

ENTRE GRANOS Y ELEMENTOS. EL ESTUDIO DE LOS METALES ANTIGUOS

EDGARDO D. CABANILLAS¹, LUIS R. GONZÁLEZ²,
TULIO A. PALACIOS³ Y ADRIAN PIFFERETTI⁴

“Los habían visto varios artistas y arqueólogos; todos aseguraron que se trataba de verdaderas obras de arte y elogiaron mucho su belleza. Sin embargo, ninguno logró identificar con qué metal habían sido elaboradas las piezas, ni a qué estilo o escuela podían adscribirse.”
(H. P. Lovecraft, “La sombra sobre Innsmouth”, p. 249)

RESUMEN

El interés por los estudios de laboratorio de los metales antiguos nació con la formalización de la disciplina arqueológica. Durante mucho tiempo la especialidad estuvo dominada por enfoques de corte evolucionista en los que se le otorgaba a la tecnología una lógica propia. Las investigaciones de las últimas décadas, en particular sobre la metalurgia andina, han puesto de relieve que el desarrollo de las técnicas para la elaboración de metales en el pasado respondió a los contextos socioculturales en los cuales esos bienes tuvieron desempeño. En la actualidad, un variado arsenal de técnicas de estudio permite conocer los procedimientos tecnológicos puestos en práctica por los antiguos metalurgistas, brindando información aplicable a múltiples aspectos de la dinámica social prehispánica.

ABSTRACT

The interest on laboratory studies on ancient metals started with the formalization of the archaeological discipline. For a long period of time the specialty was dominated by evolutive approaches in which technology was invested with its own logic. The last decades research, particularly on Andean metallurgy, had proved out that the development of metals making techniques in the past was related to sociocultural contexts in which those goods were used. At present time, a wide range of study techniques allow us to know the technological procedures that old metallurgist put into practice, offering information suitable to understand multiple aspects of prehispanic social dynamics.

¹ CONICET. Dpto. Combustibles Nucleares, CNEA; cabanill@cnea.gov.ar

² Dpto. Ciencias Antropológicas, Facultad de Filosofía y Letras, UBA; zangolez@yahoo.com

³ Dpto. de Materiales, CNEA; tuliopal@cnea.gov.ar

⁴ CEMAT, Facultad Regional Venado Tuerto, UTN; apiffere@agatha.unr.edu.ar

DIME QUÉ TIENES Y TE DIRÉ QUIÉN ERES

Durante la segunda década del siglo XIX, Christian Jurgensen Thomsen (1786-1865), curador del Museo Nacional de Dinamarca, se enfrentaba al problema de otorgar algún orden a la gran cantidad de materiales arqueológicos, procedentes de distintos y distantes lugares, que acumulaba la institución. En 1819 le encontró una solución al caos, proponiendo un sistema clasificatorio de valor cronológico basado en diferenciar las evidencias según tres Edades (de la Piedra, del Bronce y del Hierro). Este sistema, que, con refinamientos posteriores, se constituyó en una herramienta fundamental para el desarrollo de la arqueología del Viejo Mundo, dejaba traslucir las ideas de la época, con el Progreso simbolizado en la creciente capacidad del hombre para crear elementos a partir de materiales que exigían un creciente nivel de complejidad para trabajarlos. Al mismo tiempo, la elección de metales para marcar algunas etapas de la evolución de la humanidad ponía de manifiesto el especial reconocimiento que el imaginario social guardaba para ellos, teniendo en cuenta los logros de la ingeniería en el marco de la Revolución Industrial.

Bajo estas condiciones históricas, el estudio de los metales antiguos comenzó a desarrollarse en forma paralela a la formalización de la arqueología como disciplina, pero convirtiéndose en tema reservado a los historiadores de la tecnología. Las investigaciones tendieron a focalizarse en cuestiones tales como el descubrimiento de las técnicas de fundición o de las habilidades tecnológicas de los metalurgistas del pasado, en muchas ocasiones intentando demostrar la existencia de un inevitable proceso que, desde el cobre, culminaba en el acero de la sociedad occidental (Ehrenreich 1991:5). De acuerdo a Heather Lechtman (1980:268, 1988:301-303), el encuadre teórico que por mucho tiempo guió a los estudios arqueometalúrgicos se caracterizó por su concepción evolutiva unilineal, que consideraba que las metalurgias de desarrollaban siguiendo un curso determinado por una lógica técnica implícita, atravesando fases en una secuencia ordenada desde lo simple a lo complejo (trabajo sobre metales nativos antes de la fundición de menas, procesamiento de los óxidos

antes de los sulfuros, los bronce con arsénico antes de los bronce con estaño). Así, los antiguos metalurgistas aparecían como protocientíficos que, mediante observación, experimentación y deducciones, fueron lentamente dominando el arte de beneficiar los metales (Budd y Taylor 1995:137). Al mismo tiempo, la complejidad implicada en la producción llevó a negar que el descubrimiento pudiera haber tenido lugar en distintos paisajes del planeta; antes bien, había ocurrido una única vez, en el Cercano Oriente, y desde allí se había extendido a otras regiones (Thompson 1958, Wertime 1964:1257, 1973:876, Muhly 1988:3).

El debate en torno a la difusión, las rutas por las cuales se habría materializado y la secuencia cronológica inherente, dio origen a numerosas investigaciones, las que sirvieron no sólo para aumentar el caudal de información relacionado con la antigua tecnología sino también para afinar las técnicas de laboratorio. El estudio químico de metales arqueológicos comenzó a ser una práctica común desde principios del siglo XX, en base a los tradicionales y destructivos análisis por vía húmeda (Mohen 1990) y con el desarrollo de técnicas de laboratorio con mayor rapidez de operación y que requerían muestras pequeñas del material a determinar, se encararon programas sistemáticos de caracterización (Britton y Richards 1965, Slater y Charles 1970, Pernicka 1986, Chernykh 1992, Budd et al. 1996). Por lo general, estos estudios perseguían la construcción de “historias tecnológicas” de los conjuntos analizados, las cuales podían ser integradas al esquema evolutivo dominante (cf. Tite 1996:246).

La arqueometalurgia fue definiéndose así como una especialidad dedicada al estudio de los aspectos del pasado relativos al surgimiento y el desarrollo de la elaboración de los metales, incluyendo los procesos de extracción, la preparación de aleaciones, la elaboración de artefactos y su degradación durante la permanencia en los depósitos arqueológicos. Como señalara Cleere (1993), el campo de estudio se convirtió en un “coto de caza” para especialistas en ciencias de los materiales y físico-químicas, más preocupados por demostrar la eficacia y utilidad de una técnica de laboratorio que por clarificar problemas arqueológicos (véase, por ejemplo, Furlan et al. 1985, Frangopol y Morariu 1988).

NUEVAS TENDENCIAS: LOS METALES EN SOCIEDAD

El cuadro descrito comenzó a ser seriamente cuestionado desde hace pocas décadas, dentro de un debate más amplio que involucraba a las relaciones entre tecnología y dinámica social (entre varios, Lechtman y Steinberg 1979, Winner 1986, Pfaffenberger 1988, Lemmonier 1992, Dobres y Hoffman 1994, 1999, Killick 2004). En particular, las denuncias apuntaban a señalar que en los modelos arqueometalúrgicos formulados se dejaban de lado los contextos culturales en los cuales las tecnologías habían adquirido su lógica. Dicho de otra manera, al sobredimensionar los supuestos efectos de los logros tecnológicos sobre las sociedades, se habían perdido de vista los efectos de las sociedades sobre la tecnología (Ehrenreich 1995:4, 1996). Si bien los procesos de la transformación del mineral en metal y gran parte de la manipulación del producto están regidos por leyes físicas y químicas que no dependen de condicionamientos culturales (Muhly 1988:2-3, Rovira Llorens 1991:83), queda aún suficiente espacio como para que una tecnología se manifieste de muchas diferentes maneras de acuerdo al marco social en la que se inscribe (Lemmonier 1992, Graves-Brown 1995:90). De tal modo, en las investigaciones arqueometalúrgicas se comenzaron a considerar, más que los cuándo, dónde y cómo de los procesos de producción, los por qué (White 1988). Se refinaron los conceptos que asociaban metalurgia y complejidad social, ya adelantados por Vere Gordon Childe (1930), colocando en primer plano las condiciones sociohistóricas que promovieron y legitimaron los cambios tecnológicos (por ejemplo, Renfrew 1991, Montero Ruíz 1992).

Serían los trabajos que desde la década de 1970 comenzó a desarrollar Heather Lechtman en la región andina los que con mayor claridad expusieron el potencial explicativo de la arqueometalurgia cuando la tecnología es analizada con referencia a su contexto sociocultural. Combinando estudios de campo y de laboratorio, experimentaciones y revisión de fuentes históricas, Lechtman fue demostrando que el ámbito andino albergó una de las grandes tradiciones metalúrgicas del mundo antiguo,

para cuya apreciación era necesario dejar atrás los modelos de desarrollo elaborados para abordar la evidencia en el Viejo Mundo. La lógica de la metalurgia andina no comprendía sólo a las propiedades físicas y químicas de menas y metales, sino que integraba un conjunto de conocimientos técnicos, creencias y eventos sociopolíticos: “Metallurgy is as much a cultural phenomenon as it is a series of physical and chemical phenomena” (Lechtman 1980:269).

En efecto, la manufactura de un objeto siempre involucra un ajuste entre las propiedades del material, sus limitaciones y posibilidades, y el diseño del objeto, como se pretende que luzca (Lechtman 1999:223). El hecho que las propiedades físicas de los materiales sean inmutables y constantes, cualquiera sea el lugar donde se encuentren, significa que las variaciones que se pueden detectar en los modos en que tales materiales fueron procesados respondieron a elecciones humanas. Precisamente es esta posibilidad de elegir entre varias alternativas técnicas posibles lo que transforma a la tecnología en un hecho cultural. La metalurgia fue mucho más que los recursos disponibles y los procesos de transformación aplicados y, lejos de responder a una evolución “natural”, su trayectoria estuvo determinada por una dialéctica entre la física y la química de la producción y los elementos superestructurales que dictaminaron sobre el modo en que estos factores debían ser acomodados dentro de la representación dominante del mundo y de la sociedad. No siempre en la producción de metales se había privilegiado lo directamente utilitario. Por el contrario:

“En los Andes, los metales desempeñaban su rol principal en el dominio de lo simbólico, tanto en el ámbito secular como religioso de la vida. Llevaban y representaban el contenido o mensaje de jerarquía, riqueza y poder político y reforzaban el poder afectivo de los objetos de culto religioso.” (Lechtman 1991a:12).

Lechtman sostuvo que para comprender las características de un sistema metalúrgico dado es necesario situarlo en su contexto social, lo que implica no sólo detalladas investigaciones empíricas sino también planteos de índole antropológica. Desarrolló el concepto de “estilo tecnológico”, subrayando que es posible inferir dimensiones no materiales de la conducta

del pasado a partir de los patrones técnicos manifestados en la cultura material (Lechtman 1975). Los estilos tecnológicos representan tanto elecciones arbitrarias unidas a las tradiciones ancestrales como actitudes de los artesanos hacia los materiales que usan, los valores que las sociedades atribuyen a los eventos tecnológicos y las prescripciones previstas para el desempeño de los objetos producidos. Entre los ejemplos de la aplicación de estas ideas merecen citarse sus rigurosos estudios sobre el dorado superficial de objetos de base cobre de los Andes centrales, a partir de los cuales postuló que los complejos procedimientos técnicos implementados por los antiguos metalurgistas para llevar a la superficie el metal precioso contenido en las aleaciones respondían no sólo a pretensiones estéticas sino también a un particular modo de concebir a las “esencias” de los materiales. Para aquellos metalurgistas, sostuvo, “that which appears superficially to be true of it must be also inside it” (Lechtman 1984:30).

Los conceptos de esta investigadora ejercieron marcada influencia en la labor de los estudiosos de la metalurgia andina de los últimos años (entre otros, Bray 1991, Hosler 1994, Shimada 1994, Epstein 1996, Saunders 2003, González 2004) y pusieron de manifiesto que los datos arqueometalúrgicos pueden ser relevantes para abordar múltiples aspectos de la dinámica social del pasado, como la organización de la producción especializada y las interacciones a larga distancia. De igual modo, contribuyeron a construir un puente sobre el abismo que durante mucho tiempo había separado a los especialistas en ciencias de los materiales y a los arqueólogos.

METALES Y ALEACIONES

A la hora de considerar la antigua metalurgia de los Andes en general y del Noroeste argentino en particular, no debe perderse de vista que fue el cobre el principal protagonista en el desarrollo de la tecnología (Berthelot 1986, Ramírez 1994:93, Shimada 1998:42-43). Como ocurre con algunos otros metales, el cobre puede ocasionalmente presentarse en la naturaleza en forma más o menos pura, como hojuelas o planchas. En este sentido, cabe destacar que las evidencias más antiguas de trabajo en cobre en los Andes, registradas en Mina

Perdida, cerca de Lima, en contextos fechados entre los siglos XIII y X aC, consisten en hojas logradas por martillado de cobre nativo (Burger y Gordon 1998).

Pero como regla general el cobre se encuentra formando variadas combinaciones minerales, para cuyo aprovechamiento se requería llevar a cabo operaciones de fundición, proporcionando un ambiente con temperaturas superiores a los 1000 °C y adecuado para la liberación química del elemento deseado. Tanto el aprovisionamiento y la preparación de los minerales cupríferos como su fundición exigían variadas tareas, las que, a su vez, nos hablan de la participación de operarios con alta capacidad técnica (Lechtman 1976, Ottaway 2001, González 2004). La dramática transformación de los minerales mediante fuegos extremos daba como resultado un producto diferente y novedoso, que podía ser colado en moldes, martillado en hojas, estirado en alambres, soldarse y, si algo salía mal, refundirse para otro intento. Todo tipo de objetos, utilitarios y ornamentales, podían ser conformados a partir de las particulares propiedades del nuevo material, siendo algunas destacables la dureza y la resistencia a la rotura, la elasticidad, la maleabilidad, la susceptibilidad de adquirir brillo por pulido y el sonido característico. Estas propiedades se relacionan con la organización atómica de los metales, con estructuras espaciales ordenadas (cristales) en las cuales los iones cargados positivamente permanecen en sitios fijos, los nudos de la red, al tiempo que comparten sus electrones formando una nube que posee una gran movilidad.

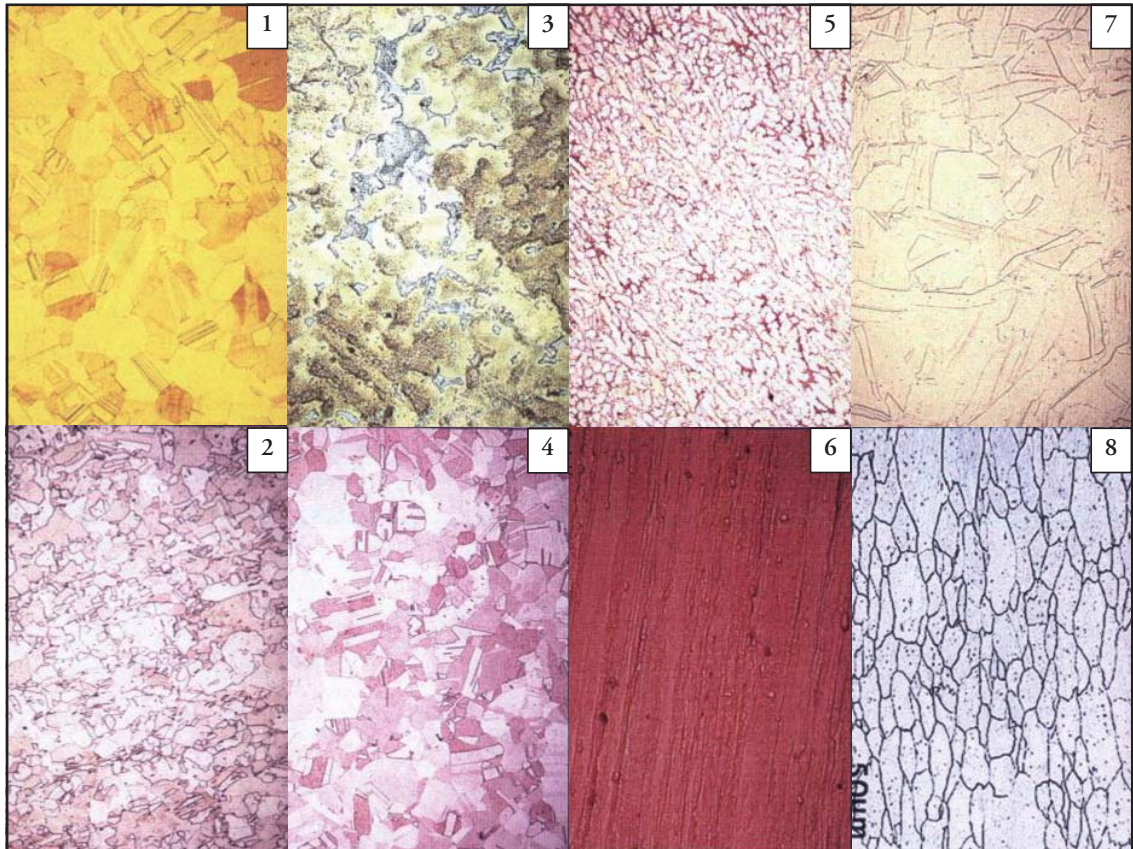
El metal puede ser utilizado en la forma en que es obtenido o mezclarlo con otros para formar aleaciones. Si en estado líquido se lo vuelca en moldes, al solidificarse reproducirá la forma interna del recipiente. También, mediante martillado, es posible obtener hojas o láminas que luego se pueden recortar, plegar y unir para elaborar el objeto deseado. Todo tratamiento térmico y mecánico que se le imprima al metal a partir de ser obtenido implicará modificaciones en su microestructura, y, por tanto, en sus propiedades. Luego de la colada, el enfriamiento comienza en las paredes del molde y se produce el fenómeno de nucleación cuando los átomos se van uniendo y ordenando en la red. Se forma

así una estructura característica con forma arborescente, llamada dendrita, que se hace más evidente cuando más lento es el enfriado. Una vez completada la solidificación, se han formado los granos o cristales, cuyos tamaños están determinados por la rapidez del enfriamiento: si este es rápido, se formarán muchos núcleos y se obtendrá una estructura de grano fino; si el enfriamiento es lento, aparecerán menos núcleos y el grano será más grueso. Un metal de grano fino presentará mayor dureza y tenacidad que otro de grano grueso (Carcedo 1998:90-92).

El martillado deforma la microestructura del metal, haciéndolo más duro. Esta propiedad resulta de utilidad para mejorar el desempeño de un objeto o parte de él, como el filo de un instrumento de corte. No obstante, llega un punto durante el martillado en que el metal pierde maleabilidad y se torna quebradizo. Este fenómeno, que es especialmente notable en el cobre, puede remediarse calentando a la pieza a temperaturas medias (operación denominada recocido), lo que provoca una recrystalización de la estructura y le devuelve maleabilidad. Estas modificaciones microestructurales pueden ser detectadas en estudios de laboratorio y, por tanto, permiten inferir el grado

y alcance de los trabajos mecánicos o térmicos a que eventualmente fue sometido un objeto durante su fabricación (Fig. 1).

El cobre fundido es difícil de colar, tendiendo a oxidarse muy rápidamente y, al solidificarse, adquiere una excesiva plasticidad, la cual, como se dijera, puede modificarse por martillado pero obligando a múltiples operaciones de recocido. Por fortuna, el cobre tiene la capacidad de mezclarse con otros metales, produciendo aleaciones. En estas mezclas, el producto resultante reviste algunas características distintas a las de los elementos que intervienen considerados en forma individual. No sólo se modifica el punto de fusión sino también el color, la dureza, la fragilidad y la facilidad para ser trabajado en frío o en caliente (Lechtman 1996). Las aleaciones pueden formarse de manera azarosa, a partir del ingreso en el metal fundido de elementos minoritarios presentes en la mena de cobre de origen. Sobre este punto, también debe considerarse la posibilidad que los metalurgistas prehispánicos, basándose en su experiencia, eligieran procesar determinadas menas, las que contenían esas impurezas y de las que, sabían, se obtenían productos de ciertas características particulares.



Una de las aleaciones más discutidas en torno al tema de su intencionalidad es el bronce de cobre y arsénico, un material que durante siglos mantuvo popularidad entre los metalurgistas de la costa norte peruana. En general, los depósitos de cobre suelen estar geológicamente asociados con cantidades menores de minerales conteniendo arsénico y algunos sulfuros son, por naturaleza, potenciales bronce arsenicales (Charles 1967, 1992, Carcedo 1998). El arsénico es sumamente volátil, no obstante lo cual, a partir de la reducción de menas contaminadas, una cantidad variable del elemento puede ser retenida en el metal, de acuerdo a las temperaturas del contenedor de fundición, las características de la colada, las eventuales operaciones de refinación del metal obtenido y el posterior trabajado en frío (Tylecote 1980:188). Varios autores han tratado de establecer la intencionalidad en la producción del bronce arsenical a partir de la proporción de aleante contenido en los objetos. Coghlan (1975:22) expresó que con 1 o 2 % de arsénico en el cobre debe hablarse de impurezas en las menas fundidas, postura también sostenida por Tylecote (1987:43). Rovira Llorens (1991, 2004:16-17), por su parte, habló de un límite mínimo de 4 a 6 % de arsénico para pensar en una aleación intencional.

Una entusiasta impulsora de la idea de considerar a las combinaciones cobre-arsénico como verdaderos bronce, en el contexto de la metalurgia andina, fue Lechtman (1996), quien propuso llamar cobres arsenicales a aquellos materiales que evidenciaran menos del 0.1 % de arsénico y aleaciones bajas cuando las proporciones se ubicaran entre 0.1 % y 0.5 % de arsénico. Desde esta postura, puede considerarse bronce arsenical a aquellas aleaciones con contenidos mayores a 0.5 % de arsénico. Lechtman (1991b) manifestó que la evidencia proveniente de la región andina sugiere que las aleaciones de cobre-arsénico fueron producidas directamente a través de cargas controladas en el horno. Al respecto, realizó experimentos utilizando menas cuproarsenicales y óxidos de cobre, con los que obtuvo lingotes que alcanzaban en su composición 7 % de arsénico.

Otro tipo de bronce y que parece haber sido el preferido en la región surandina, fue la aleación de cobre y estaño. Los especialistas más destacados han señalado las pocas probabilidades que en

la naturaleza las menas de cobre se encuentren contaminadas con estaño (Tylecote 1979:14, Coghlan 1975, Charles 1992). No obstante, esta contaminación, especialmente en bronce de baja aleación, puede producirse por el agregado, en el contenedor de fundición, de chatarra de anteriores operaciones (Tylecote 1991). De igual modo, fueron propuestos porcentajes mínimos de estaño para considerar al metal un verdadero bronce de producción intencional. Rivet y Arssandaux hablaron de un 2 %, Nordenskiöld, 1 a 2 % y Root 1 % (en A. González 1959; véase también Weeks et al. 1999). Mientras Coghlan (1975:35) y Rapp (1988) se inclinaron por un 2 %, Glumac y Todd (1991) hicieron referencia a un 3% y Tylecote (1987), todavía más cauteloso, se inclinó por fijar un límite mínimo de un 4 % de estaño. Tomando en cuenta las menas del Noroeste argentino se ha sugerido que la presencia de apenas un 0.5 % de estaño en el metal es ya significativa (A. Pedersen, en A. González 1959).

La elaboración del bronce estañífero habría podido realizarse de diversas maneras, como, por ejemplo, agregando estaño metálico, obtenido previamente por reducción de sus menas, al cobre fundido (véase Earl 1994). Tylecote (1979) consideró como más probable que se dispusiera al estaño metálico en un crisol, con piezas de cobre, y que ambos metales cofundieran en ambiente reductor. Otra forma pudo ser agregar el estaño como óxido o fundiendo una carga de minerales de ambos metales (Coghlan 1975, Tylecote 1991). Cleuziou y Berthoud (1982) afirmaron que, en condiciones de laboratorio, si el estaño es agregado como óxido directamente al cobre fundido, el cobre sólo puede llegar a retener un 1% de estaño. Una mayor concentración puede lograrse promoviendo una reducción del óxido de estaño por sobre el cobre fundido, de tal forma que el aleante vaya incorporándose por goteo. Rutledge y Gordon (1987) sostuvieron, a partir del hallazgo de hojas de estaño metálico en Machu Picchu, que el bronce era fabricado por la mezcla de metales puros, mecanismo que había sido sugerido tiempo antes por Mathewson (Lechtman 1991b). En un reporte sobre la observación de fundiciones actuales llevadas a cabo según métodos tradicionales en Kadavaloor, India, se expresó que cargas de cobre y estaño puros, en una proporción 10:3 en peso,

conducían a la obtención de objetos con 21 % de estaño (Pillai et al. 1994).

Recientemente, Lechtman dio a conocer un cuerpo de evidencias de laboratorio que apunta a señalar que, aproximadamente entre los siglos II y VII, en el área de influencia de Tiahuanaco fue desarrollada una aleación ternaria de cobre, arsénico y níquel, con la cual se manufacturaron tanto bienes utilitarios como ornamentales (Lechtman 2003, Lechtman y McFarlane 2005). Respecto de las propiedades físicas de esta aleación, la autora consideró que eran similares a las del bronce arsenical. Corresponde mencionar otra importante aleación, el latón, elaborado a partir de la adición de cinc al cobre. La mayoría de los especialistas acuerda en que el latón fue introducido en América por los europeos (Rovira Llorens 1991:91), pero no son raros los registros de piezas de metal, en particular de momentos tempranos del Noroeste prehispánico, que contienen cinc en proporciones apreciables (véase, por ejemplo, A. González 1959). Trabajos experimentales de fundición de menas de cobre procedentes de Capillitas han puesto de relieve que el cinc es un componente minoritario habitual de las mismas y que una proporción del elemento puede pasar al metal obtenido (González et al. 2007). Sin embargo, estos contenidos están lejos de los que se registran en objetos asignados a la época hispano-indígena del Noroeste (Gluzman y González 2007).

TÉCNICAS DE ESTUDIO

Por lo general, cuando un objeto de metal ingresa al laboratorio lo hace acompañado por dos interrogantes principales: 1) ¿De qué material está hecho? y 2) ¿Cómo fue hecho?. Un variado conjunto de técnicas de estudio permitirán dar respuesta a estas preguntas, quedando en manos del arqueólogo aplicar la información a propuestas sobre el contexto sociohistórico de aquel objeto.

Como es sabido, en la recuperación y preservación de las evidencias del pasado deben extremarse los cuidados a los efectos de no perder información y comprometer estudios posteriores. En el caso de los objetos de metal, es necesario evitar restregarlos, rascarlos o lavarlos, puesto que pueden destruirse las cubiertas formadas sobre las piezas por los productos de corrosión, las

cuales los mantienen estabilizados impidiendo o retrasando la continuación del proceso. Si estas cubiertas se eliminan y, por lo tanto, se exponen al ambiente las superficies de los metales, la corrosión puede reiniciarse a gran velocidad. Por otro lado, mientras el artefacto no sea sometido a una radiografía o medida su densidad, no es posible asegurar cuánto material remanente queda sin corroer y hasta cuánto puede ser seguro remover los productos de corrosión sin que se desintegre la pieza.

La capa de productos de corrosión que se mantiene sobre la superficie del metal puede ser aprovechada para realizar análisis químicos cualitativos, disminuyendo así la cantidad de material que es necesario tomar del metal remanente para su estudio. Asimismo, existen técnicas de reducción del material corroído y de consolidación de la capa corroída, las que permiten que, a pesar de que el metal se haya transformado totalmente en óxido, el producto de corrosión se vuelva lo suficientemente rígido como para reproducir la forma de la pieza original. Se debe agregar que algunas piezas metálicas pueden contener en su superficie material del molde de colada y si se realizara una limpieza demasiado meticulosa se perderían importantes pistas para conocer las técnicas de manufactura.

En consecuencia, es aconsejable que los artefactos metálicos se registren tal cual como se encuentren y que para identificarlos se lo haga con tarjetas, evitando siglarlos en su superficie. Se recomienda embalarlos con el sedimento que los acompañaba, en papel de aluminio y nunca en papel común. Posteriormente, se los puede colocar dentro de bolsas de plástico y finalmente en cajas lo suficientemente rígidas para su transporte posterior. Si los objetos se recuperan de sitios húmedos o estuvieron sumergidos en agua, conviene dejarlos secar a la sombra antes de envolverlos en el papel de aluminio. La conservación del sedimento acompañante tiene su importancia. Por ejemplo, en el caso de los latones pueden surgir dudas sobre el empobrecimiento de la representación superficial de cinc, relativas a una pérdida de este metal por calentamiento durante la elaboración del objeto o por corrosión preferencial a partir de su enterramiento. Disponer de sedimento permite determinar su acidez y tener argumentos sobre la cuestión.

Ya en el laboratorio, una correcta toma de muestras es esencial para llevar a cabo cualquier tipo de análisis, dado que si la muestra no resultara representativa de la pieza original o si sus componentes no corresponden a la composición media de la pieza puede llegarse a conclusiones erradas. Si se pretende estudiar un proceso corrosivo se deberán tomar muestras de los productos superficiales de corrosión pero si lo que se desea es conocer la composición química original de la aleación, deberá eliminarse de la superficie todo rastro visible de la oxidación para poder llegar al material base. Sobre el particular, debe tenerse presente que las piezas fundidas suelen presentar variaciones significativas de composición entre una zona y otra, especialmente cuando contienen elementos poco solubles, como es el caso del plomo. Por lo tanto, a la hora de obtener una muestra es necesario seleccionar la zona más adecuada o, mejor aún, efectuar varias tomas, en distintos lugares, para poder promediar los resultados.

Los análisis por espectroscopías de absorción y de emisión requieren la extracción de material de la pieza, por lo general en el orden de 10 a 20 miligramos, para hacer un análisis semicuantitativo. Si la pieza es pequeña y dotada de decoración, las tomas de muestras deben planificarse cuidadosamente para evitar daños visibles. De todas formas, estas tomas se realizan empleando una fresa de diamante de uso odontológico y un torno de laboratorista, lo que produce limaduras finísimas, del interior o exterior de las piezas. Cuando se desea estudiar la presencia de elementos traza, es decir aquellos elementos presentes en mínimas cantidades, es fundamental la limpieza de contaminantes vinculados con el terreno de depositación, durante el transporte y manipulación de la pieza y aún del ambiente de la toma de las muestras.

Previo a cualquier intervención, las piezas deben ser sometidas a un detallado registro, que incluye fotografías, dibujos y metrología dimensional, utilizando reglas, calibres, tornillos micrométricos, etc. La medición incluye a la masa (en términos corrientes, el peso) con la ayuda de balanzas de precisión. La densidad del material, definida como la relación entre la masa y el volumen, también representa una magnitud de interés.

Mucha y valiosa información puede obtenerse de una simple pero exhaustiva inspección de la superficie del material. A partir de ello pueden derivarse hipótesis acerca de, por ejemplo, como fue conformada la pieza en cuestión, la severidad del uso a que fue sometida y el efecto del ambiente de depositación. La observación, aún a pocos aumentos, permite detectar rasgos como fisuras, grietas, rechupes, marcas de abrasión, dirección de los tratamientos mecánicos, grado de corrosión y características de la pátina (Killick 1996). Toda esta información permite seleccionar la combinación de las técnicas analíticas más adecuadas a aplicarse posteriormente.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Para la observación de un objeto o de una muestra de él se dispone de un amplio repertorio de métodos y dispositivos, como las lupas, los microscopios metalúrgicos por reflexión y los microscopios por transmisión. Pero si lo que se desea observar son porciones muy pequeñas de su superficie para lo cual no resultan efectivos otros dispositivos, se puede hacer uso del microscopio electrónico de barrido, con aumentos que pueden llegar a los 8000x. El MEB utiliza electrones generados por un filamento parecido al de una lámpara incandescente. Dotados con una energía potencial inicial de 30 keV, los electrones viajan por la columna del microscopio e impactan en la muestra a observar (Fig. 2). Uno de los resultados de este choque es la aparición de electrones de baja energía de amarre ('rebotados' o retrodispersados), arrancados de la muestra y que producen rayos X característicos. Los electrones secundarios son detectados por un dispositivo, reproduciendo la topografía de la muestra, y volcando la imagen en una pantalla, amplificada mediante lentes magnéticas. Así, el haz de electrones se mueve como una escoba barriendo la muestra y reconstruye, aumentada, una imagen real de ella.

Los electrones retrodispersados pueden aprovecharse, a partir de las diferencias de energía, para conocer el número atómico de los átomos golpeados. Así se puede ver en la pantalla formada por el detector de electrones retrodispersados una imagen parecida a la que se forma con electrones

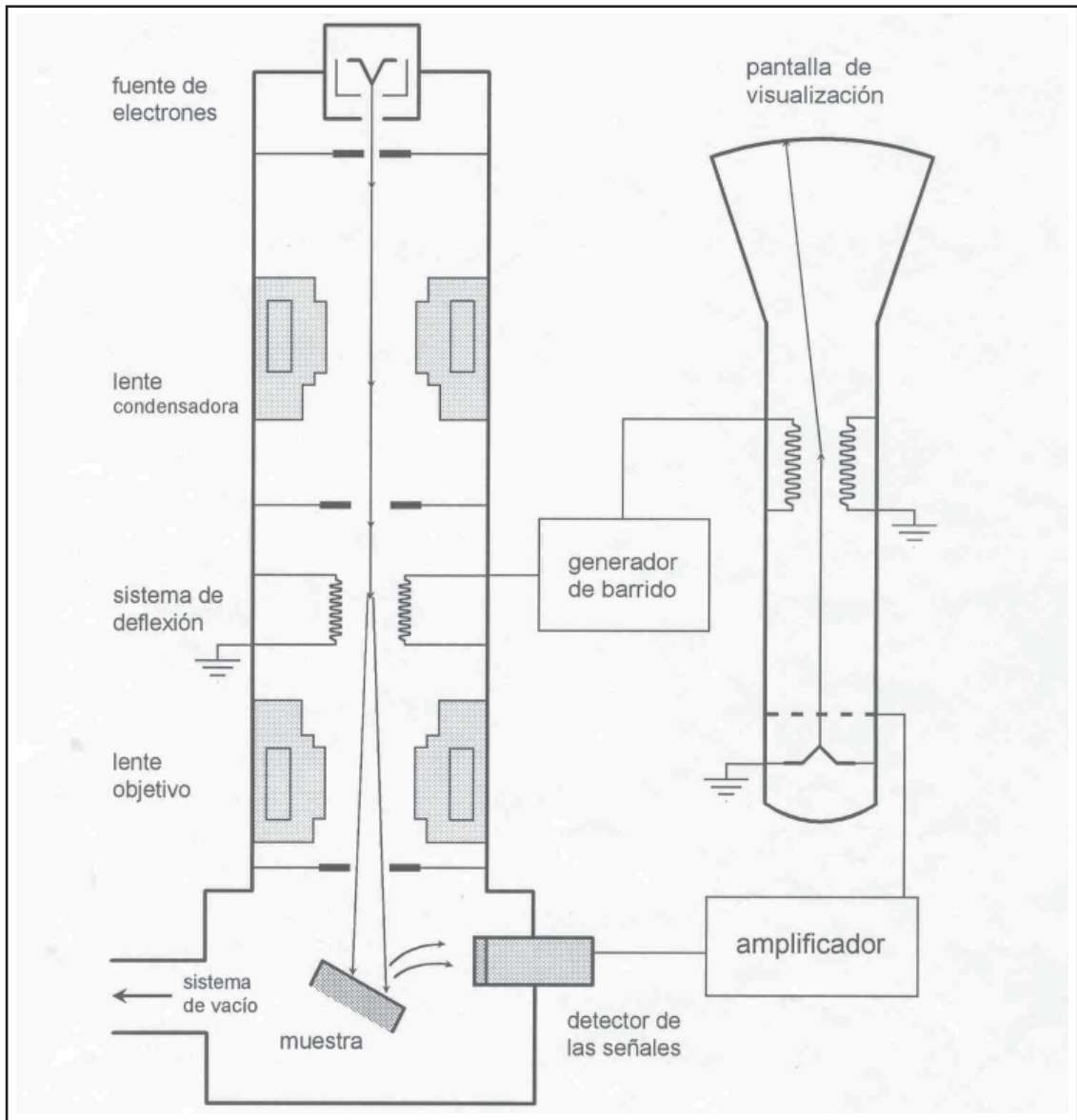


Figura 2

secundarios pero con distintas tonalidades, de las que se infieren los distintos elementos constitutivos de la muestra. Si se desea conocer la composición semicuantitativa de la muestra se puede recurrir a otra consecuencia del choque de electrones sobre una superficie, como es la generación de rayos X correspondiente a distintas longitudes de onda y características para cada especie química. El MEB está dotado de un detector (EDAX) que mide la energía de los rayos X característicos y la compara con un conjunto de datos conocidos, lo que permite que en forma rápida se pueda conocer la composición semicuantitativa de la muestra, aunque en algunos casos la determinación se complica por la superposición de las líneas

espectrales (Killick 1996).

Otra servicio interesante que puede suministrar el MEB con análisis espectral en energías es el llamado mapeo de elementos de la muestra. En pocas palabras, si se tiene una muestra con tres elementos A, B y C, podemos reconstruir la imagen tomada por electrones secundarios o retrodispersados con la energía de los rayos X característicos y, entonces, donde hay elementos A aparecerá, por programación, una mancha de un color, donde esté el B la imagen correspondiente y finalmente la zona C con su color elegido.

En los MEB tradicionales pueden tratarse objetos que quepan en su cámara de observación



Figura 3

o muestras representativas, previo vacío. En los llamados MEB ambientales la observación puede realizarse casi a presión atmosférica y aún sobre materiales porosos y biológicos sin necesidad de secar las muestras (Fig. 3).

ANÁLISIS QUÍMICOS

Los elementos químicos presentes en un objeto, que se distribuyen en forma compleja en el interior de la estructura, se determinan por vía húmeda mediante el análisis cualitativo clásico, mientras que para conocer los porcentajes en que aparecen se requiere de un análisis químico cuantitativo. En los análisis interesa conocer: a) el elemento base de la aleación, que es el que se encuentra en mayor proporción; b) los elementos aleantes, que modifican las características del elemento base en forma variable, según la proporción en que se encuentran; y c) los elementos minoritarios, cuya presencia no modifica sensiblemente las características del elemento base o del aleante. La presencia de estos últimos elementos es siempre accidental, pudiendo haber sido introducidos en

el metal a partir de la materia prima mineral o durante el proceso de elaboración del objeto.

De acuerdo a la cantidad de material a utilizar para los análisis, estos se pueden dividir en macroanálisis y microanálisis. Los macroanálisis utilizan una cantidad de material relativamente grande y proporcionan un promedio de todos los elementos presentes en la muestra, no importa cómo estén distribuidos microscópicamente. El microanálisis, por su parte, requiere una muy pequeña cantidad de muestra y es capaz de dar respuesta sobre la composición de áreas de dimensiones del orden del micrómetro cúbico (un cubo de 1 *mm* de arista). Ambos procedimientos son complementarios y los resultados obtenidos por uno u otro no son comparables.

Para realizar un análisis químico cualitativo por vía húmeda la muestra debe tratarse con ciertas mezclas disolventes, fundamentalmente ácidas y luego estudiarse las reacciones características de los elementos investigados. Estas reacciones, que indican que el elemento en consideración se encuentra presente, pueden consistir en el cambio de color de alguna sustancia, la formación

de algún precipitado o de ciertos humos. La identificación de los elementos químicos presentes requiere, por lo general, la realización de lo que se denomina marcha analítica o secuencia seriada de determinaciones. Si bien en algunos casos la intensidad de la coloración producida, la cantidad de precipitado formado o la rapidez de la reacción puede informar de la mayor o menor representación de un elemento, esto es aproximado y sólo se puede diferenciar entre componentes principales y elementos minoritarios.

El análisis químico cuantitativo implica llevar a cabo, en primer lugar, la separación de los elementos componentes en una secuencia ordenada y luego evaluar la cantidad de cada elemento por pesada de los productos obtenidos o por titulación. En este último procedimiento se le agrega a la solución cierta cantidad de un reactivo de características conocidas hasta lograr determinada reacción que se evidencia por un medio indicador adecuado. Midiendo el volumen de reactivo utilizado puede deducirse la cantidad del elemento presente.

Estos métodos tradicionales sólo pueden ser empleados en casos muy puntuales y fueron reemplazados por técnicas físicas menos destructivas. La **Difracción de rayos X (XRD)** es una técnica de análisis basada en el espectro de rayos X generado a partir del haz de un tubo de una particular energía, que se hace incidir sobre la muestra, que cuando es cristalina difracta (o refleja) según determinados ángulos. Conociendo los ángulos en los cuales se difractan los rayos X, es posible conocer los parámetros cristalinos de la muestra y de esta forma identificar la especie que se trata (Bowman 1991). Esta técnica permite reconocer y cuantificar la presencia de elementos químicos y, sobre todo, de compuestos cristalinos, así como determinar los porcentajes de las fases amorfas sólidas o líquidas. Las muestras pueden ser polvos o pequeños fragmentos, dependiendo del equipo. La identificación de las sustancias presentes se logra mediante comparación con muestras patrón y la determinación cuantitativa o semicuantitativa requiere la aplicación de complejos métodos matemáticos y programas de computación.

En la **Fluorescencia de rayos X (XRF)** se genera el espectro de rayos X produciendo la excitación

mediante una radiación incidente de índole electromagnética (tubos de rayos X y rayos gamma de materiales radiactivos). Esta energía de excitación adopta la forma de radiación X secundaria o fluorescencia y es la que, medida con un detector adecuado, permite determinar la composición en porcentajes para los principales elementos y en partes por millón (ppm) para los que están como trazas. Su versatilidad permite incluso la ejecución de análisis *in situ* sin necesidad de vacío. La sensibilidad varía según el tipo del equipamiento utilizado y las condiciones de análisis: en laboratorio con equipos de vacío llega a 1 ppm, mientras que en el campo, con equipos portátiles y al aire, alcanza 1000 ppm.

La Espectroscopía Mössbauer permite observar por métodos nucleares la composición y estructura cristalina de una muestra pequeña que contenga determinados elementos, por ejemplo hierro y estaño, y en contadas ocasiones otros elementos como oro. En el caso de muestras que contienen hierro se debe usar una fuente de cobalto radioactivo (^{57}Co), la cual decae en hierro excitado (^{57}Fe), que a su vez se des-excita emitiendo dos rayos de gamma de determinada energía. Si la muestra contiene átomos de ^{57}Fe , éstos, al recibir esa radiación, se excitarán y en un determinado tiempo se des-excitarán pero con una energía que depende de la situación geométrica y espacial en la que se encuentren esos átomos; por ejemplo si están dentro de un campo magnético o si sus átomos vecinos les producen un determinado campo eléctrico. Esa des-excitación puede ser medida e inferir a partir de ello la situación física del átomo de (^{57}Fe) emisor contenido en la muestra.

La **Espectrometría de absorción atómica (AAS)** permite determinar cuantitativamente la concentración de los elementos químicos presentes en la muestra midiendo la intensidad de las radiaciones absorbidas por la misma. Se trata de un método destructivo, ya que requiere la extracción de una cierta cantidad de muestra, que se vaporiza a temperaturas de hasta 4000 °C (Pollard y Heron 1996). Los átomos de la muestra quedan en estado fundamental y se excitan por un haz de luz de características particulares. Un espectrómetro mide la potencia de la luz transmitida a través de la muestra vaporizada

mediante adecuados reactivos químicos. Su principal ventaja es que permite detectar más de cincuenta elementos con una gran sensibilidad (hasta ppm), pero deben efectuarse muchas curvas experimentales y el proceso de análisis es largo y tedioso (Mortimer 1995).

Para la **Espectroscopía al plasma (ICP)**, se preparan soluciones con unos 50 mg de muestra y se las somete a la acción de un láser, generándose un plasma que, al ser analizado espacial y temporalmente, permite determinar las concentraciones de entre 10 y 30 elementos, de manera rápida. Resulta un método que requiere mucha experiencia por parte del operador y, por otro lado, en algunos casos el volumen de muestra procesado puede influir en la precisión de los resultados, que se estiman en 2 a 3 % para los elementos mayoritarios y 10 % para las trazas (Guerra et al. 1996).

Una técnica analítica conocida desde hace medio siglo es la **Activación neutrónica (NAA)**, que requiere de un reactor nuclear o de aceleradores de partículas. Un haz de electrones de alta energía bombardea a la muestra, cuya superficie no necesita estar preparada. Los elementos del material se tornan inestables y emiten una radiación característica que permite su identificación. Utilizando muestras de alrededor de 50 mg, es considerado un estudio sensitivo a nivel de ppm. Es posible identificar hasta 30 elementos pero para mejorar la precisión se aconseja no trabajar con más de 20 (Aspinall 1985).

También un acelerador de partículas es necesario para la **Espectroscopía de emisión X inducida por partículas (PIXE)**. La muestra (desde 1 mg hasta una pieza entera de regular tamaño) es irradiada con un haz directo de partículas (protones o partículas alfa), tanto en vacío como en aire. A partir del análisis de la radiación X característica emitida por la superficie y la medición de sus intensidades se puede conocer la concentración de numerosos elementos químicos presentes, con aceptable sensibilidad y rapidez (Swann et al. 1992). No detecta elementos livianos por debajo del sodio. En el caso de la **Espectroscopía de retrodispersión de Rutherford (RBS)**, si después de la irradiación se detectan las partículas dispersadas por la interacción entre el haz y los núcleos,

ambos electropositivos, puede determinarse la identidad de esos núcleos y la profundidad a la que se produjo la dispersión. Esta técnica permite obtener un perfil de concentraciones de los elementos presentes en la superficie de la pieza, especialmente de los ligeros, como oxígeno o carbono, por lo que es ideal para estudiar procesos superficiales.

ANÁLISIS METALGRÁFICO

Para estudiar las técnicas de fabricación de una pieza es necesario inspeccionar la estructura íntima del material, lo cual implica extraer una muestra representativa o preparar un sector de la superficie con la eliminación de todo tipo de sustancia extraña, productos resultantes del proceso corrosivo o material alterado por dicho proceso. Esta preparación se logra por pulido mecánico, electrolítico o químico, hasta alcanzar superficies planas y reflectoras.

El pulido mecánico consiste en la preparación de la superficie por medio de polvos o pastas abrasivas colocados sobre paños o papeles. Para el pulido electrolítico se sumerge la pieza en un reactivo líquido (electrolito) que permite un moderado paso de la corriente eléctrica suministrada por una fuente de corriente continua conectada entre la pieza (ánodo) y un electrodo (cátodo), también sumergido. El pasaje de corriente provoca una disolución selectiva de la muestra. Por su parte, en el pulido químico se introduce la muestra en un reactivo químico que la disuelve muy lentamente.

Si una muestra pulida mecánicamente es llevada a un microscopio óptico de reflexión o a un microscopio electrónico de barrido, la observación de la superficie permite identificar discontinuidades como grietas, poros e inclusiones y, si en la estructura existen fases de distinta reflectividad, es posible diferenciarlas. En cambio, si la muestra fue pulida electrolítica o químicamente, la información obtenible es mucho más amplia, dado que se pueden apreciar granos, límites de grano, fases, segregaciones, defectos, etc., que proporcionan importantes claves sobre la tecnología empleada en la elaboración del objeto.

Los estudios metalográficos se dividen en dos partes:

a) **Macrografía:** consiste en la observación de la superficie pulida del material a ojo desnudo o con pocos aumentos (entre 10 y 20x). Por lo general, luego de una preparación media de la superficie, se la ataca con un reactivo químico adecuado. De tal modo, se revelan rasgos como partes soldadas, forma y distribución de inclusiones no metálicas, segregaciones, espesores de capas o tratamientos superficiales, el “fibrado” o aspecto de la estructura general debida al proceso de fabricación y defectos varios. Permite, además, identificar las zonas críticas en donde instrumentar estudios micrográficos.

b) **Micrografía:** en este caso se accede a la estructura íntima del material. Así, es posible determinar el tamaño y uniformidad de los cristales, el grado de deformación plástica o de recristalización, la presencia, naturaleza, cantidad y distribución de las distintas fases, la existencia de inclusiones no metálicas y de precipitados en los bordes de grano, defectos y anomalías como fisuras o huecos, procesos de fabricación, tratamientos térmicos o mecánicos, procesos corrosivos, etc.

Para estos análisis se utiliza el microscopio óptico de reflexión, ya que las muestras son totalmente opacas. La observación puede realizarse con iluminación en campo claro u oscuro, luz polarizada, contraste de fase y con distintos tipos de filtros. Salvo casos especiales, como en muestras heterogéneas, la superficie de la muestra previamente pulida deberá atacarse con un reactivo químico de contraste o de acción selectiva para los diversos componentes. En la micrografía óptica se trabaja con aumentos entre 50x y 2000x y puede complementarse con análisis microestructurales con microscopía electrónica de barrido a mayores aumentos.

El índice de **Dureza** de un metal o aleación resulta un dato de importancia, ya que esta propiedad está vinculada directamente con las estructuras granular y cristalina del material, evidenciando los tratamientos termo-mecánicos sufridos y la composición química. Al mismo tiempo, a partir de su dureza se puede tener una idea aproximada de la resistencia mecánica de una aleación, ya que hay una relación directa entre ambas propiedades.

Se define a la dureza de un material metálico como la resistencia que ofrece a ser penetrado

por otro que se toma como patrón. En general, la dureza se determina calculando un número H mediante una fórmula que tiene en cuenta la carga aplicada a un penetrador, que suele ser una pirámide de diamante, y las dimensiones de la marca producida en el material examinado ($HV = 1.72 P / d_1^2$). Los ensayos Rockwell, Brinell y Knoop dejan en la superficie ensayada una incisión más o menos notable según la carga y la resistencia del material, por lo que podemos considerarlos hasta cierto punto como destructivos. El método de microdureza Vickers, sin embargo, deja una impronta de muy pequeño tamaño cuyas dimensiones se valoran mediante el retículo graduado de un microscopio adosado al sistema de carga-penetrador. La huella producida por el penetrador presenta una forma romboidal, cuyas diagonales se miden y promedian. Aplicando luego una fórmula o mediante tablas, se puede obtener el número convencional de dureza HV. Otra ventaja del ensayo de microdureza Vickers, además del escaso daño en las superficies, es que permite determinar durezas de las distintas fases presentes.

La **Radiografía** industrial posibilita obtener datos sobre el interior de la pieza bajo estudio sin que sufra deterioros, ya que no necesita acondicionamiento previo. El principio aplicado es el de la transparencia de los materiales a los rayos X (ondas electromagnéticas) y el uso de un transductor (película fotográfica) que permite el registro de la imagen obtenida por transparencia. La pieza se coloca entre el tubo emisor de rayos X y una placa fotográfica. El haz de radiación X proveniente de una fuente lo más puntual posible se hace incidir normalmente sobre la pieza en examen. La radiación es parcialmente absorbida, en función del espesor y densidad del material atravesado, emergiendo diferenciada en su intensidad. La imagen radiante del objeto es recogida por la película, que se encuentra protegida por una cubierta contra el efecto de la luz. En la película se produce una imagen latente que, luego del revelado, dará lugar a la radiografía del objeto.

El grado de ennegrecimiento de la película informa sobre las variaciones en la composición y las discontinuidades externas e internas del material (Fig. 4). Las partes más oscuras corresponden a las zonas en donde la intensidad

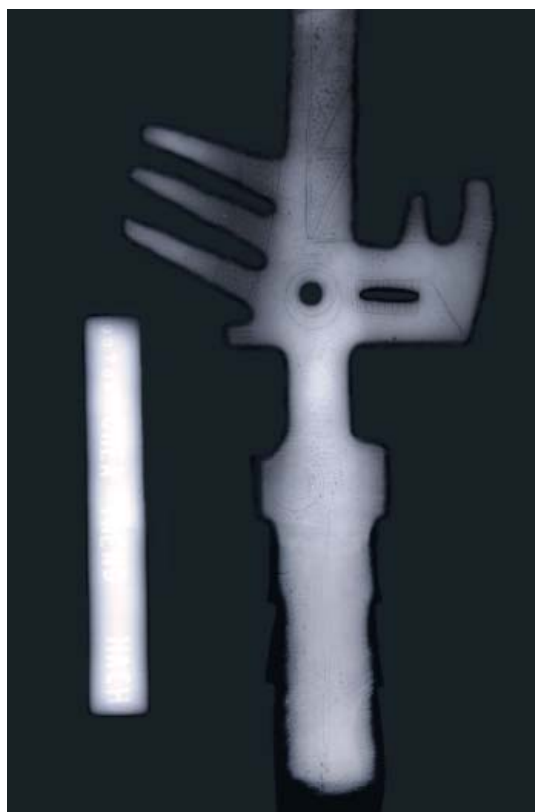


Figura 4

de radiación ha sido mayor, es decir, a las partes del objeto que tienen menor espesor o menor masa específica (densidad). Cuando los espesores de los objetos son considerables y los rayos X no consiguen atravesarlos, se emplean fuentes de radiación gamma, que exhiben un poder de penetración mayor.

EL DATO TÉCNICO

El arsenal de laboratorio potencialmente disponible para el estudio de objetos metálicos es amplio y variado y a través de una adecuada combinación de técnicas es posible conocer numerosos aspectos de la tecnología de los materiales. Sin embargo, en la historia de la arqueología argentina durante mucho tiempo hubo poco interés en explorar el potencial informativo encerrado en los metales, salvo contadas excepciones (por ejemplo, Ambrosetti 1904). Fue Alberto Rex González quien con mayor énfasis se ocupó de abrir caminos en el tema, propiciando la realización de estudios técnicos y aplicando los resultados a formulaciones



Figura 5

acerca de los procesos socioculturales prehispánicos (por ejemplo, A. González 1959, 1979, Fester y Retamar 1956, Fester 1962, Trucco 1965). Uno de los primeros estudios sobre un objeto de metal en el que se aplicó un protocolo de laboratorio fue el realizado sobre una de las más famosas piezas de la metalurgia del Noroeste, la placa dada a conocer por Samuel Lafone Quevedo a fines del siglo XIX y que quedó identificada con su nombre (Fig. 5).

Los análisis químicos de la pieza, asignada al contexto de la entidad sociocultural de La Aguada, revelaron que se trataba de una aleación de cobre con estaño, en una proporción en torno a 2-2.5 %, con variadas impurezas, entre ellas algo de arsénico. La observación metalográfica dio cuenta de una estructura de solidificación correspondiente a baja velocidad de enfriamiento, el uso de un molde de cera perdida y la instrumentación de operaciones de terminación, pulido y retoque (Biloni et al. 1990). Los resultados de este trabajo pionero serían confirmados por estudios posteriores realizados sobre placas similares (Cabanillas et al. 2002), los que pusieron de relieve la capacidad técnica de los

metalurgistas de la Aguada y el importante papel jugado por los bienes de metal en la dinámica social (A. González 1998).

En los últimos años se sumaron diferentes estudios sobre la tecnología de producción de bienes de metal en el Noroeste prehispánico, en los que se pusieron en práctica métodos de caracterización como los que fueron referidos páginas atrás. Como ejemplo, es posible mencionar el trabajo realizado sobre un ejemplar de hacha con mango incorporado (aunque fracturado), un tipo clásico de la metalurgia tardía del Noroeste (A. González 1979). Mientras la composición del material fue establecida por EDAX, para abordar su estructura se acudió a micrografía y radiografía, evaluándose sus propiedades mecánicas por medición de microdurezas (Fig. 6). Se determinó que la aleación era un bronce estañífero con presencia de arsénico. El tenor de este último elemento, disminuyendo desde la superficie hacia el interior, sugería que se trataba de una contaminación. La pieza habría sido obtenida por fusión en un molde bivalvo y mientras la hoja del hacha aparecía sin defectos internos, la zona del mango evidenciaba porosidad, lo cual pudo haber ocasionado su fractura. Los valores de dureza más elevados en la zona del filo de la hoja indicaron un tratamiento por martillado después de la colada, mientras que el resto de la superficie fue objeto de pulimento por medio de partículas abrasivas (Lascalea et al. 2002).

Otro ilustrativo caso de aplicación de diferentes técnicas de laboratorio para indagar la historia de elaboración de una pieza metálica involucró a un disco santamariano de 31 cm de diámetro y un peso de poco más de 2100 g. Como otras piezas similares, en una de las caras contaba con motivos decorativos en líneas en relieve, en la forma de 4 rostros humanos dispuestos radialmente cerca del perímetro, mientras que en la cara posterior se habían dispuesto dos anillas, probablemente destinadas al sostén de la pieza (Fig. 7). Los análisis químicos indicaron que se trataba de un bronce de bajo estaño (1.26 % en promedio) y los estudios metalográficos sugirieron que para la colada se había utilizado un molde bivalvo (González y Vargas 1999). Entre otros aspectos de interés, las micrografías realizadas en la zona de inserción de una de las anillas de la cara posterior mostraron dos zonas estructurales claramente diferenciadas,

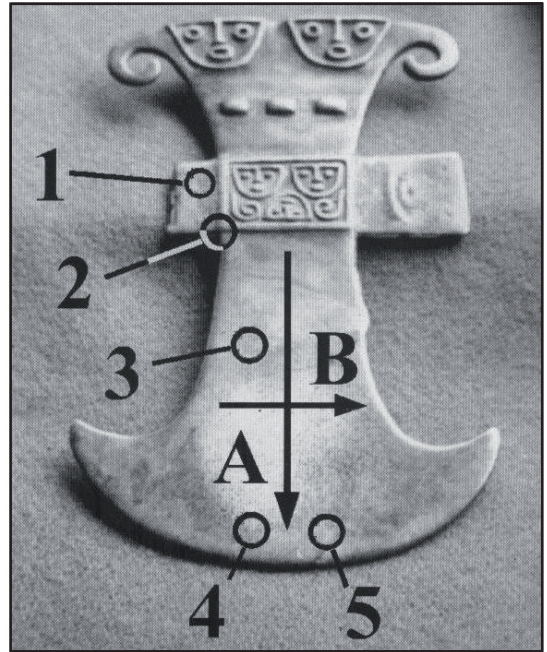


Figura 6



Figura 7

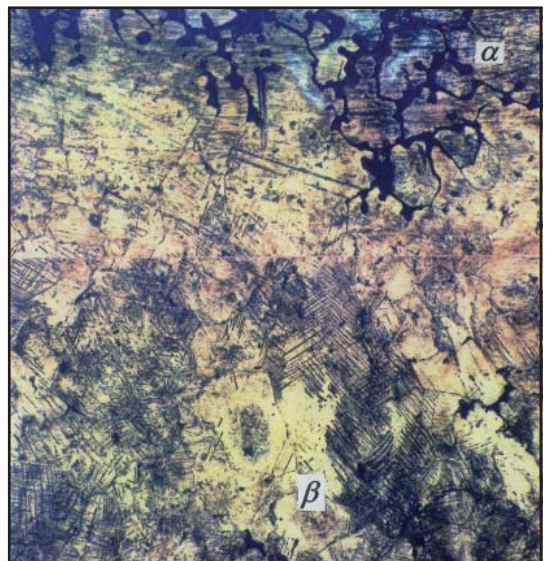


Figura 8

que indicaban trabajados mecánicos por parte de los antiguos metalurgistas, realizados posiblemente para asegurar la inserción de la anilla en el cuerpo de la pieza (Fig. 8). La sospecha que la zona de inserción había sido sometida a martillado fue confirmada por un ensayo de dureza Vickers, que mostró que, mientras en el sector más alejado de la anilla el valor se ubicaba en 110 Hv, en el más cercano trepaba a 151 Hv (González y Vargas 1999:15).

PALABRAS FINALES

En la elaboración de los bienes de metal del pasado andino participaron, junto a un acabado conocimiento del comportamiento de ciertas variables físicas y químicas por parte de los artesanos, aspectos simbólicos y valores sociales que determinaban los modos a los que debía ajustarse la transformación de los materiales. De tal forma, la información técnica y la expresiva

que puede recuperarse de los objetos metálicos no se encuentran en campos antagónicos, sino que, por el contrario, constituyen dos caras de una misma moneda y mantienen entre sí una relación dialéctica. Para obtener una pintura acabada de la significación de estos bienes, indagar sus aspectos técnicos adquiere relevancia en la articulación con interrogantes de índole antropológica. Las técnicas de laboratorio disponibles para caracterizar a los metales antiguos son variadas y con diferentes alcances y la elección de una o de un conjunto de ellas para el estudio de un caso particular exige una previa evaluación orientada por el problema de investigación y en la cual deben considerarse cuestiones tales como la cantidad de muestra a sacrificar o las facilidades de acceso al instrumental adecuado o alternativo. En todos los casos, la mejor planificación de los estudios surgirá del diálogo entre los arqueólogos y los especialistas en ciencias de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aspinall, A. 1985. Neutron activation analysis in the study of ceramics. En *The Archaeologist and the Laboratory*, Ed. P. Phillips. London: CBA Research Report 58, pp. 9-12.
- Berthelot, J. 1986. The extraction of precious metals at the time of the Inka. En *Anthropological History of Andean Politics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 69-88.
- Biloni, H., F. Kiss, T. Palacios y D. Vasallo. 1990. *Análisis metalográfico de la placa de Lafone Quevedo*. Serie Difusión, 7. La Plata: CIC.
- Bowman, S. (Ed.). 1991. *Science and the Past*. London: British Museum Press.
- Bray, W. 1991. La metalurgia en el Perú prehispánico. En *Los Incas y el Antiguo Perú*, Madrid: Sociedad Estatal Quinto Centenario, pp. 58-81.
- Britton, D. y E. Richards. 1965. Optical emission spectroscopy and the study of metallurgy in the European Bronze Age. En *Science and Archaeology*, Eds. D. Brothwell y E. Higgs. New York: Thames and Hudson, pp. 499-509.
- Budd, P. y T. Taylor. 1995. The faerie smith meets the bronze industry: magic versus science in the interpretation of prehistoric metal-making. *World Archaeology* 27, 1:133-143. London.
- Budd, P. R. Haggerty, A. Pollard, B. Scaife y R. Thomas. 1996. Rethinking the quest for provenance. *Antiquity* 70, 267:168-174.
- Burger, R. y R. Gordon, 1998. Early Central Andean metalworking from Mina Perdida, Perú. *Science* 282:1108-1111.
- Cabanillas, E., L. R. González y T. Palacios. 2002. Three new Aguada bronze plaques from Northwest Argentina. *Bulletin IAMS* 22:12-14. London.
- Carcedo, P. 1998. *Cobre del antiguo Perú*. Lima: Integra AFP-Southern Peru.

Entre granos y elementos. El estudio de los materiales antiguos.

Charles, J. A. 1967. Early arsenical bronzes. A metallurgical view. *American Journal of Archaeology* 71, 1:21-26.

Charles, J. 1992. Determinative mineralogy and the origins of metallurgy. En *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*. Eds. P. Craddock y M. Hughes. London: British Museum Occasional Papers 48, pp. 21-28.

Cleere, H. 1993. Archeometallurgy comes of age. *Antiquity* 67:175-178.

Cleuziou, S. y T. Berthoud. 1982. Early tin in the Near East. *Expedition*, 25,1:14-19.

Cherniykh, E. 1992. *Ancient metallurgy in the USSR*. Cambridge: Cambridge University Press.

Childe, V. G. 1930. *The Bronze Age*. Cambridge: Cambridge University Press.

Coghlan, H. H. 1975. *Notes on the prehistoric metallurgy of copper and bronze in the Old World*. Occasional Papers on Technology 4. Oxford: Pitt Rivers Museum. University of Oxford.

Dobres, M. y C. Hoffman. 1994. Social agency and the dynamics of prehistoric technology. *Journal of Archaeological Method and Theory* 1, 3:211-258.

Dobres, M. y C. Hoffman (Eds.). 1999. *The social dynamics of technology. Practice, politics and world views*. Washington: Smithsonian Institution Press.

Earl, B. 1994. Tin from the Bronze Age smelting viewpoint. *Historical Metallurgy* 28, 2:117-120. London.

Ehrenreich, R. 1991. Introduction. En *Metals in Society: Theory Beyond Analysis*, MASCA Research Papers in Science and Archaeology. Vol. 8, Part II. Philadelphia: University of Pennsylvania. pp. 5-6.

Ehrenreich, R. 1995. Archaeometry into Archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory* 2, 1:1-6.

Ehrenreich, R. 1996. Archaeometallurgy and the analysis of early sociotechnical systems. *Journal of Metals* July, pp. 62-63.

Epstein, S. 1996. Le cuivre, le feu et le soufflé humain. *Techniques et Culture* 27:125-136.

Fester, G. 1962. Copper and copper alloys in ancient Argentina. *Chymia*, 8:21-31. Philadelphia.

Fester, G. y J.A. Retamar. 1956. Examen de piezas metálicas procedentes de Catamarca. *Revista de Ingeniería Química*, XXV, 39:161-171. Santa Fe.

Frangopol, P. T. y V. V. Morariu (Eds.). 1988. *First Romanian conference on the application of physics methods in archaeology*. Bucharest: Central Institute of Physics.

Furlan, G.; P. Cassola Guida y C. Tuniz (Eds.). 1986. *New Paths in the Use of Nuclear Techniques for Art and Archeology*. Singapore: World Scientific Publishing.

Glumac, P. y J. Todd. 1991. Early metallurgy in the Southeast Europe: the evidence for production. En *Recent Trends in Archaeometallurgical Research*, MASCA Research Papers in Science and Archaeology, 8, I. Philadelphia: University of Pennsylvania, pp. 9-19.

Gluzman, G. y L. R. González. 2007. El contacto hispano-indígena a través de la metalurgia del antiguo Noroeste argentino. En *Actas VII Congreso Ibérico de Arqueometría*. Madrid (en prensa).

González, A. R. 1959. A note on the antiquity of bronze in N.W. Argentina. En *Actas 33º Congreso Internacional de Americanistas II*, San José, pp. 384-397.

González, A. R. 1979. La metalurgia precolombina del NOA. Secuencia histórica y proceso cultural. En *Actas Jornadas del Noroeste*. Buenos Aires: Universidad del Salvador, pp. 88-136.

- González, A. R. 1998. *Cultura La Aguada. Arqueología y Diseños*. Buenos Aires: Filmediciones Valero.
- González, L. R. 2004. *Bronces sin nombre. La metalurgia prehispánica del Noroeste argentino*. Buenos Aires: Fundación CEPPA.
- González, L. R. y A. Vargas. 1999. Tecnología metalúrgica y organización social en el Noroeste argentino prehispánico. Estudio de un disco. *Chungará* 31, 1:5-27. Arica.
- González, L. R., G. Gluzman, H. Buono, J. M. Estévez y E. Cabanillas. 2007. Arqueometalurgia experimental aplicada al taller de Rincón Chico 15, valle de Yocavil. En *Actas XVI Congreso Nacional de Arqueología Argentina*, Tomo I. Jujuy, pp. 587-592.
- Graves-Brown, P. M. 1995. Fearful simmetry. *World Archaeology* 27, 1:88-99. London.
- Guerra, M., J. Barrandon, B. Collin, E. Le Roy Ladurie y C. Morrison. 1991. The difussion of the silver from Potosi in the 16 th century Spanish coinage: a new analytical method. En *Archaeological Sciences 1989*, Eds. P. Budd, B. Chapman, C. Jackson, R. Janaway y B. Ottaway. Oxford: Oxbow Books, pp. 28-35.
- Hosler, D. 1994. *The sounds and colors of power. The sacred metallurgical technology of Ancient West Mexico*. Cambridge: MIT Press.
- Killick, D. 1996. Optical and electron microscopy in material culture studies. En *Learning from Things*, Ed. W. Kingery. Washington: Smithsonian Institution Press, pp. 204-230.
- Killick, D., 2004. Social constructionist approaches to the study of technology. *World Archaeology* 36 (4):571-578.
- Lascalea, G., A. Pifferetti, M. Fernández de Rapp, N. Walsoe de Reca y J. Northover. 2002. The material characterization of a Santamariana ceremonial axe. *Archaeometry* 44, 1:83-94.
- Lechtman, H. 1975. Style in technology. Some early thoughts. En *Material culture. Styles, organization and dynamics of technology*, H. Lechtman y R. Merrill Eds. New York: West Publishing, pp. 3-20.
- Lechtman, H. 1976. A metallurgical site survey in the Peruvian Andes. *Journal of Field Archaeology* 3:1-42.
- Lechtman, H. 1980. The Central Andes: metallurgy without iron. En *The Coming of the Age of Iron*. New Haven: Yale University Press, pp. 267-334.
- Lechtman, H. 1984. Andean value systems and the development of prehistoric metallurgy. *Technology and Culture* 25:1-36.
- Lechtman, H. 1988. Reflexiones sobre la metalurgia en América. En *Arqueología de las Américas*. Bogotá: Banco de la República, pp. 301-306.
- Lechtman, H. 1991a. La metalurgia precolombina: tecnología y valores. En *Los Orfebres Olvidados de América*, Santiago: Museo Chileno de Arte Precolombino, pp. 9-18.
- Lechtman, H. 1991b. The production of copper-arsenic alloys in the Central Andes: highland ores and coastal smelters? *Journal of Field Archaeology* 18, 1:43-76.
- Lechtman, H. 1996. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas. *Journal of Field Archaeology* 23, 4:477-514.
- Lechtman, H. 1999. Afterword. En *The Social Dynamics of Technology. Practice, Politics and World of Views*, Eds. M. Dobres y C. Hoffman, Washington: Smithsonian Institution Press, pp. 223-232.

Entre granos y elementos. El estudio de los materiales antiguos.

Lechtman, H. 2003. Tiwanaku Period (Middle Horizon) bronze metallurgy in the Lake Titicaca basin: a preliminary assessment. En *Tiwanaku and Its Hinterland*, 2, Ed. A. Kolata. Washington: Smithsonian Institution Press, pp. 404-497.

Lechtman, H. y A. Steinberg. 1979. The history of technology: an anthropological point of view. En *The History and Philosophy of Technology*, Illinois: University of Illinois Press. pp. 135-160.

Lechtman, H. y W. MacFarlane. 2005. La metalurgia del bronce en los Andes Sur Centrales: Tiwanaku y San Pedro de Atacama. *Estudios Atacameños* 30:7-27. San Pedro de Atacama.

Lemmonnier, P. 1992. Elements for an Anthropology of Technology. *Anthropological Papers Museum of Anthropology* 88. Ann Arbor: University of Michigan.

Lovecraft, H. P. 1969. La sombra sobre Innsmouth. En *Los mitos de Cthulu*. Madrid: Alianza Editorial, pp. 189-286.

Mohen, J. P. 1990. *Metallurgie Préhistorique. Introduction a la Paleometallurgie*. Paris: Masson.

Montero Ruiz, I. 1992. La actividad metalúrgica en la Edad del Bronce del sudoeste de la península ibérica. *Tecnología e interpretación cultural. Trabajos de Prehistoria*, 49:189-215. Madrid.

Mortimer, C. 1995. Chemical analysis of metalwork and metalworking debris. *Archaeology Datasheet* 12. London: Historical Metallurgy Society.

Muhly, J. 1988. The beginnings of metallurgy in the Old World. En *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Ed. R. Maddin. Cambridge: MIT Press, pp. 2-20.

Ottaway, B., 2001. Innovation, production and specialization in early prehistoric copper metallurgy. *European Journal of Archaeology* 4, 1:87-112.

Pernicka, E. 1986. Provenance determination of metal artifacts: methodological considerations. *Nuclear Instruments and Methods in Physic Research B* 14:24-29. Amsterdam.

Pffafenberger, D. 1988. Fetishised objects and humanized nature: towards an anthropology of technology. *Man* 23, 2:236-252.

Pillai, S., A. Damodaran y T. Ramachandran. 1994. The termomechanical processing of high-tin bronzes. An old practice in a South Indian village. *Journal of Metals* 46, 3:59-62.

Pollard, A. M. y C. Heron. 1996. *Archaeological Chemistry*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.

Ramírez, S. 1994. Ethnohistorical dimensions of mining and metallurgy in sixteenth-century Northern Peru. En *In Quest of Mineral Wealth. Aboriginal and Colonial Mining and Metallurgy in Spanish America*, Eds. A. Craig y R. West. Baton Rouge: Louisiana State University, pp. 93-108.

Rapp, G. 1988. On the origins of copper and bronzes alloying. En *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Ed. R. Maddin. Cambridge: MIT Press, pp. 21-27.

Renfrew, C. 1991. Varna y el surgimiento de la riqueza en la Europa prehistórica. En *La Vida Social de las Cosas. Perspectiva Cultural de las Mercancías*, Ed. A. Appadurai. México DF: Grijalbo, pp. 179-210.

Rovira Llorens, S. 1991. Metales y aleaciones del antiguo Perú. En *Los Incas y el Antiguo Perú*. Madrid: Sociedad Estatal Quinto Centenario, pp. 82-97.

Rovira Llorens, S. 2004. Tecnología metalúrgica y cambio cultural en la prehistoria de la península ibérica. *Norba. Revista de Historia* 17:9-40.

- Rutledge, J. y R. Gordon. 1987. The work of metallurgical artificers at Machu Picchu. *American Antiquity* 52, 3:578-594.
- Saunders, N. 2003. Catching the light: technologies of power and enchantment in Precolumbian goldworking. En *Gold and Power in Ancient Costa Rica, Panama and Colombia*, Ed. J. Guilter y J. Hoopes. Washington: Dumbarton Oaks, pp. 15-47.
- Shimada, I. 1994. Pre-hispanic metallurgy and mining in the Andes: recent advances and future tasks. En *In Quest of Mineral Wealth: Aboriginal and Colonial Mining in Spanish America*, Ed. A. Craig y R. West. Baton Rouge: Louisiana State University, pp.37-73.
- Shimada, I. 1998. Hacia una verdadera apreciación del cobre en el antiguo Perú. En P. Carcedo, *Cobre del antiguo Perú*. Lima: Integra AFP-Southern Peru., pp. 41-63.
- Slater, E. y J. Charles. 1970. Archaeological classification by metal analysis. *Antiquity* 44:207-213.
- Swann, C., S. Fleming y M. Jaksic. 1992. Recent applications of PIXE spectrometry in archaeology I. Characterization of bronzes with special consideration of the influence of corrosion processes on data reliability. *Nuclear Instruments and Methods in Physic Research B*64:499-504.
- Thompson, F. C. 1958. The early metallurgy of copper and bronze. *Man* 58:1-7.
- Tite, M. 1996. Dating, provenance, and usage in material culture studies. En *Learning from Things*, Ed. W. Kingery. Washington: Smithsonian Institution Press, pp. 231-260.
- Trucco, B. 1965 (ms). Contribución al conocimiento de la metalurgia indígena del Noroeste argentino. Tesis para el Doctorado en Ciencias Naturales. Universidad Nacional de La Plata.
- Tylecote, R. 1979. *A history of metallurgy*. London: Metals Society.
- Tylecote, R. 1980. Furnaces, crucibles and slags. En *The coming of the Age of Iron*. New Haven: Yale University Press, pp. 183-228.
- Tylecote, R. 1987. *The early history of metallurgy in Europe*. London: Longman.
- Tylecote, R. 1991. Early copper based alloys: natural or man made? En *Decouverte du Metal*, Coord. J. Mohen y C. Eluere. Paris: Picard, pp. 213-221.
- Weeks, L. 1999. Lead isotope analyses from Tell Abraç, United Arab Emirates: new data regarding the 'tin problem' in Western Asia. *Antiquity* 73:49-64.
- Wertime, T. 1964. Man's first encounters with metallurgy. *Science* 3649:1257-1267.
- Wertime, T. 1973. The beginnings of metallurgy: a new look. *Science* 4115:875-887.
- White, J. 1988. Early East Asian metallurgy: the Southern tradition. En *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*, Ed. R. Maddin. Cambridge: MIT Press, pp. 175-181.
- Winner, L. 1986. *The whale and the reactor: a search for limits in an age of high technology*. Chicago: The University of Chicago Press.