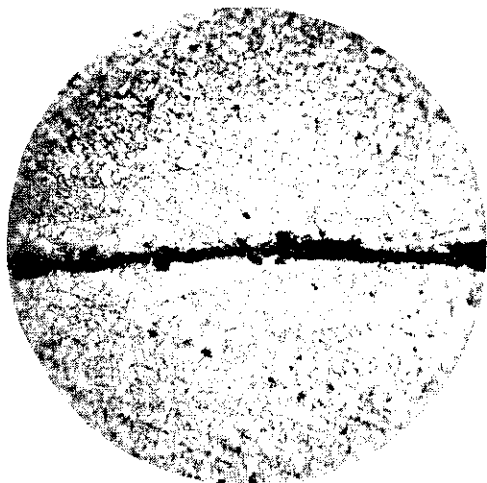


Fig. 12.

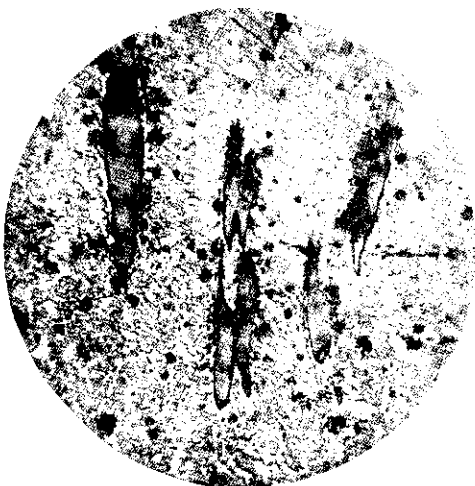


Fig. 10.

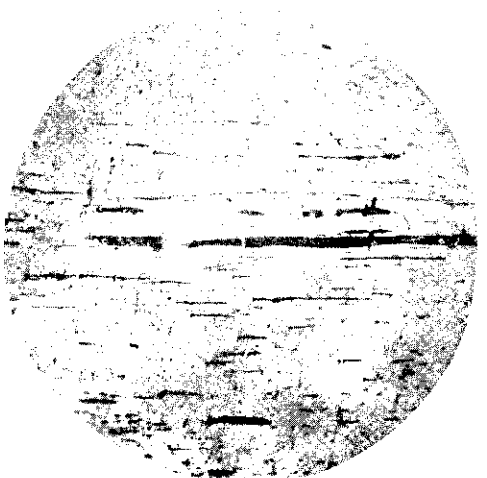


Fig. 13.

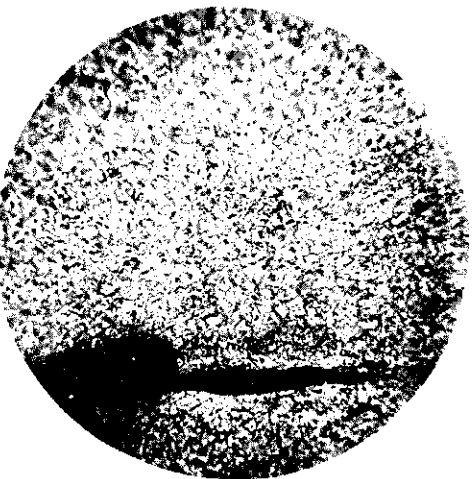


Fig. 11.

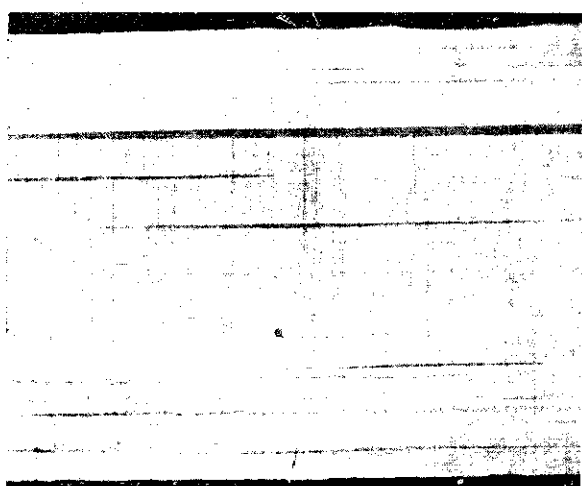


Fig. 14.

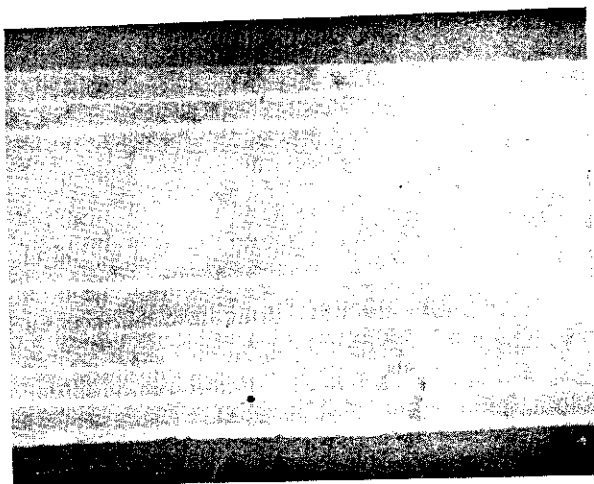


Fig. 15.

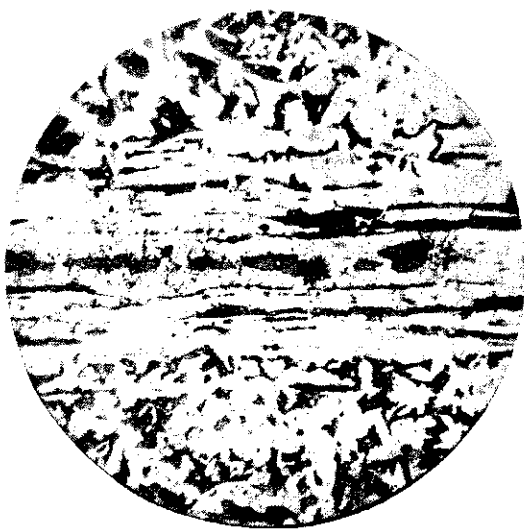


Fig. 16.

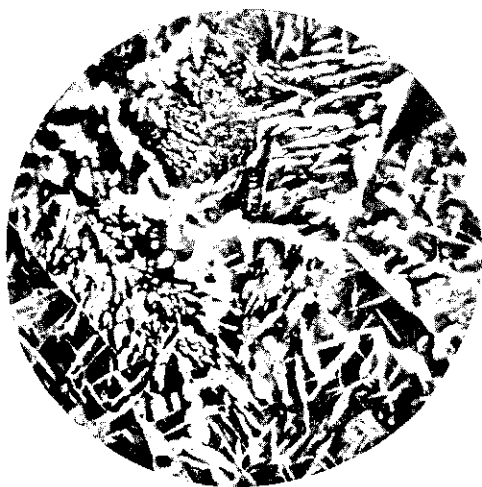


Fig. 17.