
Tecnología

Aplicación de la metalografía a la solución de problemas industriales

CARLOS A. CARRERAS

INGENIERO MECÁNICO graduado en la Universidad de La Plata, el autor de este artículo nació en Tucumán en 1922. Se inició en la docencia como ayudante de metalografía y tratamientos térmicos del curso de ingeniería metalúrgica que se dicta en la facultad de Ciencias Físico-matemáticas, ocupando después la jefatura de trabajos prácticos y finalmente el cargo de profesor interino, que ejerce en la actualidad. De la misma materia es cate-drático titular por concurso en la Escuela Superior Técnica del Ejército y en la Universidad Tecnológica Nacional. Tiene a su cargo los trabajos de metalografía de la sección tecnología metalúrgica del "Laboratorio de Ensayos de Materiales e Investigaciones Tecnológicas" (I. E. M. I. T.) de la provincia de Buenos Aires. Ex-becario de la Sociedad Científica Argentina. Miembro titular de la Sociedad Argentina de Metales. Ha publicado diversos trabajos de su especialidad en la revista tecnológica INGENIERÍA E INDUSTRIA (Buenos Aires).

POR metalografía se define el estudio de la constitución y estructura interna de los metales y aleaciones relacionándolas con la composición química y características mecánicas. Sus leyes y principios pertenecen al campo de la físico-química y en la actualidad constituye uno de los medios más importantes de la investigación metalúrgica. No debe interpretarse por ello que su finalidad es puramente científica, ya que tiene también alcances prácticos como método de verificación de materiales y de procesos industriales.

Para situar a la metalografía en el panorama general de los métodos de investigación y ensayos metalúrgicos, bosquejaremos la siguiente clasificación:

Ensayos físicos:

1. Análisis térmico;
2. Ensayo de cohesión;
3. Determinación de densidades;
4. Análisis dilatométrico;
5. Medición de la resistencia eléctrica;
6. Ensayos de efectos termoeléctricos;
7. Medición de la fuerza electromotriz de disolución;
8. Análisis magné-

tico; 9. Análisis radiográfico; 10. Determinación de la conductibilidad térmica y calor específico.

Ensayos físico-químicos:

11. Metalografía microscópica; 12. Metalografía macroscópica.

Ensayos químicos:

13. Análisis cualitativo y cuantitativo; 14. Ensayos de control de revestimientos metálicos; 15. Ensayos de corrosión.

Ensayos mecánicos:

16. Ensayo de tracción; 17. Ensayo de dureza; 18. Ensayo de torsión; 19. Ensayo de flexión y torsión por choque; 20. Ensayo de fatiga.

Como puede verse, la metalografía está ubicada entre los métodos físico-químicos de ensayos de productos metalúrgicos y comprende dos grandes campos: la metalografía macroscópica y la metalografía microscópica. La primera consiste en observar a simple vista o con pequeños aumentos (hasta 30 diámetros) la "probeta"¹ o pieza convenientemente preparada, a fin de poner en evidencia las discontinuidades o heterogeneidades de la materia y la organización estructural del conjunto. Con estos ensayos se determina: a) En lo concerniente a discontinuidad de la materia: la presencia de sopladuras, inclusiones, fisuras, porosidades, etc. b) En lo concerniente a heterogeneidad de la materia: las segregaciones de impurezas, estructuras dentríticas o columnares de colada, orientación de fibras de laminado, o capas de cementación, nitruración, etc. En cambio, la metalografía microscópica consiste en observar con ayuda del microscopio la probeta atacada o no químicamente, previo pulido de la superficie a examinar, a fin de poner en evidencia características estructurales, tales como tamaño del grano, forma y distribución de las fases, inclusiones no metálicas y otras heterogeneidades y discontinuidades del material. Estos dos campos de la metalografía están lo suficientemente relacionados entre sí, y cuando es posible aplicar

¹ Se designa con este nombre al trozo de material que será objeto de estudio.

ambos en una misma pieza o material sus resultados tienen necesariamente que conducir a idéntica conclusión. En realidad, no son sino formas diferentes de proceder a un análisis metalográfico.

Para comprender mejor la importancia de la metalografía, subrayemos que por metalurgia —aunque no corresponda a la definición del diccionario castellano— se entiende: la *extracción* de los metales de los minerales (denominada metalurgia extractiva y siderurgia en el caso del hierro), la *preparación* de las aleaciones (que constituye la técnica de la fundición), la *elaboración* de productos intermedios por procedimientos de laminación y forja, y la *manufactura* de artículos industriales o de uso doméstico (donde puede considerarse incluidas las operaciones mecánicas de las llamadas máquinas-herramientas y los tratamientos térmicos). Si se reflexiona en esta suerte de definición, podrán interpretarse cabalmente los alcances de la metalografía como rama de la investigación metalúrgica, ya que ella permite analizar cualesquiera de los productos resultantes de las cuatro fases de la metalurgia. Por lo demás, su relación con otros métodos de investigación, tales como los análisis químicos, térmicos, radiográficos, etc., y con los ensayos que determinan los valores mecánicos de los materiales, amplían considerablemente su campo. De allí que en la actualidad la metalografía se haya convertido en una especie de “clínica” de los metales y aleaciones, es decir que muy difícilmente pueden extraerse conclusiones de los materiales metálicos sin conocer su estructura microscópica.

Puede decirse que la metalografía cuenta tan sólo con medio siglo de existencia, aunque su fisonomía actual haya plasmado en los últimos treinta años. Naturalmente que la idea de estudiar los metales y aleaciones tuvo comienzo mucho antes. En 1808, Widdmans-tätten, en Alemania, hizo algunos estudios puliendo groseramente y atacando químicamente la superficie de algunos metales. Esto sentó las bases de lo que más tarde se llamaría macrografía. Varios años después (1864), el petrógrafo inglés Henry Sorby creó el procedimiento llamado “por reflexión” para observar al microscopio los meteoritos. Posteriormente Martens, en Alemania, publica los primeros estudios sobre aceros y fundiciones. En 1883, los ingenieros franceses Osmond y Werth, dan a luz las primeras teorías sobre las células cristalinas de los materiales metálicos y la distorsión de ellas

provocadas por un enfriamiento rápido. Muchos otros investigadores, entre ellos Tschernoff y Belaiew, en Rusia; Heyn, Bauer y Oberhoffer, en Alemania; Le Chatelier, Osmond y Charpy, en Francia; Roberts, Austen, Stead y Rosenhaim, en Inglaterra y Howe, Sauveur y Grossmann, en los Estados Unidos, fueron desarrollando diversas teorías y métodos de indagación microscópica hasta constituir la fundamentación actual de esta rama del conocimiento. Desde diversos campos de la ciencia y de la técnica, especialmente de la química y físico-química, se han ido aportando investigaciones que fueron rectificando o ratificando las conclusiones de aquellos metalurgistas, aunque debe decirse, en honor a la verdad, que muchas de ellas, después de casi 70 años, siguen teniendo validez.

FUNDAMENTO Y TÉCNICA DEL ANÁLISIS METALGRÁFICO.

En todo análisis metalográfico es fundamental trabajar con una "probeta" adecuadamente preparada y que sea representativa del material o problema a dilucidar. Estas dos circunstancias determinan un método de trabajo que podemos concretar en los siguientes pasos: selección y extracción de la muestra; preparación de desbaste y pulimento; ataque químico; observación; fotomicrografía.

Selección y extracción de la muestra:

La elección del lugar de extracción de la muestra es de fundamental importancia, por cuanto la estructura de las aleaciones, con ciertas limitaciones, en la mayoría de los casos reflejan la historia completa del tratamiento mecánico y térmico que ha sufrido el material. Deben conocerse, pues, de antemano, las características y modalidades de fabricación de la pieza a analizar, lo cual requiere experiencia y capacitación profesional suficiente. La forma, dimensiones, tipo de material y uso a que está destinado, son los principales elementos de juicio que conducen a una acertada elección del lugar de la extracción. Estos factores son también determinantes de la cantidad de "probetas" que han de observarse y si los cortes han de realizarse longitudinal o transversalmente. En cierta forma puede considerarse que cada pieza o material determina un problema de selección diferente.

Preparación de desbaste y pulimento:

La observación microscópica se realiza sobre superficies finamente pulimentadas y atacadas químicamente. Para llegar a obtener una superficie especular es preciso pasar por una serie de etapas de desbaste a mano o mecánico con papeles de distinta fineza. Estos esmeriles son de fabricación especial para metalografía, con polvos de carburo de silicio u óxido de aluminio de grano muy fino. La etapa final se hace ya con paño de lana o seda y alúmina levigada. Existen normas sobre este método de trabajo e incluso sobre su elección ya que es evidente que un material tan duro como el acero templado no puede pulimentarse idénticamente al cobre. De allí que suele acudir a otros métodos que no son mecánicos sino químicos y electrolíticos. Esta última técnica ha sido ampliamente difundida aunque conviene precisar que no en todos los casos puede aplicarse. Cualquiera de los métodos de pulimento enunciados tienen sus ventajas y sus inconvenientes y en el grado de experiencia del metalógrafo está el determinar si conviene o no su aplicación.

Ataque químico:

En general los reactivos adecuados para el ataque metalográfico se componen de ácidos orgánicos o inorgánicos, álcalis de varias clases y otras sustancias más complejas, disueltas en disolventes apropiados como agua, alcohol, glicerina, etc. No consideramos aquí necesario extendernos sobre la técnica operativa del ataque químico sino fijar los principios de la identificación de estructuras por efecto de los reactivos.

Los metales que se funden para constituir una aleación, presentan al solidificar características físico-químicas bastante diferentes, que podemos resumir así: a) Pueden formar una solución sólida; b) un compuesto químico; c) un compuesto intermetálico; d) ser totalmente insolubles entre sí en el estado sólido.

De estas cuatro formas de solidificar, en muchas aleaciones se presentan dos o tres simultáneamente, de manera que en ese caso se definen como aleaciones parcialmente solubles al estado sólido. Que una

u otra forma de solidificar se manifieste, depende de los elementos intervinientes en la aleación y en el grado de su concentración. (Conviene aclarar estos dos conceptos: la "solución sólida" es una solución solidificada en la cual el soluto y el solvente siguen siendo totalmente miscibles. Y el compuesto "intermetálico" es un compuesto químico en que sus elementos integrantes no observan las reglas de la valencia salina).

Ahora bien, mediante el estudio de las curvas de solidificación de los metales y aleaciones, ha sido posible construir diagramas de temperatura-concentración llamados "diagramas de equilibrio", cuyas curvas resultantes definen el comportamiento de las aleaciones a diversas temperaturas y concentración de sus elementos químicos constitutivos. Con dichos diagramas pueden precisarse las características de solubilidad, es decir si a temperatura ambiente forman soluciones sólidas, compuestos intermetálicos, etc. En la actualidad puede decirse que han sido estudiados y trazados la mayoría de los diagramas de equilibrio de las aleaciones metálicas, e incluso existen varios métodos físicos, eléctricos y metalográficos que permiten en un caso dado conocer el diagrama que corresponde a una aleación que se quiera estudiar. Estos diagramas de equilibrio están regidos por la ley de las fases de Gibbs, de allí que en metalografía se emplee frecuentemente el término "fases" para definir el constituyente que precipita en la aleación a temperatura ambiente. Aclaremos, asimismo, que los granos cristalinos que presenta el metal, pueden estar constituídos de una o varias "fases" y que éstas pueden precipitar de manera diferente. Esta es la causa por la cual ante la observación microscópica se hable de constituyente metalográfico para definir una fase o un conjunto de fases precipitadas en un mismo grano.

Conforme a estas consideraciones, dividimos a las aleaciones en monofásicas y polifásicas. En estas últimas, el mecanismo de ataque sobre la superficie pulimentada es de naturaleza electroquímica como consecuencia de las diferencias de potencial que se producen en los distintos constituyentes en presencia del reactivo. Las fases de potencial más elevado se comportan anódicamente frente a las otras y en consecuencia tienden a disolverse. Esto origina una diferencia de nivel en el plano de la superficie especular de la "probeta", y ante la incidencia vertical de los rayos de luz del sistema de iluminación del

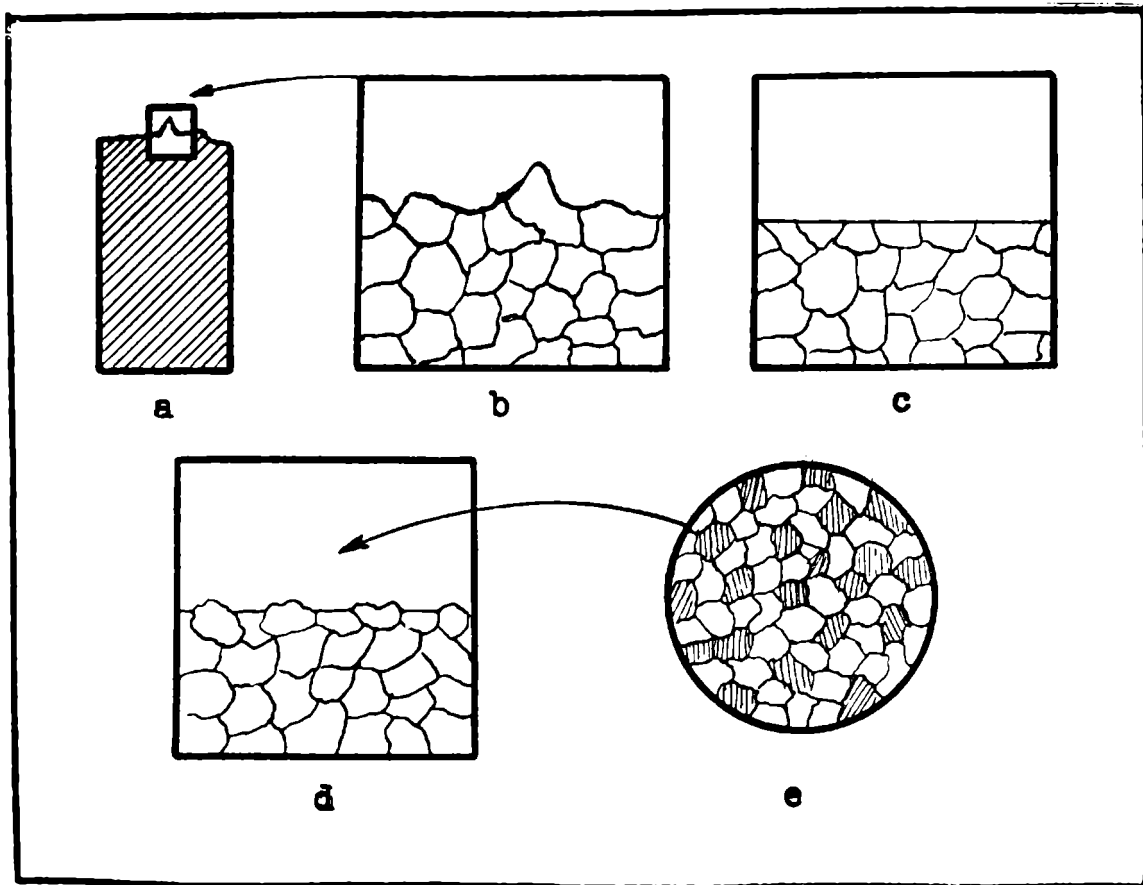


Fig. 1. ESQUEMA DE PREPARACIÓN DE UNA PROBETA METALOGRÁFICA

a) Borde fracturado del metal; b) Visión microscópica del borde fracturado; c) Visión microscópica del borde pulimentado; d) Idem, después del ataque químico; e) Visión microscópica desde arriba después del ataque químico.

microscopio, produce la necesaria diferenciación entre las fases. Esto muestra esquemáticamente la figura 1.

En las aleaciones del tipo monofásico, e incluso en los metales técnicamente puros, el mecanismo de diferenciación de granos por ataque químico se basa en otro principio. Los metales están constituidos por granos que no son sino una agrupación de células cristalinas elementales. La velocidad de disolución de un grano es diferente según sus distintos planos cristalográficos y como, por efecto del corte y pulimento cada grano presenta una sección diferente, el ataque químico produce facetas bien definidas con orientación diferente a la que presentan los granos vecinos. También puede pensarse en un diferente comportamiento electroquímico entre el grano y las impurezas precipitadas en sus límites.

La fotomicrografía 2 muestra la visión microscópica (a 560 aumentos) de un acero inoxidable constituido por granos de una sola fase, la austenita. Se trata de una estructura resuelta mediante pulido y ataque químico.

Observación:

Los microscopios metalográficos sólo se diferencian de los empleados en biología por la forma de iluminación de la "probeta". Un haz horizontal de rayos proveniente de una fuente de iluminación adecuada es forzada por un prisma o una lámina de caras paralelas a dirigirse hacia abajo a través del objetivo incidiendo verticalmente sobre la superficie de la probeta. Los rayos reflejados que alcanzan a penetrar en el objetivo son los que llevan la imagen destinada a ser amplificada por el ocular. La mayoría de estos microscopios disponen de una cámara fotográfica acoplada. Los más modernos tienen a su vez una serie de dispositivos de acoplamiento para uso de luz polarizada, campo oscuro o interferencia de fases, pero quizá lo más interesante en destacar sea que traen los llamados microdurómetros y el sistema a platina caliente. Mediante el primer dispositivo pueden medirse individualmente los diferentes constituyentes que aparecen en la visión microscópica y con el segundo pueden observarse las transformaciones estructurales a medida que se calienta la probeta. La capacidad resolutive de estos microscopios puede llegar hasta 2.000 y 3.000 aumentos, trabajando ya en estos casos con objetivos de inmersión. Para mayores aumentos puede acudir al microscopio electrónico, pero hacemos resaltar aquí que las necesidades de resolución en metalografía, por lo menos en el orden industrial, rara vez exigen aumentos superiores a 400 diámetros.

Fotomicrografía:

Finalmente, como trabajo complementario del análisis, el metalógrafo necesita documentar las observaciones realizadas. Ello lo logra mediante la reproducción fotográfica. Se requiere, pues, una mediana capacitación en esta materia ya que es imprescindible conocer los medios adecuados para lograr un excelente registro de la observación microscópica. En la actualidad se está usando como método de reso-

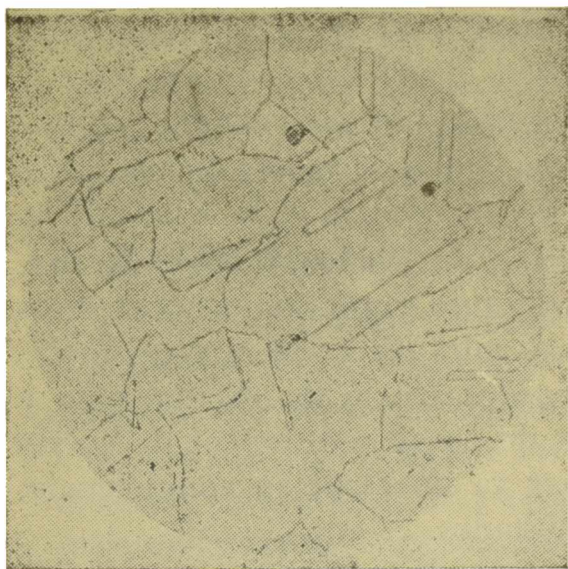


Figura 2

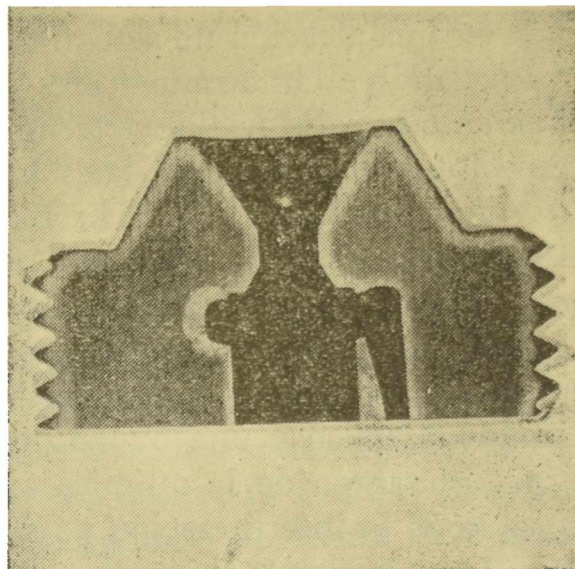


Figura 3

lución la fotografía en colores, ya que algunos constituyentes se diferencian por la tonalidad que adquieren bajo luz blanca o monocromática.

APLICACIÓN DE LA METALOGRAFÍA A LA SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA INDUSTRIAL DETERMINADO

Los problemas que la industria lleva a los laboratorios metalográficos son generalmente de tres clases: a) Los que se refieren a piezas de máquina fracturadas en servicio y cuya reposición en igualdad de característica busca obtenerse; b) Control de calidad de productos metalúrgicos destinados a determinadas especificaciones; c) Asesoramiento sobre el tipo de material, trabajo mecánico y tratamiento térmico a usar en la construcción de maquinarias.

Estos tres aspectos, entre muchísimos otros que suelen presentarse, significan una exigencia de preparación técnica que el profesional dedicado a la metalografía solo puede alcanzar a través de varios años de experiencia. Debe considerarse que existen alrededor de 20.000 aleaciones, y aunque naturalmente gran parte de ellas pueden agruparse desde el punto de vista de su estructura microscópica, uso y elemento químico predominante, esto no significa de ningún modo que la tarea sea tan fácil.

Es un hecho conocido que los elementos químicos que intervienen en una aleación no actúan de la misma manera cuando están solos que cuando están acompañados por otros. De tal suerte, lo normal es que ante la presencia de determinada aleación el metalógrafo acuda a especificaciones técnicas tales como las S.A.E. (*Society of Automotive Engineers*) de EE. UU.; B.S.I. (*British Standard Institution*) de Inglaterra; I.R.A.M. (*Instituto Argentino de Racionalización de Materiales*) etc. Esto significa que el metalógrafo tiene que conocer otros campos de la investigación metalúrgica, tales como los ensayos mecánicos de resistencia de materiales, ensayos físicos de dilatometría y análisis térmico y una buena porción de ensayos químicos de corrosión. El campo de la química analítica ya no es de su competencia, aunque sí la interpretación de sus resultados.

Describiremos ahora un caso concreto de un análisis metalográfico, tal como suelen presentarse, en demanda de solución, al laboratorio del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Físico-matemáticas de nuestra Universidad.

Supongamos que el problema presentado al laboratorio sea el de reposición de la tobera de un inyector de combustible de motor Diesel de usina.

La primera actitud del metalógrafo será la de requerir la mayor cantidad posible de información sobre las características de funcionamiento y condiciones de operación en servicio, esto es: tipo de esfuerzos mecánicos a que está sometida, temperatura de trabajo, invariancia de sus dimensiones, calidad de terminación e incluso exigencias de resistencia a los agentes corrosivos. Estas son premisas que permiten al metalógrafo ubicar dentro de qué gama posible de aleaciones ha sido seleccionado el material y cual es el ordenamiento posterior de su fabricación. Con estas observaciones puede ya fijarse el método de trabajo y los análisis que corresponde ejecutar. En el caso particular de la tobera de referencia serán: 1º) análisis macroscópico; 2º) ensayos mecánicos; 3º) análisis químico; 4º) análisis microscópico.

1º *Análisis macroscópico:*

Mediante un corte longitudinal, como se aprecia en la figura 3 se determina que la tobera lleva un tratamiento térmico de cementación cuya distribución de la cáscara o capa, e incluso las fibras aparecidas

TECNOLOGÍA

por efecto del ataque químico, están indicando al metalógrafo lo siguiente: la pieza ha sido construida por maquinado de una barra laminada (lo demuestran la orientación de las fibras); b) la cementación ha sido efectuada luego de haberse maquinado el agujero central por donde se desplaza la aguja del inyector.

2º *Ensayos mecánicos:*

Un complemento indispensable en todo este proceso de individualización será la determinación de los valores de resistencia mecánica. En el caso de la tobera que estamos analizando nos interesará en particular: a) la dureza en la superficie de rozamiento del agujero interior, ya que esta zona es la que está destinada a sufrir el desgaste provocado por el desplazamiento de la aguja; b) la dureza en el núcleo del cuerpo de la tobera para determinar las condiciones de tenacidad con que ha quedado el material.

Con estos dos valores el metalógrafo va completando su información respecto a las características del tratamiento térmico a que fué sometida la pieza. En consecuencia, es muy importante la elección del lugar donde se efectuará el ensayo mecánico, factor que exige al investigador conocer bastante bien las dificultades o imprecisiones de los métodos de ensayos mecánicos, ya que deberá relacionar más tarde los valores aquí obtenidos con la observación microscópica. En caso que las dimensiones del material lo permita, pueden practicarse otros ensayos mecánicos, aunque estos casos no son frecuentes ya que con mediana aproximación suelen estimarse el valor de ellos en base al valor de la dureza.

3º *Análisis químico:*

No es conveniente omitir el análisis cuantitativo de los elementos químicos que intervienen en la aleación, ya que siempre es necesario precisar y ubicar el material entre el conjunto de aleaciones existentes. Sin embargo conviene destacar que dicho análisis sólo nos da la composición de los elementos principales y sus impurezas, pero no nos dice nada en cuanto a las inclusiones y tipo de tratamiento térmico a que fué sometida la pieza. Las inclusiones son las impurezas de óxidos, silicatos, sulfuros etc., que pueden quedar ocluidas en el material como

consecuencia de las reacciones operadas durante el proceso de solidificación, o como restos provenientes de escorias. Estas inclusiones influyen mucho en la resistencia mecánica del material; de allí que tenga importancia su determinación.

El metalógrafo no efectúa la operación concreta del análisis, pero sí debe disponer la forma y lugar de extracción de las virutas, ya que es su función conocer las posibles heterogeneidades de composición que pudiera tener el material. Por otra parte, la mayoría de las piezas de máquinas vienen endurecidas por un temple, y esto dificulta, cuando no hace imposible, el trabajo de una herramienta para la extracción de virutas. El *recocido* previo de ablandamiento a que deben ser sometidas puede modificar totalmente la composición, sea por decarburación en atmósfera oxidante o sea por precipitación de carbono libre como en el caso de la fundición; esto para citar sólo dos variables entre muchas otras.

En el caso de la tobera que estamos considerando será necesario, por consiguiente, proceder de la siguiente forma: a) Extraer una muestra representativa mediante un corte con disco de carborundum convenientemente refrigerado ya que por estar la pieza templada no se puede extraer una muestra con los medios habituales; b) Someterla a un tratamiento térmico de ablandamiento; c) Extraer virutas para el análisis químico del núcleo de la tobera, eliminando previamente la capa cementada ya que ella tiene una composición diferente a la del material original; d) Requerir del laboratorio químico el análisis cuantitativo de los elementos fundamentales y sus impurezas.

4º *Análisis microscópico:*

Llegamos así a la etapa final del análisis metalográfico. Se dispone ya de varios elementos de juicio previos a la investigación que se va a realizar, y éstos deben coincidir con la observación microscópica. Ya dijimos que la muestra a obtener debe ser representativa del material a analizar, por consiguiente en este caso la superficie a pulir deberá contener tanto la zona cementada como la del núcleo no afectado por este tratamiento. En el corte y pulimento deberá cuidarse cualquier calentamiento que pueda afectar la estructura.

En el caso de la tobera extraemos las siguientes conclusiones: a) La capa cementada tiene una profundidad de x milímetros y por su

TECNOLOGÍA

estructura deducimos que la pieza ha sido templada y revenida; b) El núcleo tiene características estructurales que indican si se ha trabajado con un acero de alto o bajo tenor de carbono, y si el temple afectó o no su conformación estructural.

Aclaremos que no siempre estas conclusiones se extraen de una sola observación. Puede ser necesario preparar una serie de “probetas” del mismo material, y efectuar ensayos de temple y revenido hasta encontrar la coincidencia de estructuras y valores mecánicos, y así poder deducir el tratamiento que ha tenido la pieza.

Con estos resultados estamos ya en condiciones de informar sobre la consulta efectuada. Para que pueda interpretarse cabalmente la utilidad de la información, *que en este caso particular se dará al industrial interesado*, las resumimos del siguiente modo:

- 1º) La tobera ha sido construída por maquinado de una barra de acero laminado.
- 2º) El acero utilizado es el correcto o no para el servicio a que fué destinado y sus elementos químicos están dentro de los valores admisibles.
- 3º) Información sobre su especificación comercial, (a fin de su correcta adquisición en el comercio).
- 4º) La tobera ha sido previamente maquinada y luego sometida a un tratamiento térmico-químico de cementación, alcanzando una profundidad determinada en milímetros.
- 5º) Posteriormente a este tratamiento la tobera ha sido templada y revenida.
- 6º) Los valores mecánicos alcanzados son adecuados o no para el tipo de trabajo a que está destinada.

En suma: la metalografía ha dado respuesta efectiva al problema industrial que motivara la consulta. Es que la industria no puede prescindir en la actualidad de la investigación tecnológica para su desarrollo y perfeccionamiento. Y en tal sentido, la metalografía —técnica moderna en constante avance, cuya importancia y métodos de trabajo hemos procurado reflejar en este artículo— le ofrece un valioso auxilio para solucionar muchos de sus problemas.