

CAPÍTULO 1: ¿QUE ES LA METALURGIA?

¡La Metalurgia es una Ciencia Nueva!
¿Quién lo habría creído unos años atrás?
Desde siempre la Metalurgia había sido considerada como una simple técnica peligrosa y sucia, indigna de los intelectuales y de las refinadas elegancias. Sin embargo, Vulcano, tuerto, cojo, deforme y repulsivo, era el esposo de Venus; los griegos rendían un gran homenaje al dios artesano del fuego y del metal.

La época moderna ha puesto a la Metalurgia en el sitio que le corresponde entre las demás ciencias. Hoy en día Vulcano vestiría bata blanca.*

*(Traducción del prólogo de "An Introduction to Metallurgy", A.H. Cottrell, St. Martin's Press 1967).



1.1 EL ARTE Y LA CIENCIA DE LOS METALES

La Metalurgia es el Arte y la Ciencia de producir metales y aleaciones con formas y propiedades adecuadas para el uso. La mayoría de la gente la conoce sólo como un arte antiguo y misterioso. Es cierto que tuvo su importancia en la historia antigua, sacándonos de la edad de piedra hacia la edad del bronce y luego a la edad del hierro. La conversión, aparentemente milagrosa, de tierras opacas a metales brillantes era la esencia del misterio alquímico; no había ciencia de los metales para racionalizar e iluminar el mundo medieval de la fórmula secreta para templar los metales y combinar las aleaciones.

Algo de este aire de misterio aún cubre la Metalurgia hoy en día. Ninguna nave espacial en ciencia ficción es respetable sin su propio secreto "Metal Maravilloso". Este misterio puede ser un legado del pasado, pero también es un reconocimiento inconsciente de los muchos logros del metalurgista moderno en la producción de nuevos metales y aleaciones para turbinas a propulsión a chorro, reactores nucleares, circuitos electrónicos y otras partes de avanzada de Ingeniería. Estos éxitos no son productos de una vieja magia negra, sino que la aplicación lógica de principios científicos. La Metalurgia es ahora una ciencia aplicada, disciplina basada en un entendimiento claro de la estructura y propiedades de metales y aleaciones. El misterio de los modernos "Metales Míticos", es consecuencia del simple hecho que esta ciencia es demasiado nueva como para haberse filtrado hacia los niveles más elementales de la educación científica.



1.2 METALURGIA QUÍMICA

La parte más conocida de esta materia es la **Metalurgia Química**. Ella trata de todas las propiedades químicas de los metales, incluyendo la unificación de los diferentes metales entre sí, para formar aleaciones, pero una parte muy grande de ella concierne a las reacciones oxidación-reducción de metales por dos razones prácticas. Primero, la mayoría de los metales en la naturaleza se encuentran como óxidos, sulfuros, cloruros, carbonatos, etc., y el paso crítico es convertir estos minerales en metales, i.e. en **Metalurgia Extractiva** es un proceso de reducción química. Las reacciones químicas básicas del caso son a menudo simples; el desafío científico en esta parte de la materia es lograr que estas reacciones se produzcan económicamente en escala masiva. Segundo, cuando el pedazo de metal terminado va a ser puesto en servicio y es expuesto al medio ambiente, estas mismas reacciones químicas tienden a ocurrir espontáneamente a la inversa. El metal se invierte del estado metálico al estado oxidado, en otras palabras, se oxida o corroe. La labor principal del Metalurgista Químico es así llevar los metales a su estado metálico y luego mantenerlos ahí.

Los orígenes de la Metalurgia Extractiva se remontan hacia la pre-historia. Los primeros descubrimientos deben haberse hecho accidentalmente en los fuegos de campamentos y fogones donde piedras de minerales metálicos fácilmente reducibles pudieron ser convertidos a metal por el calor y las llamas reductoras. El cobre, plomo y estaño estaban entre los primeros metales por esos procesos de fusión, más de 5.000 años atrás. No mucho después se hizo la aleación bronce, usualmente 10 partes de cobre a una de estaño, por fusión de una mezcla de minerales de ambos metales y fue muy preciada por su gran dureza y porque cuando se licuaba podía ser fundida fácilmente en formas complicadas por solidificación en cavidades pre-formadas en arcilla o moldes de arena. Los primeros latones también fueron desarrollados por fusión de mezclas de minerales de cobre y zinc. El método moderno de hacer aleaciones se desarrolló posteriormente.

Los minerales de hierro también son fácilmente reducidos pero el alto punto de fusión de este metal no permitió producirlo en forma líquida. En vez de esto se produjo una mezcla pastosa, porosa de **hierro-esponja** mezclado con **escoria**, ésta se compactaba mientras estaba caliente y blanda, mediante golpes o forjado con martillo, haciendo algo así como hierro forjado. La necesidad de obtener más altas temperaturas para lograr una mayor producción condujo de la evolución del fogón hacia el alto horno, con un chiflón de aire dirigido hacia la zona caliente, encima del fogón y sobre el cual hay una especie de chimenea cerrada, por la cual desciende el mineral y el combustible carbón vegetal.

Un gran avance ocurrió en el siglo XIX. Se alcanzaron temperaturas suficientemente altas como para producir hierro líquido. El alto horno pudo entonces ser operado en forma continua, siendo "sangrado" periódicamente para dejar escurrir la cantidad de hierro líquido que se había juntado sobre el piso del horno, esto aumentó enormemente la producción.

El arrabio líquido (pig iron) producido de este modo contenía aproximadamente 4% en peso de carbono disuelto, que provenía del combustible del horno, este carbono disminuye enormemente el punto de fusión del hierro y permite que el metal sea fácilmente vuelto a



licuar y colado en moldes. Este hierro fundido, sin embargo, era muy frágil, debido al carbono, que forma láminas de grafito y un carburo de hierro, y otras impurezas, y así no puede ser usado para lo mismo que el hierro esponja forjado. El problema de convertir arrabio a una forma dúctil por eliminación del carbono fue resuelto por **CORT** en el siglo XVIII con el "Proceso de Pudelado" para hacer hierro forjado. Estas dos formas de hierro, forjado y fundido, fueron los materiales ferrosos de construcción por excelencia hasta fines del siglo XIX.

El delicado control del carbono necesario para producir "Hierro Dulce" (aprox. 0,25% de carbono) estaba más allá de los alcances de la Metalurgia de aquellos días. Pero, también se hacía un tipo de "acero de herramientas" para espadas y utensilios de corte, que contenía alrededor de 1% de carbono y que podía ser endurecido por "templado", enfriándolo bruscamente en agua después de calentado al rojo, y era hecho en aquellos tiempos por el proceso de "cementación" en el cual el hierro esponja forjado se calentaba en carbón vegetal, en 1740, Huntsmsn hizo acero de herramientas fundiendo fierros de diferente contenido de carbono en un crisol, lo que fundó la industria de cuchillería de Sheffield. Pero el descubrimiento del acero barato de bajo carbono que puede hacerse en gran escala para propósitos de construcción, no llegó hasta mediados del siglo XIX, cuando Bessemer inventó el proceso de convertidor. A esto siguió en un par de años el proceso de fabricación de acero **Siemens-Martin** que permitía fabricar aceros a partir de chatarra, así se había iniciado la era moderna del acero.

La electricidad juega un papel importante en muchos procesos modernos de extracción. El paso decisivo fue el proceso **Hall-Hérout** para la producción comercial de aluminio, anunciado en 1886. Muchos otros metales tales como magnesio, sodio y calcio, también son ahora usados para producir los metales "modernos" tales como titanio, zirconio, uranio y niobio.

La ciencia de la Metalurgia Extractiva se desarrolla rápidamente en los años recientes, con la aplicación de la termodinámica y la teoría de cinética de reacción a sus problemas. La termodinámica de las reacciones metalúrgicas está ahora bien establecida, pero hay aún muchas oportunidades para más avances, tanto científicos como tecnológicos, en el estudio y control de la cinética de reacción.

Muchos de los procesos más nuevos de extracción tales como el proceso de fabricación de acero al oxígeno, tostación flash, refinación spray y el proceso de alto horno del zinc, dependen críticamente de la cinética de reacción.

1.3. METALURGIA MECÁNICA

La Metalurgia es una rama de una materia más amplia, conocida como "Ciencia de los Materiales e Ingeniería", que se preocupa de todos los materiales como ser metales, cerámica, vidrios, plásticos orgánicos y polímeros, madera y piedra.

La razón porque la Metalurgia se destaca por sí sola como una materia tan amplia y de contenido autosuficiente es, obviamente, debido a la importancia extraordinaria de los



metales como materiales de construcción. Nuestra sociedad como la conocemos sería totalmente imposible sin metales. La producción de metales y bienes metálicos representa más o menos un quinto de la producción bruta nacional en un país industrial moderno.

Los metales deben su importancia a sus propiedades mecánicas únicas, la combinación de alta resistencia con posibilidad de cambiar su forma plásticamente (ductibilidad y maleabilidad). Esta plasticidad permite conformarlos, por ejemplo, a barras, latas de conservas, carrocería de automóviles, etc., por procesos de elaboración plástica de materiales tales como prensado, embutidos, laminado y forja. Aún más importante, esta misma plasticidad le da a los metales resistentes la extraordinaria tenacidad que es la habilidad para resistir todos los golpes y choques del largo y duro servicio sin que se quiebren o desmoronen. **Metalurgia Mecánica** trata de todos estos aspectos, en particular con la elaboración plástica de metales, el ensayo de propiedades mecánicas, las relaciones entre estas propiedades y el diseño de Ingeniería, las relaciones de materiales y el comportamiento de metales en servicio. Es la parte más antigua de la Metalurgia. Los primeros metales conocidos, cobre, plata, oro se encontraron en forma nativa, como pepitas metálicas. Los meteoritos fueron una fuente de aleaciones hierro-níquel. Todos estos metales encontrados en forma natural son maleables y desde los primeros tiempos fueron conformados a ornamentos, herramientas y armas por martillado. La forja de metales se estableció ampliamente una vez que la Metalurgia Extractiva empezó a proveer cobre, bronce, hierro esponja y otros metales en mayor cantidad. Los romanos hicieron uso extenso de láminas y cañerías de plomo en los sistemas de suministro de agua. El acuñado marcado de un relieve en una superficie metálica con un punzón y un dado, fue desarrollado tempranamente. Las ventajas de la elaboración plásticas de metales a varias temperaturas también fue reconocido, **el trabajo en frío**, debido a que aumentó la dureza y resistencia de los metales tales como el cobre y el hierro; **trabajo en caliente**, particularmente del hierro esponja, debido a que los metales resultaban ser mucho más blandos y maleables a altas temperaturas y también porque podrían ser unidos por **soldadura a presión** al ser martillados uno sobre el otro en caliente.

El trabajo mecánico de metales permaneció por varios siglos en gran parte, como una industria artesanal, tipificada por la forja del herrero. La necesidad por partes forjadas más grandes y el uso de la potencia del vapor condujo al martinete y a la prensa de forja. Un desarrollo de importancia fue el laminador, cuyo uso se extendió en el siglo XVIII. Otros procesos, tales como trefilación, maquinado, y extrusión, también se desarrollaron y muchos procesos nuevos, incluyendo la forja en frío de acero usando lubricantes a alta presión y el conformado explosivo en el cual el metal es proyectado contra la matriz por la fuerza de una explosión. El conformado hidrostático en el cual se trabaja mientras está sometido a una gran presión hidrostática para evitar fractura, parece abrir una fase totalmente nueva en Metalurgia Mecánica permitiendo el trabajo de metales y aleaciones más frágiles.

La ciencia de la Metalurgia Mecánica consiste de tres partes principales y relacionadas. Primero, las propiedades mecánicas básicas tienen que ser explicadas desde una teoría atómica de metales, análogas a la teoría cinética de los gases. Aquí se le une la Metalurgia Mecánica con la **Metalurgia Física**. Luego, partiendo de estas propiedades básicas, el



comportamiento de los metales tiene que ser entendido y controlado. El ataque de este problema ha dado lugar a una nueva rama de la mecánica aplicada, **la teoría de la elasticidad**. Tercero, nuevamente en términos de propiedades básicas, el comportamiento mecánico de los metales en el servicio tiene que ser entendido y mejorado para evitar fallas, debido a deformación plástica, fractura frágil, fatiga, etc., y proveer una base racional para el diseño de Ingeniería y el eficiente y seguro uso de los materiales. Este es ahora un campo de mucha actividad.

1.4. METALURGIA FÍSICA

Pocas cosas de la naturaleza parecen más inanimadas que un pedazo de metal. El observador solo ve su propio reflejo en la superficie brillante y quieta y nada del mundo interno. Este mundo interno, sin embargo, es un lugar de actividad incesante. Los electrones disparan de un lado al otro a inmensa velocidad. Los átomos mismos también se mueven e intercambian lugares, aún cuando el metal está completamente sólido. Los cambios de temperatura pueden hacer que los átomos se reubiquen de improviso, tomando una forma radicalmente diferente de organización. En un acero templado esto puede ocurrir en un par de microsegundos, aún a temperaturas muy por debajo de la ambiente. Deformación plástica ocurre por el paso de defectos cristalinos, llamados dislocaciones, que se mueven a alta velocidad a través del metal y ocasionan deslizamientos visibles entre masas enormes de átomos. El tráfico de dislocaciones puede llegar a ser muy denso. Se forman inmensos tacos de tráfico, que hacen que las dislocaciones no puedan moverse y el metal se endurece. Cuando este metal "endurecido por trabajo" es calentado (recocido) se libera de estas dislocaciones en una ola de reorganización del ordenamiento atómico (recristalización). Ordenamientos atómicos completamente nuevos pueden ser producidos por aleación y estos a su vez pueden ser cambiados por tratamientos térmicos. Por ejemplo, cuando una aleación de aluminio se mantiene a temperatura ambiente, después de templada, sus átomos de aleación se mueven a través del sólido para agruparse en pequeños aglomerados, como gotitas de agua en la neblina, estos aglomerados endurecen el metal para dificultar el paso de las dislocaciones (endurecimiento por precipitación).

El estudio de todos estos efectos pertenece a la **Metalurgia Física**, la parte que trata de la estructura de los metales y aleaciones, con el objeto de diseñar y producir aquellas estructuras que dan las mejores propiedades. La Metalurgia Física tiene conexiones obvias con Metalurgia Mecánica, pero también tiene conexiones estrechas con Metalurgia Química, particularmente en conexión con la fundición de metales, la preparación de aleaciones, corrosión y los muchos efectos de las impurezas sobre las estructuras y propiedades de metales y aleaciones.

Es la parte más nueva de Metalurgia, aunque los procesos de templado y revenido, endurecimiento por trabajo, recocido y aleación, ya se descubrieron y usaron de un modo completamente empírico, en los tiempos antiguos. Intentos llenos de imaginación para construir una teoría de metales, incluyendo las ideas esenciales que los sólidos pueden ser **cristalinos**, o sea, que tienen sus átomos tomando una configuración ordenada, fueron



hechas en el siglo XVII y XVIII. Sin embargo, no había modo de probar estas ideas experimentalmente en aquellos tiempos y la mayoría de los científicos preferían trabajar en campos tales como mecánica, astronomía, electricidad y química donde el progreso era más fácil. Así se desarrolló la ciencia en la forma clásica como la conocemos por la historia.

Un descubrimiento trascendental para la Metalurgia Física, fue desarrollado por **Sorby**, en la segunda parte del siglo XIX, la técnica **metalográfica** para la observación de estructuras de metales y aleaciones con un microscopio óptico de reflexión. La gran barrera del brillo superficial fue penetrada finalmente, por un proceso de pulido y ataque químico para revelar la estructura interna. Se vio entonces la estructura **granular** de los metales, un ensamble de cristales diminutos entrelazados. Se observaron grandes cambios en la microestructura debido a aleación, trabajo y tratamiento térmico. Las ideas acerca de la naturaleza de estos cambios se agudizaron rápidamente una vez que fue posible interpretar estas observaciones. Aproximadamente en el mismo tiempo, la teoría de la termodinámica fue clarificando lo que sucedía cuando se mezclan diferentes sustancias y esto permitió estudiar las aleaciones científicamente. La combinación de la investigación sistemática en aleaciones mediante microscopía óptica abrieron muchas de las puertas hacia la Metalurgia Física. Los efectos del carbono en el acero pueden ser entendidos en buena medida, tanto como los procesos de endurecimiento por temple y revenido, las estructuras y propiedades de las primeras aleaciones, tales como bronce y latones, pudieron ser racionalizadas, y por fin se tenía un método para el desarrollo sistemático de aleaciones diseñadas deliberadamente para tener ciertas propiedades.

El microscopio metalúrgico aún es el mismo instrumento más útil de uso general con que cuenta el metalurgista físico. No se pudo por cierto, dar prueba directa del ordenamiento atómico cristalino en los metales, aunque dejó poco lugar para dudas. La prueba directa tuvo que aguardar hasta el descubrimiento del método de **Difracción de Rayos X**, cuya aplicación introdujo la segunda fase de importancia de Metalurgia Física en 1920. También se prepararon monocristales de metales, en ese tiempo, y sus propiedades mecánicas explicaron buena parte de los procesos de deformación plástica.

Los próximos grandes avances fueron teóricos. A principios de 1930 la teoría cuántica de electrones y átomos había llegado a ser suficientemente poderosa como para prever una teoría real del estado metálico, que podía explicar en que consiste realmente un metal y como conduce la electricidad. Las fuerzas que mantiene juntos a los átomos pudieron entonces ser entendidas y se inició la teoría de las aleaciones.

Se vio que la corrosión es (y demostrada experimentalmente) tanto un proceso eléctrico como químico y la movilidad de átomos en metales fue explicada en término de ciertos defectos bien definidos en la estructura cristalina (dislocaciones y vacancias). La metalurgia teórica fue forzada aún más lejos en los años inmediatamente después de la segunda guerra mundial por la necesidad de desarrollar metales y aleaciones que pudieran resistir altas temperaturas para turbinas a reacción, o aquellas que pudieran resistir radiación nuclear dañina en reactores nucleares y la demanda de materiales especiales a usarse en la industria eléctrica. Aún más recientemente, los experimentos han vuelto a tomar delantera debido al desarrollo del extremadamente poderoso microscopio



electrónico y técnicas de microscopía de campo iónico, que permite observar la estructura de los metales a escala atómica. El estudio de dislocaciones y estructuras atómicas en metales ha llegado a ser principalmente una ciencia experimental.

Los innumerables avances que han ocurrido en el campo de la ciencia básica de los metales en los años recientes han dejado el considerable problema de dirigirlos todos y convertirlos en un avance correspondiente en las ciencias aplicadas. No obstante, ahora podemos ver claramente como diseñar las microestructuras de metales y aleaciones de modo de desarrollar las propiedades básicas para los mejores efectos. Algunas de las nuevas micro-estructuras propuestas son muy diferentes de las tradicionales y hay un gran desafío tecnológico para llevarlos a cabo en gran escala comercialmente. En cuanto a la ciencia básica hay aún muchas áreas en las que quedan problemas fundamentales que tienen particularmente que ver con la teoría de aleaciones, con metales líquidos y con las propiedades mecánicas más complejas tales como fatiga de metales.

1.5. CIENCIA METALÚRGICA E INDUSTRIA

Hoy en día la Metalurgia es una ciencia aplicada. Su fascinación reside en el desafío de usar la ciencia para dar a la humanidad los mejores materiales de Ingeniería que permitan las leyes de la naturaleza y los recursos naturales a disposición del hombre.

A menudo, este simple hecho no es considerado o es olvidado. Esto se debe en parte al hecho que por miles de años la Metalurgia Industrial fue un acto empírico en el cual la "manera correcta" de hacer las cosas se aprendía por la dura experiencia. Sin embargo, esto es historia y la ciencia está ahora con nosotros. Pero durante el proceso de desarrollo de esta ciencia, la Metalurgia Académica a veces parecía una ciencia pura, sin relación alguna con la industria. En realidad, la explicación de las propiedades de los metales en términos de la microestructura y el desarrollo de la teoría de aleaciones puede existir por sí misma como contribución a la ciencia pura. El objetivo a largo plazo de este trabajo ha sido el de proveer una base científica para mayores avances prácticos. Un buen ejemplo es proveído por la historia de la superconductividad.

La superconductividad, por años una rama de la física pura, inmediatamente llegó a ser materia de intenso interés metalúrgico, una vez que la posibilidad de hacer componentes superconductores útiles fue claramente visualizada.

La ciencia aplicada de esta materia conecta la ciencia de los metales. Esta conexión solo se mantiene y refuerza por el cuidado y la atención deliberada, porque siempre hay una tendencia de separación entre la parte científica y la industrial. Es tan natural para el investigador dedicarse totalmente a su problema científico como lo es para el industrial dedicarse totalmente a sus problemas de producción, pero esto tiene demasiado a menudo el resultado que cada uno no tiene suficiente tiempo para el otro. Esta tendencia debe, sin embargo, ser resistida a toda costa; ya que sin un propósito práctico la ciencia llegará a ser irrelevante, trivial y sin el científico la industria se estanca técnicamente y sobrevive sólo gracias a la mano de obra barata y la viveza en la contabilidad.



La dificultad de este problema no debe ser subestimada. Las cualidades que ayudan a ser un buen investigador, habilidad de fijar la atención en un sólo problema científico con exclusión de todo lo otro y de suspender todo juicio hasta que los hechos están bien claros, no son muy recomendables para el miembro de un grupo de diseño o de producción donde la amplitud de conocimientos, rápida respuesta y buen juicio intuitivo son indispensables. Muy pocas personas serán capaces de contribuir completamente en ambos lados de la materia, el científico y práctico, por lo menos no en la misma etapa de su carrera. Aún más, las cualidades que hacen un buen experimento, selección de condiciones especiales y materiales experimentales, a desplegar los efectos críticos tan claramente y simplemente como sea posible, control riguroso de todas las variables no deseables a menudo conducen al experimento lejos del problema industrial que se pensaba analizar.

Por esta razón, el investigador metalúrgico no puede resistir de llegar a separarse de sus colegas más prácticos. Pero él nunca debe dejar de responder al desafío de hacer que su trabajo, sea lo más directamente relevante al de ellos, sin sacrificar los principios de la buena ciencia. El investigador metalurgista debe buscar y extraer sus problemas precisamente del corazón de la misma industria, pero deben ser científicamente buenos problemas. La habilidad de hacer esto, y el placer de hacerlo es a veces bastante remoto al corazón de la investigación científica pura, y el inculcar esta habilidad y actitud es quizás la principal justificación para la enseñanza de la metalurgia como una disciplina académica separada. El metalurgista industrial también tiene sus desafíos. El debe permanecer atento a la ciencia y aún debe resolver sus urgentes problemas por la ruta más rápida, que a veces puede ser en gran medida empírico porque no hay tiempo para parar y llenar la base científica que falta. Juicio intuitivo, una habilidad de concebir y ensayar soluciones rápidas adhoc y seguir sin mayores preocupaciones, si fueron exitosos, son esenciales aquí.

Sin embargo, una buena base de ciencia analítica es igualmente importante para disminuir la selección de posibles rutas empíricas, para coordinar todos los innumerables pedazos de información hasta obtener un cuadro coherente y para asignar valores y poner énfasis sobre las varias partes del programa, para demostrar donde el camino puede ser recorrido rápidamente y donde se debe hilar más fino. Este tipo de Metalurgia también es ciencia aplicada y requiere gran poder analítico.

En los capítulos que siguen, trataremos de desarrollar una visión unificada de ambos aspectos lo científico y lo industrial. Aún en un curso introductorio hay una gran cantidad de ciencia y aún un gran número de datos que aprender. La ciencia no puede tomar vuelo sin los hechos o datos pero un largo recital preliminar de los datos de la Metalurgia Industrial sin la ciencia, solo es estupificador. Para sobrellevar este problema trabajaremos a través de la ciencia, partiendo por el núcleo atómico y llegando gradualmente a las estructuras más complejas de los metales industriales, para proveer una línea continua al tema entre manos, pero por el camino haremos hincapié en todos los puntos adecuados para mostrar como esta ciencia está relacionada a las formas características de la Metalurgia Industrial. Por el camino de cruce de la ida y vuelta entre la ciencia de los metales y lo práctico industrial. Trataremos de visualizar la Metalurgia como una ciencia aplicada que conecta estos dos lados.