

# 82

Director del capítulo  
*Michael McCann*

### Sumario

---

OPERACIONES DE FUNDICION Y AFINO

Fundición y afino  
*Pekka Roto* . . . . . 82.2

Fundición y afino del cobre, plomo y zinc . . . . . 82.4

Fundición y afino del aluminio  
*Bertram D. Dinman* . . . . . 82.8

Fundición y afino del oro  
*L.D. Gadaskina y L.A. Ryzik* . . . . . 82.11

---

METALURGIA Y METALISTERIA

Fundiciones  
*Franklin E. Mirer* . . . . . 82.13

Forja y estampación  
*Robert M. Park* . . . . . 82.22

Soldadura y corte térmico  
*Philip A. Platcow y G.S. Lyndon* . . . . . 82.25

Tornos  
*Toni Retsch* . . . . . 82.31

Rectificado y pulido  
*K. Welinder* . . . . . 82.35

Lubricantes industriales, fluidos de mecanizado y aceites para automóviles  
*Richard S. Kraus* . . . . . 82.37

Metales, tratamiento de superficie  
*J.G. Jones, J.R. Bevan, J.A. Catton, A. Zober, N. Fish, K.M. Morse, G. Thomas, M.A. El Kadeem y Philip A. Platcow* . . . . . 82.42

Recuperación de metales  
*Melvin E. Cassidy y Richard D. Ringenwald, Jr.* . . . . . 82.48

Cuestiones ambientales en el acabado de superficies metálicas y los recubrimientos industriales  
*Stewart Forbes* . . . . . 82.61

**Perfil general**

La industria de la fundición y afino de metales procesa minerales y chatarra metálicos para obtener metales puros. Las industrias metalúrgicas procesan metales para fabricar componentes de máquinas, maquinaria, instrumentos y herramientas que son necesarios en otras industrias, así como en los restantes sectores de la economía. Como materia prima se utilizan diversos tipos de metales y aleaciones, como productos laminados (barras, flejes, productos de poca sección, chapas o tubos) y estirados (barras, productos de poca sección, tubos o alambre). Entre las técnicas básicas de procesamiento del metal se encuentran las siguientes:

- fundición y afino de menas y chatarra
- moldeado de metales fundidos para darles una forma determinada (fundición)

- forja o estampación de metales para darles la forma de una estampa (forja en caliente o en frío)
- soldadura y corte de chapa metálica
- sinterización (compresión y calentamiento de materiales en polvo, incluyendo uno o más metales)
- torneado de metales.

Para el acabado de metales se utiliza una gran variedad de técnicas, como esmerilado y pulido, limpieza con chorro abrasivo y numerosas técnicas de acabado y recubrimiento de superficies (recubrimiento electrolítico, galvanizado, tratamiento térmico, anodizado, pintura en polvo, etc).

**OPERACIONES DE FUNDICION Y AFINO****● FUNDICION Y AFINO***Pekka Roto\**

En la producción y afino de metales, una serie de reacciones físico-químicas distintas separan los componentes valiosos de las materias inservibles. El producto final es un metal que contiene cantidades controladas de impurezas. La fundición y afino primarios producen metales directamente a partir de concentrados de mineral, mientras que la fundición y afino secundarios los producen a partir de chatarra y residuos de procesos. La chatarra está formada por fragmentos y piezas de componentes metálicos, barras, virutas de torno, chapas y alambre que están fuera de especificación o desgastados pero pueden reciclarse (véase el artículo “Recuperación de metales” en este capítulo).

**Resumen de procesos**

Para producir metales refinados se utilizan generalmente dos tecnologías de recuperación, los procesos *pirometalúrgicos* y los *hidrometalúrgicos*. En los primeros se utiliza calor para separar los metales deseados de otros materiales. En estos procesos se aprovechan las diferencias entre potenciales de oxidación, puntos de fusión, presiones de vapor, densidad y/o miscibilidad de los componentes del mineral cuando se funden. Las tecnologías hidrometalúrgicas se diferencian de los procesos pirometalúrgicos en que los metales deseados se separan de otros materiales utilizando técnicas que aprovechan las diferencias de solubilidad y/o entre las propiedades electroquímicas de los constituyentes mientras se encuentran en solución acuosa.

**Pirometalurgia**

Durante el procesamiento pirometalúrgico, un mineral, después de ser *beneficiado* (concentrado mediante machaqueo, trituración, flotación y secado), se sinteriza o tuesta (calcina) con otros materiales, tales como polvo de la cámara de sacos filtrantes y fundente. A continuación, el concentrado se funde en un horno de cuba para obtener un lingote fundido impuro que contiene los metales deseados. Este lingote se somete seguidamente a un tercer proceso pirometalúrgico para refinar el metal hasta conseguir el nivel de pureza deseado. Cada vez que se calienta el mineral o el lingote, se crean materiales residuales. El polvo procedente de la ventilación y los gases del proceso puede capturarse en una

cámara de sacos y eliminarse o devolverse al proceso, dependiendo del contenido metálico residual. También se captura el azufre del gas, y cuando las concentraciones son superiores al 4 % puede convertirse en ácido sulfúrico. Dependiendo del origen del mineral y de su contenido residual de metales, pueden obtenerse también como subproductos diversos metales, como oro y plata.

La tostación es un importante proceso pirometalúrgico. La tostación por sulfatado se utiliza en la producción de cobalto y zinc. Su fin es separar los metales de forma que puedan transformarse en una forma hidrosoluble para el ulterior procesamiento hidrometalúrgico.

La fusión de los minerales sulfurados produce un concentrado de metal parcialmente oxidado (mata). En la fusión, el material inservible, generalmente hierro, forma una escoria con el material fundente y se convierte en su óxido. Los metales útiles adquieren la forma metálica en la etapa de conversión, que tiene lugar en los hornos de conversión. Este método se utiliza en la producción de cobre y níquel. Se produce hierro, ferrocromo, plomo, magnesio y compuestos de hierro por reducción del mineral con carbón vegetal y un fundente (caliza); el proceso de fusión se realiza generalmente en un horno eléctrico (véase también el capítulo *Siderurgia*). La electrólisis de sales fundidas, empleada en la producción de aluminio, constituye otro ejemplo de proceso pirometalúrgico.

La alta temperatura necesaria para el tratamiento pirometalúrgico de los metales se consigue quemando combustibles fósiles o utilizando la reacción exotérmica del propio mineral (como, por ejemplo, en el proceso de fundición a la llama). El proceso de fundición a la llama constituye un ejemplo de proceso pirometalúrgico ahorrador de energía en el que el hierro y el azufre del concentrado de mineral se oxidan. La reacción exotérmica, acoplada a un sistema de recuperación de calor, ahorra una gran cantidad de energía para la fusión. La elevada recuperación de azufre del proceso es también beneficiosa para la protección del medio ambiente. La mayoría de las fundiciones de cobre y níquel construidas recientemente utilizan dicho proceso.

**Hidrometalurgia**

Ejemplos de procesos hidrometalúrgicos son la lixiviación, la precipitación, la reducción electrolítica, el intercambio iónico, la separación por membranas y la extracción con disolventes. La primera etapa de los procesos hidrometalúrgicos es la lixiviación de los metales útiles a partir de materiales menos valiosos,

\* Adaptado de la 3ª edición, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

por ejemplo, con ácido sulfúrico. La lixiviación a menudo va precedida de un tratamiento previo (p. ej., tostación por sulfatado). El proceso de lixiviación normalmente exige altas presiones, la adición de oxígeno o temperaturas elevadas. También puede realizarse con electricidad. A partir de la solución lixiviada, el metal deseado o su compuesto se recuperan por precipitación o reducción, según distintos métodos. En la producción de cobalto o níquel, por ejemplo, la reducción se realiza con gas.

La electrólisis de metales en soluciones acuosas también se considera un proceso hidrometalúrgico. En el proceso de electrólisis, el ion metálico resulta reducido. El metal se encuentra en una solución ácida débil a partir de la cual precipita en los cátodos por efecto de una corriente eléctrica. La mayoría de los metales no férricos también pueden refinarse por electrólisis.

Comúnmente, los procesos metalúrgicos son una combinación de procesos piro e hidrometalúrgicos, según el concentrado de mineral a tratar y el tipo de metal a refinar. Un ejemplo es la producción de níquel.

### Riesgos y su prevención

La prevención de los riesgos para la salud y los accidentes en la industria metalúrgica es fundamentalmente una cuestión educativa y técnica. Los reconocimientos médicos están en segundo plano y solo desempeñan un papel complementario en la prevención de los riesgos. Con miras a prevenir los riesgos para la salud es sumamente útil mantener un intercambio de información y colaboración armonioso entre los departamentos de planificación, línea, seguridad y medicina del trabajo.

Las medidas preventivas mejores y más baratas son las que se adoptan en la etapa de planificación de una nueva planta o proceso. Al planificar las nuevas instalaciones de producción, hay que tener en cuenta al menos los siguientes aspectos:

- Se han de confinar y aislar las fuentes potenciales de contaminantes aéreos.
- El diseño y ubicación del equipo de proceso debe permitir un fácil acceso para las operaciones de mantenimiento.
- Las áreas en que pueden aparecer riesgos súbitos e inesperados deben supervisarse continuamente. Han de existir señales e indicaciones de advertencia apropiadas. Por ejemplo, las zonas en que pudiera darse exposición a arsenamina o ácido cianhídrico, deben ser objeto de continua vigilancia.
- La adición y manipulación de los productos químicos tóxicos utilizados en el proceso debe planificarse de manera que se evite la manipulación manual.
- El control de higiene industrial debe incluir dispositivos de muestreo personal con el fin de evaluar la exposición real de cada trabajador siempre que ello sea posible. El control fijo y regular de gases, polvos y ruidos ofrece una visión general de la exposición, pero su papel en la valoración de la dosis de exposición es solo complementario.
- En la planificación del espacio, hay que tener en cuenta las necesidades de futuros cambios o ampliaciones del proceso, de manera que no se deterioren los niveles de higiene industrial de la planta.
- Debe existir un sistema continuo de formación y educación del personal de higiene y seguridad, así como de los capataces y trabajadores. En especial, los trabajadores nuevos deben ser rigurosamente informados de los posibles riesgos para la salud y de cómo prevenirlos en sus respectivos ambientes de trabajo. Además, cada vez que se introduzca un nuevo proceso deberá impartirse la correspondiente formación.
- Las prácticas de trabajo son importantes. Por ejemplo, la mala higiene personal en la comida y fumar en el lugar de trabajo pueden aumentar considerablemente la exposición personal.

- La dirección de la empresa debe poseer un sistema de control de la salud y seguridad que facilite los datos adecuados para la toma de decisiones técnicas y económicas.

A continuación se indican algunos de los riesgos y precauciones específicos de los procesos de fundición y afino.

### Lesiones

La industria de fundición y afino presenta un índice de lesiones más elevado que el de la mayoría de los otros sectores. Entre las causas de estas lesiones se encuentran las siguientes: salpicaduras y derrames de metal fundido y escoria que provocan quemaduras; explosiones de gas y por contacto de metal fundido con agua; colisiones con locomotoras y vagones en movimiento, grúas móviles y otros equipos móviles; caída de objetos pesados; caídas desde lugares altos (por ejemplo, al acceder a la cabina de una grúa), y lesiones por resbalar y tropezar con obstáculos en el suelo y en las pasarelas.

Las precauciones consisten en una formación adecuada, equipo de protección personal (EPP) apropiado (p. ej., cascos, calzado de seguridad, guantes de trabajo y ropas protectoras); almacenamiento correcto, conservación y mantenimiento del equipo; normas de tráfico para el equipo móvil (incluida la definición de rutas y un sistema eficaz de aviso y señalización), y un programa de protección contra caídas.

### Calor

Las enfermedades por estrés térmico, tales como el golpe de calor, constituyen un riesgo común debido principalmente a la radiación infrarroja procedente de los hornos y el metal en fusión. Esto representa un problema especialmente importante cuando hay que realizar trabajos que exigen gran esfuerzo en ambientes muy calientes.

La prevención de las enfermedades producidas por el calor puede consistir en pantallas de agua o cortinas de aire delante de los hornos, refrigeración puntual, cabinas cerradas y provistas de aire acondicionado, ropas protectoras contra el calor y trajes refrigerados por aire, que proporcionen tiempo suficiente para la aclimatación, pausas de descanso en zonas refrigeradas y un suministro adecuado de bebidas para beber con frecuencia.

### Riesgos químicos

Durante las operaciones de fusión y afino puede producirse exposición a una gran variedad de polvos, humos, gases y otras sustancias químicas peligrosas. En especial, el machaqueo y la trituración de mineral puede provocar altos niveles de exposición a sílice y a polvos metálicos tóxicos (p. ej. que contengan plomo, arsénico y cadmio). También pueden darse exposiciones al polvo durante las operaciones de mantenimiento de los hornos. Durante las operaciones de fusión, los humos metálicos pueden constituir un problema importante.

Las emisiones de polvo y humos pueden controlarse mediante confinamiento, automatización de los procesos, ventilación local y de dilución, mojado de los materiales, reducción de su manipulación y otros cambios en el proceso. Si esto no resultase adecuado, habría que recurrir a la protección respiratoria.

Muchas operaciones de fundición implican la producción de grandes cantidades de dióxido de azufre procedentes de los minerales sulfurados y de monóxido de carbono de los procesos de combustión. Son esenciales la ventilación de dilución y la ventilación por extracción local (VEL).

Como subproducto de las operaciones de fundición se forma ácido sulfúrico, el cual se utiliza en el afino electrolítico y en la lixiviación de los metales. Puede producirse exposición a ácido sulfúrico tanto líquido como en forma de neblinas. Se requiere protección cutánea y ocular, y VEL.

La fusión y afino de algunos metales puede plantear riesgos especiales. Entre otros ejemplos están el níquel carbonilo en el afino de este metal, fluoruros en la fusión de aluminio, arsénico en la fundición y afino de cobre y plomo, y exposiciones a mercurio y cianuro durante el afino de oro. Estos procesos requieren sus propias precauciones especiales.

#### **Otros riesgos**

El deslumbramiento y la radiación infrarroja producidos por los hornos y el metal en fusión, pueden provocar lesiones oculares, incluso cataratas. Deben usarse gafas de montura ajustada y pantallas faciales. Los niveles altos de radiación infrarroja también pueden ocasionar quemaduras en la piel a menos que se utilicen ropas protectoras.

Los altos niveles de ruido producidos por el machaqueo y la trituración del mineral, los ventiladores de descarga de gas y los hornos eléctricos de alta potencia pueden provocar pérdida auditiva. Si no es posible confinar o aislar la fuente de ruido, deberán usarse protectores de oídos. Se deberá implantar un programa de conservación auditiva que incluya pruebas audiométricas y formación al respecto.

Durante los procesos electrolíticos pueden presentarse riesgos eléctricos. Entre las precauciones a adoptar están los procedimientos adecuados de mantenimiento eléctrico, con bloqueo y etiquetado de advertencia; guantes, ropa y herramientas aislados, e interruptores accionados por corrientes de fugas a tierra donde se requieran.

La elevación y manipulación manual de materiales puede ocasionar lesiones de espalda y de las extremidades superiores. Los medios de elevación mecánicos y una formación adecuada acerca de los métodos de elevación pueden reducir este problema.

#### **Contaminación y protección del medio ambiente**

Las emisiones de gases irritantes y corrosivos como el dióxido de azufre, ácido sulfhídrico y cloruro de hidrógeno, pueden contribuir a la contaminación aérea y originar fenómenos de corrosión de los metales y el hormigón, tanto en la planta como en el ambiente circundante. La tolerancia de la vegetación al dióxido de azufre depende del tipo de bosque y suelo. En general, los árboles perennes toleran menores concentraciones de dióxido de azufre que los caducos. Las emisiones de materia particulada pueden contener particulados inespecíficos, fluoruros, plomo, arsénico, cadmio y muchos otros metales tóxicos. El efluente puede contener diversos metales tóxicos, ácido sulfúrico y otras impurezas. Los residuos sólidos pueden estar contaminados con arsénico, plomo, sulfuros de hierro, sílice y otros contaminantes.

La gestión de la fundición debe comprender la evaluación y control de las emisiones procedentes de la planta, tarea especializada que solo debe realizar personal muy familiarizado con las propiedades químicas y toxicidades de los materiales emitidos en los procesos. El estado físico del material, la temperatura a la que abandona el proceso, la presencia de otros materiales en el chorro de gas, etc., son todos factores que han de tenerse en cuenta al planificar las medidas de control de la contaminación aérea. También es deseable contar con una estación meteorológica, que lleve los archivos meteorológicos, y estar preparados para reducir la salida de emisiones cuando las condiciones climáticas no favorezcan la dispersión de los efluentes aéreos. Son necesarias investigaciones de campo para observar los efectos de la contaminación aérea sobre las áreas residenciales y agrícolas.

El dióxido de azufre, uno de los principales contaminantes, se recupera en forma de ácido sulfúrico cuando su cantidad es suficiente. En otro caso, para cumplir las normas sobre emisiones, el dióxido de azufre y otros residuos gaseosos peligrosos se

controlan mediante lavado. Comúnmente, las emisiones de partículas se controlan por medio de filtros textiles y cubas de precipitación electrostáticas.

En los procesos de flotación, tales como la concentración de cobre, se utilizan grandes cantidades de agua. La mayor parte de este agua se recicla y se devuelve al proceso. Los residuos, o colas, del proceso de flotación se bombean en forma de lodos a estanques de sedimentación. El agua se recicla al proceso. El agua de proceso que contiene metal y el agua de lluvia se limpian en plantas de tratamiento antes de su vertido o reciclaje.

Los residuos sólidos comprenden escorias de fundición, lodos de descarga producidos en la conversión de dióxido de azufre en ácido sulfúrico y lodos procedentes de balsas (p. ej., estanques de sedimentación). Algunas escorias pueden reconcentrarse y devolverse a las fundiciones para someterlas a un nuevo proceso o para la recuperación de otros metales presentes. Muchos de estos residuos sólidos son peligrosos y deben almacenarse de acuerdo con la normativa ambiental.

## **FUNDICION Y AFINO DEL COBRE, PLOMO Y ZINC\***

### **Cobre**

El cobre se extrae de explotaciones a cielo abierto y minas subterráneas, dependiendo de la ley del mineral y de la naturaleza del yacimiento de éste. Normalmente, el mineral de cobre contiene menos del 1 % de cobre en forma de minerales sulfurosos. Una vez extraído el mineral a la superficie, se machaca y tritura hasta convertirlo en polvo fino y después se concentra para su ulterior procesado. En el proceso de concentración, se forman lodos mezclando con agua el mineral triturado, se añaden reactivos químicos y se inyecta aire en los lodos. Las burbujas de aire se fijan a los minerales de cobre y se extraen por despumado de la parte superior de las células de flotación. El concentrado contiene entre el 20 y el 30 % de cobre. Los residuos, o ganga caen al fondo de las células y se extraen, se deshidratan mediante espesadores y se transportan en forma de lodos a un estanque para su evacuación. Toda el agua utilizada en esta operación se recupera de los espesadores de deshidratación y el estanque de residuos y se recicla para devolverla al proceso.

La producción de cobre puede realizarse por procedimientos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos según el tipo de mineral que se utilice como carga. Los concentrados de mineral, que contienen minerales de sulfuro de cobre y sulfuro de hierro, se tratan mediante procesos pirometalúrgicos para obtener productos de cobre de alta pureza. Los minerales del óxido, que contienen minerales de cobre oxidados que pueden darse en otras partes de la mina, junto con otros materiales residuales oxidados, se tratan mediante procesos hidrometalúrgicos para obtener productos de cobre de elevada pureza.

La conversión del cobre a partir del mineral hasta obtener el metal, se realiza mediante fusión. En el curso de ésta, los concentrados se secan y se alimentan a hornos, de los que existen distintos tipos. Allí, los minerales sulfurosos se oxidan parcialmente y se funden, obteniéndose una capa de mata, sulfuro de cobre y hierro mezclado con escoria, y una capa superior de residuos.

La mata se somete a un proceso de conversión. La escoria se extrae del horno y se almacena o se desecha apilándola en la propia fundición. Una pequeña cantidad de la misma se vende

\* Adaptado de EPA, 1995.

para utilizarla como balasto de carretera y abrasivo para limpieza por chorro de arena. Un tercer producto del proceso de fundición es el dióxido de azufre, un gas que se recoge, depura y transforma en ácido sulfúrico para su venta o para utilizarlo en operaciones de lixiviación hidrometalúrgica.

Después de la fundición, la mata de cobre se lleva a un convertidor. Durante este proceso, la mata de cobre se vierte en un recipiente cilíndrico horizontal (de 10 × 4 m aproximadamente) provisto de una fila de tuberías. Estas, conocidas como *tuyères*, o toberas, penetran en el cilindro y se utilizan para introducir aire en el convertidor. Se añaden cal y sílice a la mata de cobre para que reaccionen con el óxido de hierro producido en el proceso y formen escoria. También puede añadirse al convertidor chatarra de cobre. El horno gira de manera que las toberas queden sumergidas, y se inyecta aire en la mata fundida con lo cual el resto del sulfuro de hierro reacciona con el oxígeno y forma óxido de hierro y dióxido de azufre. A continuación, se hace girar el convertidor para verter al exterior la escoria de silicato de hierro.

Una vez extraído todo el hierro, se hace girar de nuevo el convertidor y se realiza una segunda inyección de aire, con lo cual el resto del azufre se oxida y se separa del sulfuro de cobre. A continuación, se hace girar el convertidor para verter el cobre fundido, que en esta etapa recibe el nombre de cobre blister, o esponjoso (porque si se permite que se solidifique en este momento presentará una superficie llena de bultos debido a la presencia de oxígeno y azufre gaseosos). El dióxido de azufre extraído del convertidor se recoge y se envía al sistema de depuración de gas junto con el procedente del horno de fundición, y se transforma en ácido sulfúrico. Dado su contenido residual de cobre, la escoria se recicla y se lleva al horno de fundición.

El cobre blister, que contiene un 98,5 % de cobre como mínimo, se afina en dos etapas hasta obtener un cobre de gran pureza. La primera etapa es el afinado a fuego, en el cual el cobre blister fundido se vierte en un horno cilíndrico, parecido a un convertidor, donde primero se inyecta aire y después gas natural o propano a través del metal en fusión para eliminar los últimos vestigios de azufre y cualquier residuo de oxígeno. Seguidamente, el cobre fundido se vierte en una rueda de colada para formar ánodos de suficiente pureza para el electroafinado.

En el electroafinado, los ánodos de cobre se cargan en células electrolíticas y se entremezclan con chapas, o cátodos, iniciales de cobre, en un baño de disolución de sulfato de cobre. Cuando se hace pasar una corriente continua por la célula, el cobre del ánodo se disuelve, es transportado a través del electrolito y se deposita en las chapas iniciales catódicas. Cuando los cátodos han adquirido suficiente espesor se extraen de la célula electrolítica y se coloca en su lugar un nuevo juego de chapas iniciales. Las impurezas sólidas de los ánodos caen al fondo de la célula en forma de lodo, donde finalmente se recogen para procesarlas a fin de recuperar metales preciosos tales como oro y plata. Este material se conoce como fango anódico.

Los cátodos extraídos de la célula electrolítica son el producto primario del productor de cobre y contienen 99,99+ % de este metal. Pueden venderse a fábricas de alambre como cátodos o continuar procesándose para transformarlos en un producto denominado varilla. Al fabricar varilla, los cátodos se funden en un horno de cuba y el cobre fundido se vierte en una rueda de colada con objeto de formar una barra adecuada para laminarla y convertirla en una varilla continua de 3/8 pulgadas de diámetro. Este producto en forma de varilla se envía a las fábricas de alambre, donde se extruye para obtener alambre de cobre de diversos diámetros.

En el proceso hidrometalúrgico, los minerales oxidados y los materiales residuales se lixivian con ácido sulfúrico obtenido en

el proceso de fundición. La lixiviación se realiza *in situ*, o en pilas especialmente preparadas, distribuyendo ácido sobre la parte superior y permitiendo que se infiltre y descienda por percolación a través del material, donde se acumula. El suelo situado debajo de las placas de lixiviación está revestido con un material plástico impermeable y resistente a los ácidos para evitar que el licor de lixiviación contamine las aguas subterráneas. Una vez recogidas, las disoluciones ricas en cobre pueden tratarse eligiendo entre dos procesos— el de cementación o el de extracción por disolvente/extracción electrolítica (SXEW). En el proceso de cementación (apenas utilizado en la actualidad), el cobre de la disolución ácida se deposita sobre la superficie de chatarra de hierro, intercambiándose con éste. Cuando se ha cementado suficiente cobre, el hierro rico en cobre se lleva a la fundición junto con los concentrados de mineral para recuperar el cobre por vía pirometalúrgica.

En el proceso SXEW, la disolución de lixiviación fecunda, o impregnada (PLS), se concentra por extracción del disolvente, con lo cual se extrae el cobre pero no las impurezas metálicas (hierro y otras impurezas). La disolución orgánica cargada de cobre se separa entonces del lixiviado en un tanque de decantación. Se añade ácido sulfúrico a la mezcla orgánica fecunda, con lo cual el cobre se separa en una disolución electrolítica. El lixiviado, que contiene el hierro y otras impurezas, se devuelve a la operación de lixiviación donde el ácido que contiene se utiliza para una ulterior lixiviación. La disolución de separación, rica en cobre, se transfiere a una célula de extracción electrolítica. Este tipo de célula se diferencia de una célula de electroafinado en que utiliza un ánodo permanente insoluble. El cobre de la disolución se deposita electrolíticamente sobre un cátodo de chapa inicial de un modo muy parecido a como se deposita sobre el cátodo de una célula de electroafinado. Una vez agotado el cobre del electrolito, éste se devuelve al proceso de extracción por disolvente, donde se utiliza para separar más cobre de la disolución orgánica. Los cátodos producidos en el proceso de extracción electrolítica se venden o se transforman en varillas igual que los producidos en el proceso de electroafinado.

Las células de extracción electrolítica también se utilizan para la preparación de chapas iniciales para los procesos de electroafinado y extracción electrolítica, depositando el cobre sobre cátodos de acero inoxidable o titanio y separando después el cobre depositado.

### Riesgos y su prevención

Los principales riesgos son la exposición a polvos de mineral durante el procesado y fusión de éste, humos metálicos (de cobre, plomo y arsénico) durante la fundición, dióxido de azufre y monóxido de carbono durante la mayoría de las operaciones de fundición, ruido procedente de las operaciones de machaqueo y trituración y de los hornos, estrés por calor a causa de los hornos y ácido sulfúrico y riesgos eléctricos durante los procesos electrolíticos.

Las precauciones comprenden: ventilación por extracción local de los polvos durante las operaciones de transferencia; ventilación local y de dilución del dióxido de azufre y el monóxido de carbono; un programa de control de ruido y de protección auditiva; ropa y pantallas protectoras, periodos de descanso y líquidos para el estrés por calor; y VEL, equipo de protección personal (EPP) y precauciones eléctricas para los procesos electrolíticos. Comúnmente se utiliza protección respiratoria contra el polvo, humos y dióxido de azufre.

La Tabla 82.5 ofrece una lista de los contaminantes ambientales presentes en las distintas etapas de la fundición y afino del cobre.

Tabla 82.1 • Materiales de proceso de partida y residuos contaminantes generados en la fundición y afino del cobre.

Proceso	Materiales de partida	Emisiones a la atmósfera	Residuos del proceso	Otros residuos
Concentración de cobre	Mineral de cobre, agua, reactivos químicos, espesantes		Aguas residuales de flotación	Colas conteniendo minerales residuales como caliza y cuarzo
Lixiviación de cobre	Concentrado de cobre, ácido sulfúrico		Lixiviado incontrolado	Residuo de lixiviación en montones
Fundición de cobre	Concentrate de cobre, fundente silíceo	Dióxido de azufre, materia particulada conteniendo arsénico, antimonio, cadmio, plomo, mercurio y zinc		Lodos/fangos ácidos de descarga de la planta, escoria conteniendo sulfuros de hierro, sílice
Conversión de cobre	Mata de cobre, chatarra de cobre, fundente silíceo	Dióxido de azufre, materia particulada conteniendo arsénico, antimonio, cadmio, plomo, mercurio y zinc		Lodos/fangos ácidos de descarga de la planta, escoria conteniendo sulfuros de hierro, sílice
Afino electrolítico del cobre	Cobre blister, ácido sulfúrico			Lodos conteniendo impurezas tales como oro, plata, antimonio, arsénico, bismuto, hierro, plomo, níquel, selenio, azufre y zinc

### Plomo

El proceso principal de producción de plomo consta de cuatro etapas: sinterización, fusión, despumación y afinado pirometalúrgico. Para empezar, se introduce en una máquina de sinterización una carga compuesta principalmente de concentrado de plomo en forma de sulfuro de plomo. Pueden añadirse otras materias primas, como hierro, sílice, fundente calizo, coque, sosa, ceniza, pirita, zinc, cáusticos y particulados recogidos de los dispositivos de control de la contaminación. En la máquina de sinterización, la carga de plomo se somete a chorros de aire caliente que quemán el azufre, creando así dióxido de azufre. El óxido de plomo que queda después de este proceso contiene alrededor del 9 % de su peso en carbono. A continuación el sinterizado, junto con coque, diversos materiales reciclados y de limpieza, caliza y otros fundentes se cargan, para su reducción, en un horno de cuba, donde el carbono actúa como combustible y funde el material de plomo. El plomo fundido fluye al fondo del horno, donde se forman cuatro capas: "speiss" (el material más ligero, básicamente arsénico y antimonio); "mata" (sulfuro de cobre y otros sulfuros metálicos); escoria del horno de cuba (principalmente silicatos), y lingote de plomo (98 % de plomo en peso).

A continuación se drenan todas las capas. El speiss y la mata se venden a fundiciones de cobre para la recuperación del cobre y de los metales preciosos. La escoria del horno, que contiene zinc, hierro, sílice y cal se almacena en pilas y se recicla en parte. En los hornos de cuba se generan emisiones de óxido de azufre debido a las pequeñas cantidades residuales de sulfuro y sulfatos de plomo contenidas en la carga de sinterizado.

El lingote de plomo en bruto obtenido en el horno de cuba requiere normalmente un tratamiento preliminar en calderas antes de ser sometido a las operaciones de afinado. Durante la despumación, el lingote se agita en una caldera especial y se enfría hasta justo por encima de su punto de congelación (370 a 425 °C). Una espuma, compuesta de óxido de plomo, junto con cobre, antimonio y otros elementos, flota hasta situarse en la parte superior y se solidifica por encima del plomo fundido.

La espuma se retira y se lleva a un horno de espuma para recuperar los metales útiles que no son plomo. A fin de mejorar la recuperación de cobre, el lingote de plomo despumado se trata añadiendo materiales portadores de azufre, zinc, y/o aluminio, con lo que el contenido de cobre se reduce al 0,01 % aproximadamente.

Tabla 82.2 • Materiales de proceso de partida y residuos contaminantes generados en la fundición y afino del plomo.

Proceso	Materiales de partida	Emisiones a la atmósfera	Residuos del proceso	Otros residuos
Sinterización de plomo	Mineral de plomo, hierro, sílice, fundente calizo, coque, sosa, ceniza, pirita, zinc, cáusticos, polvo de cámara de sacos filtrantes	Dióxido de azufre, materia particulada conteniendo cadmio y plomo		
Fundición de plomo	Sinterizado de plomo, coque	Dióxido de azufre, materia particulada conteniendo cadmio y plomo	Aguas residuales del lavado de la planta, agua de granulación de escoria	Escoria conteniendo impurezas tales como zinc, hierro, sílice y cal, sólidos de balsas de superficie
Despumación de plomo	Lingote de plomo, ceniza de sosa, azufre, polvo de cámara de sacos filtrantes, coque			Escoria conteniendo impurezas tales como cobre, sólidos de balsas de superficie
Afino del plomo	Lingote de despumación de plomo			

Durante la cuarta etapa, el lingote de plomo se refina por métodos pirometalúrgicos para eliminar cualquier resto de material comercializable que no sea plomo (p. ej., oro, plata, bismuto, zinc y óxidos metálicos tales como antimonio, arsénico, estaño y óxido de cobre). El plomo se refina en una caldera de hierro colado, en un proceso de cinco etapas. Primero se extraen el antimonio, el estaño y el arsénico. Después se añade zinc y se extraen el oro y la plata en la escoria de zinc. Seguidamente, se refina el plomo por extracción (destilación) del zinc al vacío. El afinado continúa con la adición de calcio y magnesio. Estos dos materiales se combinan con bismuto y forman un compuesto insoluble que se extrae de la caldera por despumación. En la etapa final, pueden añadirse al plomo sosa cáustica y/o nitratos para eliminar cualquier resto de impurezas metálicas. El plomo afinado tendrá una pureza del 99,90 al 99,99 % y puede mezclarse con otros metales para formar aleaciones, o colarse directamente en moldes.

### Riesgos y su prevención

Los principales riesgos son la exposición a polvos de mineral durante el procesado y fusión de éste, humos metálicos (de plomo, arsénico y antimonio) durante la fundición, dióxido de azufre y monóxido de carbono durante la mayoría de las operaciones de fundición, ruido procedente de las operaciones de machaqueo y trituración y de los hornos, y estrés por calor a causa de los hornos.

Las precauciones comprenden: ventilación por extracción local de los polvos durante las operaciones de transferencia; ventilación local y de dilución del dióxido de azufre y el monóxido de carbono; un programa de control de ruido y de protección auditiva; ropa y pantallas protectoras, periodos de descanso y líquidos para el estrés por calor. Normalmente se utiliza protección respiratoria contra el polvo, humos y dióxido de azufre. Es esencial el control biológico del plomo.

La Tabla 82.2 ofrece una lista de los contaminantes ambientales presentes en las distintas etapas de la fundición y afino del plomo.

### Zinc

El concentrado de zinc se produce separando el mineral, que puede contener proporciones tan pequeñas como el 2 % de zinc, de la roca estéril mediante machaqueo y flotación, proceso que normalmente se lleva a cabo en la propia mina. A continuación, se reduce el concentrado de zinc por uno de estos dos métodos: pirometalúrgicamente mediante destilación (calentándolo en una retorta en un horno) o hidrometalúrgicamente por extracción

electrolítica. Este último método es el que se utiliza aproximadamente en el 80 % del afinado total de zinc.

El proceso de afinado hidrometalúrgico del zinc consta generalmente de cuatro etapas: calcinación, lixiviación, depuración y extracción electrolítica. La calcinación, o tostación, es un proceso a alta temperatura (700 a 1000 °C) que convierte el concentrado de sulfuro de zinc en un óxido de zinc impuro llamado calcina. Hay varios tipos de tostación: en horno multipaza, o de varias soleras; en suspensión, y en lecho fluidizado. Por lo general, la calcinación comienza mezclando los materiales que contienen zinc con carbón. Después, esta mezcla se calienta, o tuesta, para evaporar el óxido de zinc, que a continuación se extrae de la cámara de reacción con la corriente de gas producida. La corriente de gas se dirige a la zona de la cámara de sacos (filtro), donde el óxido de zinc es capturado en el polvo de la cámara.

Todos los procesos de calcinación generan dióxido de azufre, el cual se controla y convierte en ácido sulfúrico como subproducto comercializable del proceso.

El procesado electrolítico de la calcina desulfurada consta de tres etapas básicas: lixiviación, depuración y electrólisis. La lixiviación consiste en disolver la calcina capturada en una disolución de ácido sulfúrico para formar una disolución de sulfato de zinc. La calcina puede lixiviarse una o dos veces. En el método de la doble lixiviación, la calcina se disuelve en una disolución ligeramente ácida para eliminar los sulfatos. Después, se lixivia por segunda vez en una disolución más concentrada que disuelve el zinc. Esta segunda etapa de lixiviación constituye en realidad el comienzo de la tercera etapa de depuración, dado que muchas de las impurezas de hierro se separan de la disolución y del zinc.

Después de la lixiviación, la disolución se depura en dos o más etapas añadiendo polvo de zinc. La depuración de la disolución tiene lugar al forzar el polvo la precipitación de los elementos nocivos, con lo cual éstos pueden eliminarse por filtración. Comúnmente, la depuración se lleva a cabo en grandes tanques de agitación. El proceso se realiza a temperaturas de 40 a 85 °C y a presiones comprendidas entre la atmosférica y 2,4 atmósferas. Entre los elementos que se recuperan durante la depuración están el cobre, en forma de torta, y el cadmio, que se recupera como metal. Después de la depuración, la disolución esta lista para la etapa final, la extracción electrolítica.

La extracción electrolítica del zinc se lleva a cabo en una célula electrolítica, haciendo circular una corriente eléctrica por la disolución acuosa de zinc desde un ánodo de aleación de plomo y plata. Este proceso produce la carga del zinc en

Tabla 82.3 • Materiales de proceso de partida y residuos contaminantes generados en la fundición y afino del zinc.

Proceso	Materiales de partida	Emisiones a la atmósfera	Residuos del proceso	Otros residuos
Calcinación de zinc	Mineral de zinc, coque	Dióxido de azufre, materia particulada conteniendo zinc y plomo		Lodos ácidos de descarga de la planta
Lixiviación de zinc	Calcina de zinc, ácido sulfúrico, caliza, electrolito agotado		Aguas residuales conteniendo ácido sulfúrico	
Depuración de zinc	Solución de zinc-ácido, polvo de zinc		Aguas residuales conteniendo ácido sulfúrico, hierro	Torta de cobre, cadmio
Extracción electrolítica del zinc	Zinc en una solución de ácido sulfúrico/acuosa, ánodos de aleación de plomo y plata, cátodos de aluminio, carbonato de bario o estroncio, aditivos coloidales		Acido sulfúrico diluido	Lodos/fangos de células electrolíticas

suspensión, que se ve obligado a depositarse sobre un cátodo de aluminio sumergido en la solución. A intervalos de 24 a 48 horas se para cada una de las células, se extraen y lavan los cátodos recubiertos de zinc, y se separa éste de las placas de aluminio por medios mecánicos. A continuación, el concentrado de zinc, que normalmente tiene una pureza de hasta el 99,995 %, se funde y cuela en lingotes.

Las unidades de deposición electrolítica del zinc contienen hasta varios centenares de células. Una parte de la energía eléctrica se convierte en calor, con lo que aumenta la temperatura del electrolito. Las células electrolíticas trabajan a temperaturas comprendidas entre 30 y 35 °C y a la presión atmosférica. Durante la extracción electrolítica, una parte del electrolito se hace pasar por torres de refrigeración para reducir su temperatura y evaporar el agua que recoge durante el proceso.

### Riesgos y su prevención

Los principales riesgos son la exposición a polvos de mineral durante el procesado y fusión de éste, humos metálicos (de zinc y plomo) durante el afinado y tostación, dióxido de azufre y monóxido de carbono durante la mayoría de las operaciones de fundición, ruido procedente de las operaciones de machaqueo y trituración y de los hornos, estrés por calor a causa de los hornos y ácido sulfúrico y riesgos eléctricos durante los procesos electrolíticos.

Las precauciones comprenden: ventilación por extracción local de los polvos durante las operaciones de transferencia; ventilación local y de dilución del dióxido de azufre y el monóxido de carbono; un programa de control de ruido y de protección auditiva; ropa y pantallas protectoras, periodos de descanso y líquidos para el estrés por calor; y VEL, equipo de protección personal (EPP) y precauciones eléctricas para los procesos electrolíticos. Comúnmente se utiliza protección respiratoria contra el polvo, humos y dióxido de azufre.

Tabla 82.3 ofrece una lista de los contaminantes ambientales presentes en las distintas etapas de la fundición y afino del zinc.

## ● FUNDICION Y AFINO DEL ALUMINIO

*Bertram D. Dinman*

### Resumen de procesos

La bauxita se extrae por laboreo a cielo abierto. Los minerales más ricos se utilizan tal como se extraen. Los de baja ley pueden beneficiarse mediante machaqueo y lavado para eliminar la arcilla y la sílice estériles. La producción del metal comprende dos etapas básicas:

1. *Afino.* Producción de alúmina a partir de la bauxita por el procedimiento Bayer, en el cual la bauxita es digerida a alta temperatura y presión en una solución concentrada de sosa cáustica. El hidrato resultante se cristaliza y calcina para obtener el óxido en un horno de calcinación de lecho fluido.
2. *Reducción.* Reducción de la alúmina a aluminio virgen mediante el proceso electrolítico de Hall-Heroult, utilizando electrodos de carbón y fundente de criolita.

La explotación experimental sugiere que en el futuro el aluminio podrá obtenerse por reducción directa del mineral.

Actualmente se emplean dos tipos principales de células electrolíticas de Hall-Heroult. En el llamado proceso de "precocion" se utilizan electrodos fabricados como se indica a continuación. En las fundiciones de este tipo normalmente se produce exposición a hidrocarburos policíclicos en las instalaciones de fabricación de electrodos, sobre todo en las unidades

de mezcla y en las prensas de conformación. Las fundiciones que utilizan la célula tipo Soderberg no requieren instalaciones para la fabricación de ánodos de carbón cocido. En su lugar, la mezcla de coque y aglutinante de brea se coloca en unas tolvas cuyos extremos inferiores están sumergidos en el caldo de la mezcla de criolita y alúmina. Al ser calentada la mezcla de brea y coque por el caldo de metal y criolita en el interior de la célula, esta mezcla se convierte *in situ* en una masa grafitica dura. Para que circule una corriente continua se introducen en la masa anódica varillas metálicas eléctricamente conductoras. Estas varillas deben sustituirse periódicamente; al extraerlas, se emiten al ambiente de la nave donde se encuentra la célula considerables cantidades de sustancias volátiles componentes de la brea de alquitran mineral. A esta exposición se añaden las sustancias volátiles de la brea generadas durante la cocción de la masa de brea y coque.

Durante la pasada década la industria ha tendido o a prescindir de la sustitución o a modificar las instalaciones de reducción del tipo Soderberg existentes, dado el riesgo de carcinogenicidad demostrado que presentan. Asimismo, con la creciente automatización de las operaciones de las células de reducción—en especial el cambio de ánodos, las tareas se realizan con más frecuencia desde grúas mecánicas confinadas. Así pues, en las instalaciones modernas las exposiciones de los trabajadores y el riesgo de padecer trastornos asociados con la fusión del aluminio están disminuyendo gradualmente. Por el contrario, en las economías que no permiten realizar fácilmente las inversiones adecuadas, la persistencia de los antiguos procesos de reducción ejecutados manualmente continuará planteando el riesgo de que se produzcan esos trastornos de origen profesional (véase a continuación) antes asociados con las plantas de reducción de aluminio. De hecho, esta tendencia irá agravándose en las operaciones anticuadas que no han sido objeto de mejoras, en especial a medida que envejezcan.

### Fabricación de electrodos de carbón

Los electrodos necesarios para la obtención del metal puro por reducción electrolítica mediante precocion, se fabrican normalmente en una instalación asociada a este tipo de fundición de aluminio. Los ánodos y cátodos se hacen casi siempre de una mezcla de coque derivado del petróleo, previamente triturado, y brea. Primero se tritura el coque en molinos de bolas, después se transporta y se mezcla mecánicamente con la brea y por último se funde y convierte en bloques en una prensa de moldeo. A continuación, estos bloques anódicos o catódicos se calientan en un horno de gas durante varios días hasta que forman masas grafiticas duras una vez extraídas prácticamente todas las sustancias volátiles. Finalmente, se unen a varillas anódicas o se les practican ranuras con una sierra para alojar en ellas las barras catódicas.

Hay que señalar que la brea empleada para formar estos electrodos es un destilado derivado del carbón o de alquitran de petróleo. Durante la conversión de este alquitran en brea por calentamiento, la brea obtenida como producto final ha perdido al hervir casi todos sus componentes inorgánicos de bajo punto de ebullición como, por ejemplo, el SO<sub>2</sub>, así como los componentes alifáticos y los componentes aromáticos de uno y dos anillos. Por lo tanto, la utilización de esta brea no debiera entrañar los mismos riesgos que los alquitranes de carbón o petróleo, dado que estas clases de compuestos no deberían estar presentes. Existen indicios de que el potencial cancerígeno de estos productos de brea puede no ser tan elevado como la mezcla, más compleja, de alquitranes y otros componentes volátiles asociada con la combustión incompleta del carbón.



### Riesgos y su prevención

Los riesgos y medidas preventivas para los procesos de fundición y afino de aluminio, son básicamente los mismos que los de la fundición y el afino en general; no obstante, los distintos procesos presentan ciertos riesgos específicos.

#### Minería

Aunque se ven en la literatura referencias esporádicas al “pulmón de bauxita”, hay pocas pruebas convincentes de la existencia de tal entidad. No obstante, debiera considerarse la posible presencia de sílice cristalina en los minerales de bauxita.

#### El proceso Bayer

El empleo extensivo de sosa cáustica en el proceso Bayer presenta frecuentes riesgos de quemaduras químicas de la piel y los ojos. La desincrustación de los tanques con martillos neumáticos provoca grave exposición al ruido. A continuación se comentan los riesgos potenciales que entraña la inhalación de dosis excesivas del óxido de aluminio producido en este proceso.

Todos los trabajadores que intervienen en el proceso Bayer deben ser bien informados acerca de los riesgos que implica la manipulación de sosa cáustica. En todos los lugares de trabajo en los que exista riesgo, deberán preverse fuentes para lavados oculares, lavabos con agua corriente y duchas de lluvia artificial, con instrucciones para su utilización. Se deberán facilitar equipos de protección personal (EPP) (p. ej., gafas de montura ajustada, guantes, mandiles y botas). Asimismo deberán preverse duchas y dobles taquillas (una para la ropa de trabajo y otra para las prendas personales, y se encarecerá a todos los trabajadores la necesidad de lavarse a fondo al final del turno. A todos los operarios que trabajen con metal en fusión deberán proporcionárseles pantallas faciales, respiradores, manoplas, mandiles, brazaletes y polainas como protección contra quemaduras, polvo y humos. Los operarios que trabajen en el proceso de baja temperatura de Gadeau deberán ser provistos de guantes y trajes especiales para protegerles de los vapores de ácido clorhídrico que se desprenden al entrar las células en funcionamiento; la lana ha demostrado poseer buena resistencia a dichos vapores. Los respiradores con cartuchos filtrantes de carbón vegetal y las mascarillas impregnadas de alúmina protegen adecuadamente de los humos y vapores de brea y flúor; como protección frente al polvo de carbón se requieren mascarillas antipolvo eficaces. A los trabajadores sujetos a mayores niveles de exposición al polvo y a los humos y vapores, especialmente en operaciones del proceso Soderberg, debe facilitárseles equipo de protección respiratoria con entrada de aire puro. Cuando se generalice el trabajo mecanizado a distancia desde cabinas cerradas en las

naves de crisoles, estas medidas de protección irán siendo menos necesarias.

#### Reducción electrolítica

La reducción electrolítica expone a los trabajadores al riesgo de sufrir quemaduras de la piel y accidentes por salpicaduras de metal en fusión, trastornos debidos al estrés por calor, ruido, riesgos eléctricos, y humos y vapores de criolita y ácido fluorhídrico. Las células de reducción electrolítica pueden emitir grandes cantidades de polvo de fluoruros y alúmina.

En los talleres de fabricación de electrodos de carbón deben instalarse equipos de ventilación por extracción con filtros de mangas; el confinamiento de los equipos de trituración de carbón y brea minimiza de un modo más eficaz aún las exposiciones a brea caliente y polvo de carbón. Deberán comprobarse regularmente las concentraciones de polvo atmosférico con un dispositivo de muestreo adecuado. Los trabajadores expuestos al polvo deberán ser sometidos a exploraciones radiológicas periódicas, seguidas de un reconocimiento médico cuando sea necesario.

Con el fin de reducir el riesgo que implica la manipulación de brea, deberá mecanizarse el transporte de este material en la medida de lo posible (por ej., pueden utilizarse camiones cisterna con sistema de calentamiento para transportar la brea líquida a los talleres, donde se bombeará automáticamente a depósitos de brea caldeados). También es prudente realizar exploraciones periódicas de la piel para detectar eritema, epitelomas y dermatitis, y las cremas barrera a base de alginato puede proporcionar una protección suplementaria.

Antes de que inicien sus tareas, los operarios que realizan trabajos en caliente deben ser instruidos sobre la necesidad de aumentar su ingesta de líquidos y salar abundantemente los alimentos que ingieren. Se les deberá enseñar, tanto a ellos como a sus supervisores, a detectar trastornos incipientes producidos por el calor en ellos mismos y en sus compañeros. Todos los que realicen este tipo de trabajo deberán ser instruidos en la adopción de las medidas necesarias para prevenir la aparición o agravamiento de los trastornos por calor.

Los trabajadores expuestos a altos niveles de ruido deberán recibir equipos de protección auditiva, tales como tapones de oídos que permitan el paso del ruido de baja frecuencia (para que puedan escuchar las órdenes) pero reduzcan la transmisión del ruido intenso de alta frecuencia. Asimismo, deberán ser sometidos periódicamente a exploraciones audiométricas para detectar pérdida auditiva. Por último, se deberá enseñar también al personal a administrar medidas de reanimación cardiopulmonar a las víctimas de accidentes por descargas eléctricas.

Tabla 82.4 • Materiales de proceso de partida y residuos contaminantes generados en la fundición y afino del aluminio.

Proceso	Materiales de partida	Emisiones a la atmósfera	Residuos del proceso	Otros residuos
Afino de bauxita	Bauxita, hidróxido sódico	Partículas, solución cáustica/vapor de agua		Residuo conteniendo silicio, hierro, titanio, óxidos de calcio y cáusticos
Clarificación y precipitación de alúmina	Lodos de alúmina, almidón, agua		Aguas residuales conteniendo almidón, arena y cáusticos	
Calcínación de alúmina	Hidrato de aluminio	Partículas y vapor de agua		
Fundición electrolítica primaria de aluminio	Alúmina, ánodos de carbón, células electrolíticas, criolita	Fluoruro—gaseoso y en partículas, dióxido de carbono, dióxido de azufre, monóxido de carbono, C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , CF <sub>4</sub> y carbonos perfluorados (PFC)		Revestimientos de cuba agotados

El riesgo de sufrir salpicaduras de metal en fusión y quemaduras graves está muy extendido en numerosos lugares de trabajo de las plantas de reducción y en operaciones conexas. Además de facilitar prendas de protección (p. ej. manoplas, mandiles, polainas y pantallas faciales) debe prohibirse el uso de prendas de fibras sintéticas, ya que debido al calor del metal líquido tales fibras se funden y adhieren a la piel, agravando con ello las quemaduras.

Se deberá excluir de las operaciones de reducción a quienes lleven marcapasos cardíacos, dado el riesgo de disritmias inducidas por campos magnéticos.

### Otros efectos para la salud

Se han descrito ampliamente los riesgos que entraña para los trabajadores, la población en general y el medio ambiente la emisión de gases, humos y polvo que contienen fluoruros debido al empleo de fundente de criolita (véase la Tabla 82.4). Se han notificado diversos grados de mancha de los dientes permanentes en niños que viven cerca de fundiciones de aluminio mal controladas cuando han estado expuestos durante la fase de desarrollo del crecimiento de los dientes permanentes. Entre los trabajadores de fundiciones antes de 1950, o donde se ha seguido aplicando un control inadecuado o han continuado los vertidos de fluoruro, se han observado grados variables de fluorosis ósea. La primera fase de esta enfermedad consiste en un simple aumento de la densidad ósea, especialmente marcado en los cuerpos vertebrales y la pelvis. Después, a medida que el hueso absorbe más fluoruro, se calcifican los ligamentos de la pelvis. Finalmente, en caso de exposición extrema y prolongada al fluoruro, se produce calcificación de la estructura paravertebral y otras estructuras ligamentosas, así como de las articulaciones. Aunque esta última fase se ha visto en su forma grave en plantas de proceso de criolita, rara vez, o nunca, se han observado fases tan avanzadas entre trabajadores de fundiciones de aluminio. Aparentemente, los cambios radiológicos, menos graves, en las estructuras óseas y ligamentosas no se asocian con alteraciones de la función arquitectónica o metabólica del hueso. Mediante prácticas correctas de trabajo y una ventilación adecuada, se puede evitar fácilmente que los trabajadores que realizan tales operaciones de reducción desarrollen cualquiera de los cambios radiológicos antes citados, incluso después de pasar de 25 a 40 años realizando ese trabajo. Por último, la mecanización de las operaciones en las naves de crisoles debería reducir al mínimo o eliminar totalmente cualquier riesgo derivado del fluoruro.

Desde principios del decenio de 1980 quedó demostrada definitivamente la aparición de una enfermedad parecida al asma entre los operarios que trabajan en las naves de crisoles de reducción de aluminio. Esta aberración, conocida como asma profesional asociada a la fundición de aluminio (OAAAS), se caracteriza por resistencia variable al flujo de aire, hiperrespuesta bronquial o ambas cosas, y no se ve acelerada por estímulos producidos fuera del lugar de trabajo. Sus síntomas clínicos consisten en sibilancias, rigidez torácica y falta de aliento, y tos improductiva, que no suelen aparecer hasta varias horas después de la exposición en el trabajo. El período de latencia entre el comienzo de la exposición en el trabajo y la aparición del OAAAS es muy variable, ya que puede oscilar entre 1 semana y 10 años, dependiendo de la intensidad y el carácter de la exposición. Generalmente, la enfermedad mejora con la retirada del afectado de su lugar de trabajo después de unas vacaciones, etc., y aumenta en frecuencia y gravedad con las exposiciones repetidas en el trabajo. Aunque se ha relacionado la aparición de esta patología con las concentraciones de fluoruro en la nave de crisoles, no está claro que la etiología del trastorno provenga específicamente de la exposición a este agente químico. Dada la complejidad de la mezcla de polvos

y humos (p. ej. fluoruros gaseosos y en partículas, dióxido de azufre y bajas concentraciones de óxidos de vanadio, níquel y cromo) es más probable que tales medidas de fluoruros suplanten a esta compleja mezcla de humos, gases y partículas que encontramos en las naves de crisoles.

Actualmente parece ser que esta enfermedad forma parte de un grupo cada vez más importante de enfermedades de origen profesional: el asma profesional. El proceso causante de este trastorno es difícil de determinar con carácter individual. Los síntomas de OAAAS pueden obedecer a asma preexistente de origen alérgico, hiperrespuesta bronquial inespecífica, síndrome de disfunción reactiva de las vías aéreas (RADS), o a un auténtico asma profesional. Actualmente, el diagnóstico de esta enfermedad resulta problemático; requiere una historia compatible y la presencia de limitación variable del flujo de aire o, en su defecto, producción de hiperresponsividad bronquial inducida farmacológicamente. Si no es demostrable esto último, el diagnóstico es improbable (no obstante, este fenómeno puede llegar a desaparecer tras remitir el trastorno al eliminar las exposiciones en el trabajo).

Dado que el trastorno tiende a agravarse progresivamente con la exposición continuada, casi siempre es necesario apartar a los individuos afectados de las exposiciones reiteradas en el trabajo. Si bien en un principio debiera restringirse a los individuos con asma atópica preexistente la entrada en las naves de células de reducción de aluminio, la ausencia de atopia no permite predecir si esta enfermedad se manifestará después de las exposiciones en el trabajo.

Existen actualmente informes que sugieren una posible relación entre el aluminio y la neurotoxicidad en trabajadores dedicados a la fundición y soldadura de este metal. Ha quedado claramente demostrado que el aluminio se absorbe por los pulmones y se excreta en la orina en niveles superiores a los normales, sobre todo en el caso de operarios que trabajan en las naves de células de reducción. No obstante, gran parte de la literatura relativa a los efectos neurológicos en esos trabajadores se deriva de la presunción de que la absorción de aluminio provoca neurotoxicidad humana. Por lo tanto, de momento y mientras tales asociaciones no sean demostrables con mayor reproducibilidad, la conexión entre el aluminio y la neurotoxicidad profesional debe considerarse especulativa.

Dada la necesidad esporádica de consumir más de 300 kcal/h durante la sustitución de ánodos o la realización de otras tareas que exigen considerable esfuerzo en presencia de criolita y aluminio en fusión, pueden darse casos de trastornos por calor en épocas calurosas. Tales episodios suelen ocurrir sobre todo cuando el tiempo cambia inicialmente de unas condiciones moderadas a las calurosas y húmedas del verano. También las prácticas de trabajo que determinan la sustitución acelerada de ánodos o el trabajo en dos turnos seguidos en tiempo caluroso, predisponen a los operarios a sufrir tales trastornos derivados del calor. Los trabajadores mal aclimatados al calor o físicamente mal acondicionados, cuya ingesta de sal es inadecuada o padecen enfermedades intercurrentes o han estado enfermos recientemente, son especialmente propensos a sufrir agotamiento y/o calambres por calor mientras realizan esas tareas pesadas. Se han dado casos de golpe de calor en trabajadores de fundiciones de aluminio, si bien con poca frecuencia excepto entre los predisuestos a ello por padecer alteraciones de salud conocidas (p. ej. alcoholismo, envejecimiento).

Se ha demostrado que la exposición a compuestos aromáticos policíclicos por respirar humo y partículas de brexa expone, especialmente al personal que trabaja en células de reducción del tipo Soderberg, a un riesgo excesivo de padecer cáncer de vejiga; el exceso de riesgo de cáncer está claramente establecido. Se supone que también están expuestos a ese riesgo los

trabajadores de las plantas de electrodos de carbón donde se calientan mezclas de coque y brea. No obstante, después de varios días de cocción de los electrodos a unos 1.200 °C, los compuestos aromáticos policíclicos se han quemado o volatilizado casi totalmente y ya no están asociados a esos ánodos o cátodos. Por lo tanto, no está claramente demostrado que las células de reducción que utilizan electrodos precocidos presenten un riesgo excesivo de producir tales trastornos malignos. Se ha sugerido que en las operaciones de reducción del aluminio se dan también otras neoplasias (p. ej., leucemia no granulocítica y cánceres cerebrales); hasta el momento, las pruebas al respecto son fragmentarias e inconsistentes.

En las naves de crisoles, el empleo de martillos neumáticos en las inmediaciones de las células electrolíticas para romper la cascarilla, produce niveles de ruido del orden de 100 dBA. Las células de reducción electrolítica funcionan en serie, alimentadas con corriente de baja tensión y alto amperaje, por lo que los casos de sacudida eléctrica no suelen ser graves. No obstante, en la central de fuerza, en el punto donde la acometida de alta tensión se conecta a la red en serie de la nave de crisoles, pueden producirse accidentes graves por descargas, sobre todo teniendo en cuenta que la línea de alimentación eléctrica conduce corriente alterna de alta tensión.

La preocupación que suscitan las exposiciones asociadas con los campos de energía electromagnéticos por sus posibles consecuencias para la salud, ha hecho que se cuestione la exposición de los trabajadores de este sector. Hay que tener en cuenta que la energía que alimenta las células de reducción electrolítica es corriente continua, por lo tanto, los campos electromagnéticos generados en las naves de crisoles son principalmente de tipo estático, o de campo estacionario. En comparación con los campos electromagnéticos de baja frecuencia está menos demostrado aún, tanto clínica como experimentalmente, que estos otros campos produzcan efectos biológicos consistentes o reproducibles. Además, los niveles de flujo de los campos magnéticos medidos en las naves de células actuales suelen estar dentro de los valores límite umbral propuestos a título experimental para los campos magnéticos estáticos, frecuencias subradioeléctricas y campos electrostáticos. También se produce exposición a campos electromagnéticos de ultrabaja frecuencia en las plantas de reducción, especialmente en los extremos lejanos de las mismas, cerca de las naves de rectificación, en cambio los niveles de flujo medidos en las vecinas naves de crisoles son mínimos, muy inferiores a los exigidos por las normas actuales. Por último, no se han aportado de modo convincente pruebas epidemiológicas coherentes o reproducibles de efectos adversos para la salud debidos a los campos electromagnéticos de las plantas de reducción de aluminio.

#### **Fabricación de electrodos**

Los trabajadores que están en contacto con humos de brea pueden sufrir eritema; la exposición a la luz solar induce fotosensibilización con aumento de la irritación. Se han dado casos de tumores de piel localizados entre operarios que trabajan en la fabricación de electrodos y que no practicaban una higiene personal adecuada; después de la separación y el cambio de trabajo, normalmente no se observa difusión ulterior ni recurrencia. Durante la fabricación de electrodos pueden, generarse cantidades considerables de polvo de carbón y brea. En casos de exposición intensa e indebidamente controlada a este tipo de polvo, existen informes esporádicos de que los trabajadores que fabrican electrodos de carbón pueden padecer neumoconiosis simple con enfisema focal, complicada por el desarrollo de lesiones fibróticas masivas. Tanto las neumoconiosis simples como las complicadas son indiferenciables de la patología correspondiente conocida como neumoconiosis de los trabajadores del

carbón. La trituración del coque en los molinos de bolas produce niveles de ruido de hasta 100 dBA.

*Nota del director:* La industria de la producción de aluminio está clasificada en el Grupo 1 de causas conocidas de cánceres humanos por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). Diversas exposiciones se han asociado con otras enfermedades (p. ej., el "asma de los talleres de crisoles") que se describen en otros apartados de esta *Enciclopedia*.

## FUNDICION Y AFINO DEL ORO

*I.D. Gadashkina y L.A. Ryzih\**

La minería del oro se practica a pequeña escala por buscadores privados (p. ej., en China y Brasil) y a gran escala en minas subterráneas (p. ej., en Sudáfrica) y explotaciones a cielo abierto (p. ej., en Estados Unidos).

El método de extracción más sencillo es el lavado en batea, que consiste en llenar un plato circular, o batea, con grava o arena que contienen oro, y agitarlo describiendo movimientos circulares bajo una corriente de agua. La arena y la grava, más ligeras, van eliminándose gradualmente por efecto del lavado, quedando las partículas de oro cerca del centro de la batea. La minería hidráulica del oro, más avanzada, consiste en proyectar un potente chorro de agua sobre la grava o la arena que contienen el oro. Con ello el material se disgrega y es eliminado a través de unas canaletas especiales en las que se deposita el oro, mientras que la grava, más ligera, flota y es extraída. Para la minería fluvial se emplean dragas de cangilones, o de rosario, consistentes en embarcaciones de fondo plano que utilizan una cadena de cangilones pequeños para extraer el material del fondo del río y vaciarlo en un recipiente cribador (trómel). El material gira en el trómel al incidir el agua sobre él. La arena portadora de oro se hunde a través de las perforaciones del trómel y cae en unas mesas vibrantes con lo que se consigue una mayor concentración.

Para extraer el oro del mineral se utilizan principalmente dos procesos, la *amalgamación* y la *cianuración*. El proceso de amalgamación se basa en la capacidad del oro para alearse con el mercurio metálico y formar amalgamas de diversas consistencias, desde sólida hasta líquida. El oro se separa de la amalgama bastante fácilmente eliminando el mercurio por destilación. En la amalgamación interna, el oro se separa dentro de la machacadora mientras se tritura el mineral. La amalgama extraída de la máquina se lava con agua en unos cuencos especiales para eliminar cualquier ingrediente adicional mezclado con la misma, después de lo cual el mercurio restante se extrae de la amalgama mediante pensado. En la amalgamación externa, el oro se separa fuera de la machacadora, en un amalgamador o canaleta especial (una mesa inclinada cubierta con planchas de cobre). Antes de extraer la amalgama, se añade mercurio fresco y a continuación se prensa la amalgama después de purificada y lavada. En ambos procesos el mercurio se elimina de la amalgama por destilación. El proceso de amalgamación es muy poco utilizado hoy en día, salvo en la minería a pequeña escala, por razones ecológicas.

La extracción de oro mediante cianuración se basa en la capacidad del oro para formar una doble sal estable soluble en agua  $\text{KAu}(\text{CN})_2$  cuando se combina con cianuro potásico en unión de oxígeno. La pasta obtenida al machacar el mineral de oro está formada por partículas cristalinas grandes, llamadas arenas, y partículas amorfas más pequeñas, que reciben el nombre de limo. La arena, al ser más pesada, se deposita en

\* Adaptado de la 3ª edición, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

el fondo de la machacadora y permite que la atraviesen las disoluciones (incluido el limo). El proceso de extracción del oro consiste en introducir el mineral finamente triturado en una tina de lixiviación y filtrar a través de él una disolución de cianuro sódico o potásico. El limo se separa de las disoluciones de cianuro de oro añadiendo espesantes y mediante filtración al vacío. La lixiviación en montones, en la que la disolución de cianuro se vierte sobre un montón enrasado de mineral triturado de gruesa granulometría, está ganando popularidad, especialmente con minerales y ganga de baja ley. En ambos casos, el oro se recupera de una disolución de cianuro de oro añadiendo polvo de aluminio o de zinc. En una operación separada, se añade ácido concentrado en un digestor para disolver el zinc o el aluminio, quedando libre de ese modo el oro sólido.

Bajo la influencia del ácido carbónico, el agua y el aire, así como de los ácidos presentes en el mineral, las disoluciones de cianuro se descomponen y desprenden ácido cianhídrico gaseoso. Para evitarlo, se añade una sustancia alcalina (cal o sosa cáustica). También se produce ácido cianhídrico cuando se añade el ácido para disolver el aluminio o el zinc.

Otro método de cianuración consiste en utilizar carbón activado para separar el oro. Primero se añaden espesantes a la disolución de cianuro de oro y después se forma un lodo con carbón activado para mantener el carbón en suspensión. El carbón portador de oro se elimina por cribado y el oro se extrae utilizando cianuro alcalino concentrado en disolución alcohólica, después de lo cual se recupera el oro mediante electrolisis. El carbón puede reactivarse por tostación y también puede recuperarse y reutilizarse el cianuro.

Tanto la amalgamación como la cianuración producen un metal que contiene una considerable cantidad de impurezas; la ley, o contenido de oro puro, rara vez excede de 900 partes por mil, a menos que se afine electrolíticamente hasta alcanzar una ley de 999.8 o superior.

También se recupera oro como subproducto de la fundición del cobre, el plomo y otros metales (véase el artículo "Fundición y afino del cobre, plomo y zinc" en este capítulo).

### Riesgos y su prevención

El mineral de oro que se encuentra a grandes profundidades se extrae mediante minería subterránea. Esto exige adoptar medidas para evitar la formación y dispersión de polvo durante el laboreo. La separación del oro de los minerales arsenicales provoca exposición de los mineros al arsénico y la contaminación del aire y el suelo con polvo que contiene arsénico.

En la extracción de oro con mercurio, los trabajadores pueden resultar expuestos a altas concentraciones atmosféricas de mercurio al colocar o retirar éste de las canaletas, al purificar o prensar la amalgama, y al separar el mercurio por destilación; se han notificado casos de envenenamiento por mercurio en trabajadores que realizan operaciones de amalgamación y destilación. El riesgo de exposición al mercurio en la amalgamación se ha convertido en un grave problema en varios países del Lejano Oriente y América del Sur.

En los procesos de amalgamación, el mercurio debe colocarse en las canaletas y la amalgama eliminarse de manera que el mercurio no entre en contacto con la piel de las manos (usando palas de mango largo, ropa protectora impermeable al mercurio, etc.). Asimismo, el procesado de la amalgama y la separación o prensado del mercurio deben mecanizarse en lo posible, de manera que las manos no puedan entrar en contacto con el mercurio; el procesado de la amalgama y la eliminación del mercurio por destilación han de llevarse a cabo en locales aislados independientes, con las paredes, techos, suelos, aparatos y superficies de trabajo revestidos de un material que no absorba

el mercurio o sus vapores; deben limpiarse con regularidad todas las superficies para eliminar cualquier depósito de mercurio. Todos los locales destinados a operaciones en las que se utilice mercurio deberán contar con ventilación general y ventilación local por extracción. Estos sistemas de ventilación habrán de ser especialmente eficaces en los locales donde se destila la amalgama para separar el mercurio. Las existencias de mercurio han de mantenerse en recipientes de metal herméticamente sellados y colocados debajo de una campana extractora especial; a los trabajadores debe facilitárseles el EPP necesario para trabajar con mercurio, y en los locales utilizados para la amalgamación y la destilación deben efectuarse controles atmosféricos sistemáticamente. También deben realizarse controles médicos.

La contaminación aérea por ácido cianhídrico en las plantas de cianuración depende de la temperatura del aire, ventilación, volumen de material que se procesa, concentración de las soluciones de cianuro utilizadas, calidad de los reactivos y número de instalaciones abiertas. La exploración médica de los trabajadores de las factorías de extracción de oro ha revelado síntomas de envenenamiento crónico por ácido cianhídrico y una elevada frecuencia de dermatitis alérgica, eccema y pioderma (una enfermedad inflamatoria aguda de la piel con formación de pus).

Es especialmente importante organizar correctamente la preparación de las disoluciones de cianuro. Si la apertura de los bidones que contienen las sales de cianuro y la adición de estas sales a las tinas de disolución no están mecanizadas, puede producirse una contaminación sustancial por polvo de cianuro y ácido cianhídrico gaseoso. Las disoluciones de cianuro deben añadirse por medio de bombas dosificadoras automáticas utilizando sistemas cerrados. Debe mantenerse el grado de alcalinidad correcto en todos los aparatos de cianuración de las plantas de cianuración de oro. Además, dichos aparatos deben estar sellados herméticamente y contar con VEL reforzada por una ventilación general adecuada y un sistema de control de fugas. Todos los aparatos de cianuración, así como las paredes, suelos, zonas diáfanos y escaleras de los locales deberán revestirse con materiales no porosos y limpiarse regularmente con disoluciones alcalinas de baja concentración..

El empleo de ácidos para descomponer el zinc en el procesado de fangos de oro puede liberar ácido cianhídrico y arsenamina, por lo tanto, estas operaciones se realizarán en locales independientes especialmente equipados, y utilizando campanas de extracción local.

Estará prohibido fumar y se pondrán a disposición de los trabajadores dependencias separadas para comer y beber. Se deberá disponer de un equipo de primeros auxilios con el material necesario para eliminar inmediatamente cualquier disolución de cianuro que entre en contacto con los cuerpos de los trabajadores y antídotos contra el envenenamiento por cianuro. Se facilitarán a los trabajadores prendas de protección personal impermeables a los compuestos de cianuro.

### Efectos ambientales

Existen pruebas de exposición a vapores metálicos de mercurio y metilación de mercurio en la naturaleza, especialmente donde se procesa el oro. En un estudio del agua, depósitos y peces de zonas mineras de Brasil donde se extrae oro, las concentraciones de mercurio en las partes comestibles del pescado que se consume localmente eran casi seis veces superiores al nivel recomendado oficialmente en ese país para el consumo humano (Palheta y Taylor 1995). En una zona contaminada de Venezuela, buscadores de oro han estado utilizando mercurio durante muchos años para separar el oro de las arenas y el polvo de roca auríferos. El alto nivel de mercurio existente en las capas superficiales del

suelo y en los sedimentos de goma de la zona contaminada constituye un grave riesgo para la salud pública y en el trabajo.

La contaminación por cianuro de las aguas residuales es también causa de gran preocupación. Las disoluciones de cianuro

deben tratarse antes de su evacuación, o bien recuperarse y reutilizarse. Las emisiones de ácido cianhídrico gaseoso del digestor, por ejemplo, se tratan con un producto de lavado antes de su emisión por la chimenea.

## METALURGIA Y METALISTERIA

### ● FUNDICIONES

*Franklin E. Mirer*

La fundición, o colada de metales consiste en verter metal fundido en una cavidad en el interior de un molde resistente al calor, que tiene la forma exterior, o negativa, del modelo del objeto metálico deseado. El molde puede contener un macho para determinar las dimensiones de cualquier cavidad interna en el objeto metálico final. El trabajo de fundición comprende los siguientes pasos:

- confección de un modelo del artículo deseado
- confección del molde y los machos y montaje del molde
- fusión y afino del metal
- colada del metal en el molde
- enfriamiento de la pieza metálica fundida
- separación del molde y el macho de la pieza metálica fundida
- eliminación del metal sobrante de la pieza de fundición acabada

Los principios básicos de la tecnología de la fundición han experimentado pocos cambios a lo largo de miles de años, sin embargo los procesos han alcanzado una mayor mecanización y automatización. Los modelos de madera han sido sustituidos gradualmente por otros de metal y plástico, se han desarrollado nuevas sustancias para la producción de machos y moldes, y se utiliza una amplia gama de aleaciones. El proceso de fundición más importante es el de moldeo de hierro con arena.

Los metales de fundición tradicionales son el *hierro*, *acero*, *latón* y *bronce*. El sector más grande de la industria de fundición produce fundiciones de hierro gris y fundiciones de hierro dúctil. Las fundiciones de hierro gris utilizan hierro o arrabio (lingotes nuevos) para hacer piezas de fundición de hierro normales. Las fundiciones de hierro dúctil añaden magnesio, cerio u otros aditivos (denominados generalmente *aditivos de cuchara*) a las cucharas de metal fundido, antes de la colada para hacer piezas de fundición nodular o maleable. Los diferentes aditivos tienen poca influencia en las exposiciones que se producen en los lugares de trabajo. El resto del sector industrial de las fundiciones de metales férreos produce acero y hierro maleable. Los principales clientes de las mayores fundiciones son los sectores del automóvil, construcción y aperos agrícolas. El nivel de empleo en las fundiciones ha descendido al disminuir el tamaño de los bloques de los motores, lo que permite colar éstos en un solo molde, y al haberse sustituido la fundición de hierro por el aluminio. Por el contrario, las fundiciones de metales no férreos, en especial la fundición de aluminio y la fundición inyectada, tienen un alto nivel de empleo. Las fundiciones de latón, tanto las autónomas como las que destinan su producción a la industria de los equipos de fontanería, son un sector en recesión, aunque siguen teniendo importancia en lo que respecta a la higiene industrial. Desde hace algunos años se utilizan en los productos de fundición titanio, cromo, níquel y magnesio, e incluso metales más tóxicos aún, como berilio, cadmio y torio.

Aunque puede considerarse que la industria de la fundición de metales parte de la refusión de material sólido en forma de

lingotes metálicos o arrabio, las grandes factorías de la industria del hierro y el acero, o siderurgia, pueden estar tan integradas que la división resulte menos evidente. Por ejemplo, el horno de cuba comercial puede convertir toda su producción en arrabio, pero en las plantas integradas parte del hierro puede utilizarse para producir piezas de fundición, interviniendo así en el proceso de fundición, y el hierro del horno de cuba puede utilizarse en estado de fusión para convertirlo en acero en otras unidades, donde puede ocurrir lo mismo. Existe de hecho una sección aparte del sector del acero denominada por este motivo *moldeo en lingotes*. En la fundición de hierro normal, la refusión del arrabio es también un proceso de afino. En las fundiciones de metales no férreos el proceso de fusión puede requerir la adición de metales y otras sustancias, constituyendo así un proceso de aleación.

En el sector de la fundición de hierro predominan los moldes hechos de arena de sílice compactada con arcilla. Los machos, que tradicionalmente se hacían cociendo arena de sílice aglutinada con aceites vegetales o azúcares naturales, se han sustituido en gran parte por otros de distinta composición. La moderna tecnología de la fundición ha desarrollado nuevas técnicas de producción de moldes y machos.

En general, los riesgos para la salud y seguridad en las fundiciones pueden clasificarse por tipo de colada, proceso de moldeo, tamaño de colada y grado de mecanización.

#### Resumen de procesos

Partiendo de los planos del diseñador, se construye un modelo que se ajusta a la forma externa de la pieza de fundición acabada. De igual manera, se hace una caja de machos que producirá los machos adecuados para determinar la configuración interna del producto final. La colada sobre arena es el método más utilizado, pero existen otras técnicas como la fundición en moldes permanentes utilizando moldes de hierro o acero, la fundición inyectada, en la que el metal fundido, con frecuencia una aleación ligera, se introduce en un molde de metal a presiones de 70 a 7.000 kgf/cm<sup>2</sup>, y la fundición a la cera perdida, donde se hace un modelo de cera de cada pieza que va a fabricarse y se cubre con un material refractario que formará el molde donde se vierta el metal. En el llamado proceso "a la espuma perdida" se utilizan modelos de espuma de poliestireno en arena para hacer piezas de fundición de aluminio.

Los metales o aleaciones se funden y preparan en uno de los distintos tipos de horno existentes: de cubilote, giratorio, de reverbero, de crisol, de arco eléctrico, de túnel o de inducción sin núcleo (véase la Tabla 82.5). Una vez efectuados los análisis químicos o metalúrgicos pertinentes para comprobar la calidad del metal fundido, éste se vierte en el molde ensamblado, bien sea utilizando una cuchara o bien directamente. Cuando el metal se ha enfriado, el molde, y el material del macho se retiran (desmoldeo por vibración, vaciado o expulsión) y la pieza se limpia y desbasta (eliminación de mazarotas, limpieza por chorro de granalla o chorro de agua y otras técnicas abrasivas). Algunas piezas de fundición requieren soldadura,

Tabla 82.5 • Tipos de hornos de fundición.

Horno	Descripción
Cubilote	Un cubilote es un un horno alto y vertical abierto por arriba, provisto de puertas con bisagras en el extremo inferior. Se carga por la parte superior con capas alternas de coque, caliza y metal, y el metal fundido se extrae por el fondo. Entre los riesgos especiales están el monóxido de carbono y el calor.
Horno de arco eléctrico	El horno se carga con lingotes, chatarra, metales de aleación y fundentes. Se establece un arco entre tres electrodos y la carga de metal, con lo que éste se funde. Una escoria con fundentes recubre la superficie del metal fundido para prevenir la oxidación, afinar el metal y proteger el techo del horno del exceso de calor. Cuando el caldo está preparado, se elevan los electrodos y se inclina el horno para verter el metal fundido en la cuchara receptora. Como riesgos especiales están los humos metálicos y el ruido.
Horno de inducción	En un horno de inducción.
Horno de crisol	El crisol, o recipiente que contiene la carga metálica se calienta con un quemador de gas o fueloil. Cuando el caldo está listo se eleva el crisol.
Horno rotativo	Horno cilíndrico rotativo, largo e inclinado, que se carga por la parte superior y se calienta por el extremo inferior.
Horno de túnel	Un tipo de horno de inducción.
Horno de reverbero	Este horno horizontal tiene un hogar en un extremo, separado de la carga de metal por un tabique bajo llamado franco, y una chimenea en el otro extremo. Se impide que el metal entre en contacto con el combustible sólido. El hogar y la carga de metal están cubiertos por un techo arqueado. En este trayecto desde el hogar a la chimenea la llama se refleja, o reverbera, hacia el metal situado debajo, fundiéndolo.

termotratamiento o pintura para que el artículo acabado cumpla las especificaciones del comprador.

Hay ciertos riesgos comunes a la mayoría de las fundiciones, independientemente del proceso específico de fundición empleado. Un ejemplo es el peligro derivado de la presencia de metal caliente. Además, existen los riesgos propios de un determinado proceso de fundición. Por ejemplo, el empleo de magnesio entraña un cierto peligro de llamaradas que no se da en otras industrias de fundición de metales. Este artículo trata principalmente de las fundiciones de hierro, ya que en ellas están representados la mayor parte de los riesgos típicos de las fundiciones.

En la fundición mecanizada o de producción se emplean los mismos métodos básicos que en la fundición de hierro convencional. Por ejemplo, cuando el moldeo se efectúa a máquina y las piezas se limpian con chorro de granalla o de agua, la máquina suele llevar incorporados dispositivos que controlan la emisión de polvo, con lo cual se reducen los riesgos derivados del polvo. No obstante, con frecuencia la arena se traslada de un lugar a otro sobre una cinta transportadora abierta, y los puntos de transferencia y los derrames de arena pueden ser fuentes de considerables cantidades de polvo en suspensión en el aire.

Debido a las altas tasas de producción, la carga de polvo en suspensión aérea puede ser incluso mayor que en la fundición convencional. Un análisis de los datos correspondientes a muestras de aire tomadas a mediados del decenio de 1970, reveló que los niveles de polvo en las grandes fundiciones de producción norteamericanas eran mayores que en las pequeñas fundiciones durante el mismo período. La instalación de campanas de extracción sobre los puntos de transferencia de las cintas transportadoras, combinada con un escrupulosa limpieza y mantenimiento, debiera ser una práctica común. El empleo de sistemas de transporte neumáticos es a veces económicamente viable y permite un transporte prácticamente libre de polvo.

### Fundiciones de hierro

Resumiendo, se supone que una fundición de hierro comprende las seis secciones siguientes:

1. fusión y colada del metal
2. fabricación de moldes
3. moldeo
4. fabricación de machos
5. desmoldeo (por vibración o expulsión)
6. limpieza de las piezas de fundición.

En muchas fundiciones, casi todos estos procesos pueden llevarse a cabo simultánea o consecutivamente en la misma zona de talleres.

En una típica fundición de producción, después de la fusión el hierro pasa por las operaciones de colada, enfriamiento, desmoldeo, limpieza y expedición de las piezas acabadas. Por su parte, el ciclo de la arena comprende las fases de mezcla, moldeo, desmoldeo y retorno a la unidad de mezcla. La arena se añade al sistema en la fabricación de machos, que comienza con arena nueva.

### Fusión y colada

Para satisfacer los requisitos de fusión y afino del metal la industria de fundición de hierro emplea principalmente el cubilote, un horno alto y vertical abierto por arriba, provisto de puertas con bisagras en el extremo inferior y revestido interiormente con material refractario. Por la parte superior se carga coque, chatarra de hierro y piedra caliza, y por unas aberturas situadas en el fondo (toberas) se inyecta aire a través de la carga. La combustión del coque caliente, funde y purifica el hierro. Los materiales de la carga se introducen por la parte superior del cubilote con ayuda de una grúa mientras el horno está en funcionamiento y deben situarse cerca, normalmente en recintos cercados o recipientes, en el patio adyacente a la maquinaria de carga. A fin de reducir al mínimo el riesgo de lesiones derivado de la caída de objetos pesados, la limpieza y una supervisión eficaz de los montones de materia prima son elementos esenciales. Para reducir la chatarra a un tamaño que resulte manejable para cargar en el horno y llenar las tolvas de carga, suelen utilizarse mazas rompedoras y grúas con grandes electroimanes. La cabina de la grúa debe estar bien protegida y los operadores convenientemente formados.

Los operarios que manipulan la materia prima deben usar guantes de cuero y botas de seguridad. Si no se presta atención al llenar la tolva, el material puede rebosar por exceso de carga, lo cual puede resultar peligroso. Si durante el proceso de carga el ruido que se produce es excesivo, el sonido del impacto metal contra metal puede reducirse colocando revestimientos de caucho amortiguadores de ruidos en los montacargas y recipientes de almacenamiento. Es necesario que la plataforma de carga esté por encima del nivel del suelo, lo cual puede entrañar un riesgo a no ser que sea horizontal y tenga la superficie

antideslizante y barandillas resistentes a su alrededor y en las aberturas del suelo.

El cubilote genera grandes cantidades de monóxido de carbono, que puede escapar por las compuertas de las bocas de carga y salir impulsado hacia atrás por las corrientes de aire. El monóxido de carbono es incoloro e inodoro, y puede alcanzar niveles tóxicos en el ambiente con gran rapidez. Los operarios que trabajan en la plataforma de carga o las pasarelas circundantes deben contar con una buena formación para reconocer los síntomas de intoxicación por monóxido de carbono. Se requiere una vigilancia continua y puntual de los niveles de exposición. Se deberá tener dispuesto un aparato respirador autónomo y un equipo de reanimación, y los operarios habrán recibido instrucciones para su manejo. Cuando se lleve a cabo una tarea de emergencia, se establecerá y será obligatorio un sistema de control de contaminación para entrada en espacios confinados. Todo el trabajo deberá realizarse bajo observación.

Normalmente hay dos o más cubilotes que funcionan alternativamente, de manera que mientras uno se repara puedan utilizarse los restantes. El período de uso se determinará en función de la experiencia sobre la duración de los revestimientos refractarios y en las recomendaciones de los ingenieros. Deberán establecerse de antemano procedimientos adecuados para la descarga del hierro y para la parada del horno si se forman puntos calientes o no funciona el sistema de refrigeración por agua. En las reparaciones de los cubilotes es necesario que haya operarios dentro del armazón del horno para reparar o renovar los revestimientos refractarios. Estas tareas se considerarán entradas en espacios confinados, por lo que deberán adoptarse precauciones adecuadas. También deberán tomarse precauciones para evitar la descarga de material por las bocas de carga durante esas operaciones. Los operarios llevarán cascos de seguridad que les protejan de la caída de objetos y, si trabajan en altura, también deberán usar arneses de seguridad.

Los trabajadores que descargan los cubilotes (es decir, transfieren el metal fundido desde la piequera del cubilote a un horno de mantenimiento o a la cuchara) deben observar rigurosas medidas de protección personal. Es esencial llevar gafas de montura ajustada y prendas de protección. Los protectores de los ojos deben ser lo bastante resistentes para soportar tanto el impacto de fragmentos a gran velocidad como las pequeñas salpicaduras de metal fundido. Deben extremarse las precauciones para evitar que los restos de escorias (residuos no deseados eliminados del caldo con ayuda de aditivos de piedra caliza) y metal entren en contacto con el agua, ya que ello puede provocar una explosión por vapor. Es labor de los descargadores y capataces asegurarse de que toda persona ajena a los trabajos en el cubilote permanezca fuera de la zona de peligro, delimitada por un radio de unos 4 m desde el canal de colada. Según las Leyes Británicas para Fundiciones de Hierro y Acero de 1953, es requisito reglamentario fijar una zona prohibida para las personas no autorizadas.

Cuando finaliza la colada, se baja la parte inferior del cubilote a fin de eliminar la escoria y otros materiales no deseados del interior del armazón para que los operarios puedan llevar a cabo el mantenimiento refractario de rutina. La bajada de la parte inferior del cubilote es una operación que requiere formación específica y entraña riesgos, por lo que requiere una supervisión cualificada. Es fundamental que haya un suelo refractario o una capa de arena seca sobre el que derramar los residuos. Si surge algún problema, como el atasco de las bocas inferiores del cubilote, se deberá proceder con gran precaución para evitar que los trabajadores se quemem con la escoria y el metal caliente.

Cuando el metal al rojo blanco es visible, pueden peligrar los ojos de los trabajadores debido a la emisión de radiaciones

ultravioleta e infrarroja; una larga exposición puede provocar cataratas.

La cuchara debe secarse antes de llenarla de metal fundido a fin de evitar explosiones por vapor. Debe fijarse un período adecuado de calentamiento con llama.

A los trabajadores de las secciones de fusión y colada de la fundición deben facilitárseles cascos, protección ocular y pantallas faciales con cristales tintados, prendas aluminizadas tales como mandiles, medias altas o polainas (que cubran el pie y la parte inferior de la pierna) y botas. El uso del equipo protector debe ser obligatorio y deben facilitarse instrucciones adecuadas sobre su uso y mantenimiento. En todas las zonas donde se manipule metal fundido se requieren normas estrictas de orden y limpieza, y de exclusión de agua, que deberán observarse con el máximo rigor.

Cuando se cuelgan grandes cucharas de las grúas o transportadores aéreos, deben emplearse dispositivos de control positivo de las cucharas para garantizar que el metal no se derrame si el operario suelta la sujeción. Los ganchos que sostienen las cucharas para metal fundido deben verificarse periódicamente para comprobar la fatiga del metal a fin de prevenir fallos.

En las fundiciones de producción, el molde ensamblado se conduce sobre un transportador mecánico hasta una estación de colada dotada de ventilación. La colada puede efectuarse desde una cuchara controlada manualmente con sistema de asistencia mecánica, una cuchara controlada desde una cabina, o puede ser una operación automática. Normalmente, la estación de colada está dotada de una campana compensadora con alimentación directa de aire. El molde lleno de metal fundido avanza a lo largo del transportador por un túnel de refrigeración con sistema de extracción de aire hasta la unidad de desmoldeo. En algunos talleres de fundición pequeños, la colada en los moldes se realiza sobre el suelo de la fundición y los moldes se dejan enfriar allí. En esta situación, la cuchara debe estar equipada con una campana extractora móvil.

La descarga y transporte del hierro fundido y la carga de los hornos eléctricos crea exposición a humos de óxido de hierro y otros humos de óxidos metálicos. La colada en el molde inflama y piroliza la materia orgánica, produciendo grandes cantidades de monóxido de carbono, humo, hidrocarburos poliaromáticos (HPA) cancerígenos y productos de pirólisis procedentes de los materiales de los machos, que pueden ser cancerígenos y también sensibilizantes respiratorios. Los moldes que contienen grandes cantidades de machos de caja fría aglutinados con poliuretano desprenden un humo denso e irritante que contiene isocianatos y aminas. El medio primario de control de riesgos durante el enfriamiento en el molde es una estación de colada con ventilación por extracción local y túnel de refrigeración.

En las fundiciones con ventiladores de techo para la extracción durante las operaciones de colada, pueden darse grandes concentraciones de humos metálicos en las zonas superiores, donde están situadas las cabinas de las grúas. Si hay operador en ellas, las cabinas deberán estar confinadas y contar con aire filtrado y acondicionado.

### **Fabricación de modelos**

La fabricación de modelos es una operación muy especializada que implica trasladar los planos de diseño bidimensionales a un objeto tridimensional. Los modelos de madera tradicionales se fabrican en talleres estándar que cuentan con herramientas manuales y maquinaria eléctrica de corte y cepillado. Esta actividad exige adoptar todas las medidas razonablemente posibles para reducir el ruido al mínimo, y facilitar a los operarios protectores de oídos adecuados. Es importante que los trabajadores conozcan las ventajas que supone utilizar tal protección.

Las máquinas eléctricas de corte y acabado de la madera son fuentes evidentes de peligro, y por lo general no es posible dotarles de defensas adecuadas sin impedir el funcionamiento de la máquina. Los operarios deberán estar versados en los procedimientos de trabajo normales y conocer los riesgos inherentes a este tipo de trabajo.

El aserrado de madera puede crear exposición al polvo, por lo que deben instalarse sistemas de ventilación eficaces que eliminen el polvo de madera del ambiente del taller de modelos. En algunas industrias que utilizan maderas duras, se ha observado cáncer nasal. Este riesgo no se ha estudiado en la industria de la fundición.

La colada en moldes permanentes, al igual que la fundición inyectada, ha constituido un importante avance en la industria de la fundición. En este caso, la fabricación de modelos se sustituye en gran parte por métodos de ingeniería y es, en realidad, una operación de matrizado. Desaparecen la mayoría de los riesgos que entrañan la fabricación de modelos y el uso de arena, pero son sustituidos por el riesgo inherente al empleo de algunos tipos de material refractario para revestir la matriz o el molde. En la moderna fundición de matrices cada vez se emplean más los machos de arena, persistiendo en ese caso los riesgos característicos del polvo de las fundiciones que trabajan con arena.

### **Moldeo**

El proceso de moldeo más común en la industria siderúrgica es el del molde de "arena húmeda", hecho de arena de sílice, carbón en polvo, arcilla y aglutinantes orgánicos. Otros métodos de fabricación de moldes, basados en los de confección de machos, son el termoendurecimiento, el autofraguado en frío y el endurecimiento por gas. Estos métodos y sus riesgos se tratarán en el apartado relativo a la fabricación de machos. También pueden utilizarse moldes permanentes o el proceso a la espuma perdida, principalmente en la industria de la fundición de aluminio.

En las fundiciones de producción, las operaciones de mezcla de arena, moldeo, montaje de moldes, colada y desmoldeo están integradas y mecanizadas. La arena procedente del desmoldeo es reciclada y se devuelve a la operación de mezcla de arena, donde se le añaden agua y otros aditivos y la arena se mezcla en desterradoras para mantener las propiedades físicas deseadas.

Para facilitar el ensamblaje, los modelos (y sus moldes) se hacen de dos piezas. En la fabricación manual de moldes, éstos van encerrados en unos bastidores metálicos o de madera llamados *semicajas*. La mitad inferior del modelo se coloca en la semicaja inferior (o *falsa*), y a su alrededor se vierte primero arena fina y después arena gruesa. La arena se compacta en el molde por un procedimiento de vibración-apriete, danzadora o presión. La semicaja superior (o *cúpula*) se prepara de manera análoga. En la cúpula se colocan separadores de madera para formar la mazarota y los bebederos, que son el camino por el que el metal fundido se vierte en la cavidad del molde. Se extraen los modelos, se introduce el macho y se ensamblan y fijan entre sí las dos mitades del molde, quedando de este modo listas para la colada. En las fundiciones de producción, la semicaja superior y la inferior se prepararan sobre un transportador mecánico, se colocan los machos en la semicaja inferior y se ensambla el molde por medios mecánicos.

El polvo de sílice es un problema en potencia dondequiera que se manipula arena. Normalmente, la arena de moldeo se humedece o se mezcla con resina líquida, por lo que la probabilidad de que constituya una fuente significativa de polvo respirable es menor. A veces se añade un separador, como talco por ejemplo, para facilitar la extracción del modelo del molde. El talco respirable provoca talcosis, un tipo de neumoconiosis. El uso de separadores está más difundido donde se utiliza el

moldeo manual; en cambio rara vez se ven en los procesos grandes, más automatizados. A veces la superficie del molde se rocía con productos químicos, suspendidos o disueltos en alcohol isopropílico, que después se queman para que el compuesto, por lo general un tipo de grafito, recubra el molde, a fin de conseguir una pieza fundida con un acabado superficial más fino. Esto implica un riesgo inmediato de incendio, por lo que todos los operarios que intervengan en la aplicación de estos recubrimientos deberán contar con ropa protectora piroretardante y protección para las manos, ya que los disolventes orgánicos también pueden causar dermatitis. Los recubrimientos deben aplicarse en una cabina ventilada para evitar que los vapores orgánicos se difundan en el ambiente de trabajo. Igualmente deberán observarse estrictas precauciones para garantizar que el alcohol isopropílico se guarde y utilice con seguridad. Inmediatamente antes de usarlo deberá trasvasarse a un recipiente pequeño, y los recipientes de almacenamiento grandes se mantendrán suficientemente alejados del proceso de combustión.

La fabricación manual de moldes puede requerir la manipulación de objetos grandes y engorrosos. Los propios moldes son bastante pesados, al igual que las cajas de moldeo. Con frecuencia han de elevarse, acarrear y apilarse manualmente. Son frecuentes las lesiones de espalda, por lo que se requieren medios auxiliares mecánicos para que los operarios no tengan que elevar a mano objetos demasiado pesados para ser transportados con seguridad.

Para el confinamiento de las mezcladoras, transportadores y estaciones de colada y desmoldeo existen diseños normalizados, con caudales de extracción y velocidades de captura y transporte adecuados. El empleo sistemático de tales diseños y un estricto mantenimiento preventivo de los sistemas de control, permitirá cumplir los límites de exposición al polvo internacionalmente aceptados.

### **Fabricación de machos**

Los machos introducidos en el molde determinan la configuración interna de una pieza fundida hueca como, por ejemplo, la camisa de agua de un bloque de motor. El macho debe ser lo bastante resistente para soportar el proceso de fundición pero, al mismo tiempo, no ha de ser tan fuerte como para oponer resistencia a su extracción de la pieza fundida durante la fase de vaciado.

Antes del decenio de 1960, las mezclas utilizadas para confeccionar los machos comprendían arena y aglutinantes tales como aceite de linaza, melaza o dextrina (arena petrolífera). La arena se compactaba en una caja de machos con una cavidad de la forma del macho, y después se secaba en un horno. Los hornos de machos generan productos tóxicos de pirólisis por lo que requieren un sistema de chimeneas adecuado y bien mantenido. Normalmente, las corrientes de convección del interior del horno serán suficientes para asegurar la evacuación satisfactoria de los vapores del lugar de trabajo, si bien contribuyen en gran medida a la contaminación atmosférica. Los machos de arena petrolífera acabados pueden producir aún una pequeña cantidad de humo después de haberlos extraído del horno, pero el riesgo es menor, aunque en algunos casos pequeñas cantidades de acroleína en los vapores pueden resultar muy molestas. Los machos pueden tratarse con una "capa antillama" para mejorar el acabado de la superficie de la pieza de fundición, que exige las mismas precauciones que los moldes.

El moldeo y la fabricación de machos en caja caliente o en cáscara son procesos de termoendurecimiento utilizados en las fundiciones de hierro. Se puede mezclar arena nueva con la resina de la fundición, o utilizar arena recubierta de resina, adquirida en sacos, para añadirla a la máquina de machos.



La arena con resina se inyecta en un modelo metálico (la caja de machos) y a continuación se calienta el modelo —con llama directa de gas natural en el proceso de la caja caliente o por otros medios en el caso de los machos o el moldeo en cáscara. Normalmente, en las cajas calientes se utilizan resinas termoendurecibles de urea— formol o fenol-formol con alcohol furfúrico (furano), mientras que en el moldeo en cáscara se emplea una resina de urea-formol o fenol-formol. Tras un corto período de fraguado, el macho se endurece considerablemente y puede separarse de la placa del modelo con ayuda de punzones. La fabricación de machos en caja caliente y en cáscara produce considerable exposición al formol, probablemente cancerígeno, y a otros contaminantes, dependiendo del sistema. Las medidas de control del formol comprenden el suministro directo de aire en la estación del operador; extracción local en la caja de machos, confinamiento y extracción local en la estación de almacenamiento de machos y resinas con bajo nivel de emisión de formol. Es difícil conseguir un control satisfactorio. Los operarios que trabajan en la fabricación de machos deben recibir vigilancia médica en cuanto a afecciones respiratorias. Se evitará el contacto de la piel y los ojos de fenol-formol y urea-formol, ya que las resinas son irritantes o sensibilizantes y pueden causar dermatitis. Los lavados con agua abundante ayudarán a evitar el problema.

Los sistemas de endurecimiento en frío (sin cocción) actualmente utilizados comprenden: resinas de urea-formol y fenol-formol catalizadas con ácidos, con y sin alcohol furfúrico; isocianatos alquídicos y fenólicos; Fascold; silicatos autofraguados; Inoset; arena de cemento y arena fluida o moldeable. Los endurecedores de frío no requieren calentamiento externo para fraguar. Los isocianatos utilizados en los aglutinantes suelen estar basados en isocianato de difenilmetileno (MDI), el cual, si se inhala, puede actuar como un irritante o sensibilizante respiratorio y causar asma. Es aconsejable llevar guantes y gafas protectoras de montura ajustada cuando se manipulan o utilizan estos compuestos. Los isocianatos deben mantenerse cuidadosamente almacenados en recipientes sellados, en un ambiente seco y a una temperatura comprendida entre 10 y 30 °C. Los recipientes vacíos que los hayan contenido deben llenarse y mantenerse sumergidos durante 24 horas en una disolución de carbonato sódico al 5 % para neutralizar cualquier residuo químico que haya quedado en el bidón. En los procesos de moldeo con resina deben observarse estrictamente la mayoría de los principios generales de limpieza y mantenimiento, pero sobre todo deberán extremarse las precauciones al manipular los catalizadores utilizados como fraguantes. Los catalizadores para las resinas de fenol e isocianato aglutinadas con aceite son generalmente aminas aromáticas a base de compuestos de piridina, y se trata de líquidos de olor picante. Pueden provocar graves irritaciones cutáneas y lesiones renales y hepáticas, y también pueden afectar al sistema nervioso central. Estos compuestos se suministran como aditivos separados (aglutinante de tres componentes) o ya mezclados con los materiales oleosos, y durante las fases de mezcla, moldeo, colada y desmoldeo debe proveerse VEL. Para algunos otros procesos sin cocción se utilizan como catalizadores ácido fosfórico y diversos ácidos sulfónicos, que también son tóxicos, por lo que deben adoptarse precauciones adecuadas durante su transporte y empleo para evitar accidentes.

La fabricación de machos con endurecimiento por gas comprende el proceso con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)-silicato y el proceso Isocure (o "Ashland"). Desde el decenio de 1950 se han desarrollado numerosas variantes del proceso con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)-silicato. Este proceso se ha utilizado generalmente para la producción de moldes y machos de tamaño medio a grande. La arena del macho es una mezcla de silicato sódico y arena de sílice, que a menudo se modifica añadiéndole

substancias tales como melaza para que actúen como disgregantes. Una vez rellena la caja de machos, el macho se fragua haciendo pasar dióxido de carbono por la mezcla de que está compuesto. Con ello se forma carbonato sódico y gel de sílice, que actúa como aglutinante.

El silicato sódico es una sustancia alcalina y puede resultar tóxica si entra en contacto con la piel o los ojos, o se ingiere. Es aconsejable contar con una ducha de emergencia cerca de las zonas donde se manipulen grandes cantidades de silicato sódico, y siempre deben llevarse guantes. En todas las zonas de la fundición en que se utilice silicato sódico deberá haber una fuente para lavados oculares fácilmente accesible. El CO<sub>2</sub> puede suministrarse en fase sólida, líquida o gaseosa. Cuando se suministre en botellas o depósitos a presión, deberán adoptarse las máximas precauciones de mantenimiento interno, tales como almacenamiento de botellas, mantenimiento de válvulas, manipulación, etc. También el gas entraña riesgo por sí mismo, ya que puede reducir la concentración de oxígeno en el aire en espacios confinados.

El proceso Isocure se utiliza para machos y moldes. Es un sistema de fraguado por gas en el que una resina, con frecuencia fenol-formol, se mezcla con un diisocianato (MDI) y arena. Esta mezcla se inyecta en la caja de machos y después se gasifica con una amina, normalmente trietilamina o dimetil etilamina, para producir la reacción de reticulado y endurecimiento. Las aminas, que con frecuencia se venden en bidones, son líquidos muy volátiles con un fuerte olor a amoníaco. Existe auténtico peligro de incendio o explosión, por lo que deben extremarse las precauciones, especialmente cuando el material se almacena a granel. El efecto característico de estas aminas es que provocan visión de halos e inflamación de la córnea, aunque también afectan al sistema nervioso central, donde pueden producir convulsiones, parálisis y, a veces, la muerte. Si las aminas entran en contacto con los ojos o la piel, los primeros auxilios incluirán lavado con mucha agua durante quince minutos como mínimo y asistencia médica inmediata. En el proceso Isocure, la amina se aplica en forma de vapor en nitrógeno portador, eliminándose el exceso de amina mediante lavado en una torre de ácido. Las fugas de la caja de machos son la causa más importante de alta exposición, aunque también es considerable la descarga gaseosa de amina de los machos fabricados. Deberán extremarse las precauciones en todo momento al manipular este material, y ha de instalarse un equipo adecuado de ventilación por extracción para eliminar los vapores de las zonas de trabajo.

### ***Vibración, desmoldeo y vaciado***

Una vez enfriado el metal fundido, es preciso extraer del molde la pieza en bruto. Este proceso es muy ruidoso y con frecuencia los operarios quedan expuestos a bastante más de 90 dBA durante una jornada laboral de 8 horas. Si no es posible reducir el ruido, deben suministrarse protectores para los oídos. Normalmente, la masa principal del molde se separa de la pieza de fundición con una sacudida. Con frecuencia, la caja de moldeo, el molde y la pieza de fundición se dejan caer en una rejilla vibratoria para separar la arena (vibración). Esta, atraviesa entonces la rejilla y cae en una tolva o sobre un transportador, donde puede quedar expuesta a separadores magnéticos y reciclarse para ser molida, tratada y reutilizada, o simplemente se desecha. A veces, en lugar de la rejilla se utiliza un chorro de agua a presión, lo que origina menos polvo. En esta fase se extrae también el macho, en ocasiones utilizando también chorros de agua a alta presión.

La pieza de fundición se extrae y transporta a la fase siguiente de la operación de vaciado. Con frecuencia, las piezas pequeñas pueden extraerse de la caja de moldeo expulsándolas mediante un proceso de "punzonado" antes de la vibración, lo que produce menos polvo. La arena origina niveles peligrosos de

polvo de sílice, ya que al haber estado en contacto con metal fundido se encuentra muy seca. Tanto el metal como la arena están aún muy calientes. Es necesario utilizar protección ocular. Las superficies de tránsito y de trabajo deben mantenerse libres de fragmentos de metal, para evitar tropezar con ellos, y también de polvo, que al agitarse puede quedar de nuevo suspendido en el aire con el consiguiente riesgo de inhalación.

El número de estudios realizados para determinar si los nuevos aglutinantes para machos producen algún efecto adverso para la salud, en especial de los operarios que realizan la extracción de los machos, es relativamente escaso. Los furanos, alcohol furfúrico y ácido fosfórico, resinas de urea-formol y fenol-formol, silicato sódico y dióxido de carbono, endurecedores sin cocción, aceite de linaza modificado y MDI, experimentan algún tipo de descomposición térmica al ser expuestos a las temperaturas de los metales en fusión.

Aún no se ha realizado ningún estudio sobre los efectos de las partículas de sílice recubiertas de resina en el desarrollo de neumoconiosis. Se ignora si estos recubrimientos tendrán un efecto inhibitor o acelerador de las lesiones del tejido pulmonar. Se teme que los productos de la reacción del ácido fosfórico puedan liberar fosfina. Experimentos con animales y algunos estudios seleccionados han revelado que el efecto del polvo de sílice sobre el tejido pulmonar se acelera considerablemente cuando la sílice ha sido tratada con un ácido mineral. Las resinas de urea-formol y fenol-formol pueden emitir fenoles libres, aldehídos y monóxido de carbono. Los azúcares añadidos para aumentar la disgregabilidad producen considerables cantidades de monóxido de carbono. Los endurecedores sin cocción liberan isocianatos (MDI) y monóxido de carbono.

### **Desbarbado (limpieza)**

Después de la vibración y el vaciado se procede a la limpieza de la pieza de fundición, o desbarbado. Los diversos procesos utilizados al efecto reciben diferentes nombres en los distintos lugares, pero en términos generales pueden clasificarse como sigue:

- *Limpieza* comprende el raspado, desbaste o arranque, eliminación de arena de molde adherida y de arena del macho, mazarotas, bebederos, rebabas en forma de película metálica y otras materias fácilmente eliminables con herramientas de mano o herramientas neumáticas portátiles.
- *Desbarbado* comprende el desarenado y la eliminación de aristas vivas y metal superfluo, como ampollas, resaltes de bebederos, costras y otras imperfecciones, así como la limpieza manual de la pieza de fundición con cortafríos, herramientas neumáticas y cepillos metálicos. Para eliminar los bebederos, efectuar reparaciones de la pieza de fundición y realizar cortes y lavados pueden utilizarse técnicas de soldadura, tales como corte con soplete oxiacetilénico, arco eléctrico, arco y aire comprimido, lavado de polvo y torcha de plasma.

La primera de las operaciones de desbaste es la eliminación de mazarotas. Aproximadamente la mitad del metal fundido en el molde es superflua para la pieza final. El molde debe tener depósitos, cavidades, bebederos y una mazarota, para que pueda llenarse de metal a fin de obtener un objeto fundido completo. Con frecuencia, la mazarota puede eliminarse durante la fase de vaciado, pero a veces esta operación ha de realizarse como una fase aparte del desbarbado o el desbaste. La eliminación de la mazarota se efectúa a mano, normalmente golpeando la pieza de fundición con un martillo. Para reducir el ruido, los martillos de metal pueden sustituirse por otros recubiertos de goma y los transportadores revestirse con la misma goma amortiguadora de ruidos. Los fragmentos de metal caliente que se desprenden pueden constituir un peligro para los ojos, en cuyo caso debe utilizarse protección ocular. Normalmente, las mazarotas

desprendidas volverán a la zona de carga de la planta de fundición y no debe permitirse que se acumulen en la sección de eliminación de mazarotas. Después del desmazarotado (a veces antes) la mayoría de las piezas de fundición se limpian con chorro de granalla o en un tambor rotatorio para eliminar los materiales de molde no deseados y, en ocasiones, mejorar el acabado de la superficie. Los tambores rotatorios producen altos niveles de ruido. Cabe la posibilidad de que sean necesarios recintos de protección y tal vez la instalación en los mismos de un sistema de extracción localizada.

La mayoría de los métodos de limpieza de piezas empleados en las fundiciones de hierro, acero y metales no féreos son muy parecidos, pero la limpieza y desbarbado de piezas de fundición de acero entraña dificultades especiales debido a la mayor cantidad de arena fundida que tienen adherida en comparación con las de hierro y metales no féreos. La arena fundida e incrustada en la superficie de las piezas de fundición grandes puede contener cristobalita, cuya toxicidad es mayor que la del cuarzo que se encuentra en la arena virgen.

Es necesario limpiar las piezas de fundición con chorro a presión sin aire o en tambores rotatorios antes del desbarbado y esmerilado, a fin de evitar una exposición excesiva al polvo de sílice. La pieza debe quedar libre de polvo visible, aunque puede existir riesgo de exposición a sílice en el esmerilado si ésta se halla incrustada en la superficie, aparentemente limpia, de la pieza metálica. El chorro se proyecta sobre la pieza centrifugamente, sin que sea necesaria la presencia de ningún operario en el interior de la unidad. La cabina de limpieza por chorro de granalla debe contar con un sistema de extracción para evitar cualquier emisión de polvo visible. Solo pueden surgir problemas con el polvo en caso de avería o deterioro de la cabina y/o el ventilador y el colector de polvo.

Para eliminar la arena adherida puede aplicarse a la pieza un chorro de agua, agua con arena o granalla de hierro o acero a alta presión. En varios países (p. ej., el Reino Unido) está prohibida la limpieza por chorro de arena debido al riesgo de silicosis, ya que durante el proceso de abrasión las partículas de arena se vuelven cada vez más finas, con lo que la fracción respirable aumenta continuamente. El agua o la granalla se descargan con un inyector y si éste no se maneja correctamente puede entrañar riesgos para el personal. La limpieza por chorro debe realizarse siempre en un lugar aislado y cerrado. Todos los recintos de limpieza por chorro deben inspeccionarse periódicamente para asegurarse del correcto funcionamiento del sistema de extracción de polvo y la ausencia de fugas por las cuales pudiera escapar la granalla o el agua e introducirse en la fundición. Los cascos de los operarios deben estar homologados y ser objeto de un cuidadoso mantenimiento. Es aconsejable colocar un aviso en la puerta de la cabina indicando al personal que se está realizando la limpieza por chorro y se prohíbe el paso a toda persona no autorizada. En determinadas circunstancias pueden montarse en las puertas cierres de retardo conectados al motor de accionamiento del sistema de limpieza por chorro, de manera que sea imposible que se abran las puertas hasta que la operación haya finalizado.

Para alisar la pieza de fundición en bruto se utilizan diversas herramientas de esmerilado. Las muelas pueden montarse en máquinas de bancada o de pedestal, o en esmeriladoras portátiles o de bastidor pendular. Las esmeriladoras de pedestal se utilizan para piezas pequeñas que pueden manipularse fácilmente; las esmeriladoras portátiles y las muelas de disco para superficies, muelas de copa y muelas cónicas se emplean para diversos fines, como alisar las superficies internas de las piezas de fundición; las esmeriladoras de bastidor pendular se usan principalmente para piezas grandes de las que hay que eliminar gran cantidad de metal.

## Otras fundiciones

### Fundición de acero

El modelo de producción de las molderías de acero (que es distinto del de una acería básica) es similar al de la fundición de hierro; no obstante, las temperaturas del metal son mucho más elevadas. Esto significa que es fundamental protegerse los ojos con lentes coloreados; la sílice del molde se transforma por el calor en tridimita o cristobalita, dos formas de sílice cristalina particularmente peligrosas para los pulmones. A menudo la arena aparece adherida a la pieza de fundición y tiene que extraerse por medios mecánicos, produciéndose con ello un polvo peligroso; por lo tanto, es esencial instalar sistemas de extracción de polvo eficaces y protección respiratoria.

### Fundición de aleaciones ligeras

La fundición de aleaciones ligeras utiliza principalmente aleaciones de aluminio y magnesio. Estas con frecuencia contienen pequeñas cantidades de metales que, en determinadas circunstancias, pueden desprender vapores tóxicos. Cuando la aleación pueda contener dichos componentes, deberán analizarse los vapores para determinar sus elementos constituyentes.

En las fundiciones de aluminio y magnesio, la fundición se realiza habitualmente en hornos de crisol. Es aconsejable instalar sistemas de extracción alrededor de la parte superior de la cuba, para la extracción de los vapores. En los hornos de petróleo, una combustión incompleta a causa de quemadores defectuosos puede hacer que se propaguen por el aire productos tales como monóxido de carbono. Los humos del horno pueden contener hidrocarburos complejos, algunos de los cuales pueden ser cancerígenos. Durante la limpieza del horno y la chimenea existe riesgo de exposición al pentóxido de vanadio concentrado en el hollín del horno procedente de los sedimentos del petróleo.

Normalmente se utiliza espato de flúor como fundente en la fundición del aluminio y pueden desprenderse grandes cantidades de polvo de fluoruros. En algunos casos se ha utilizado cloruro de bario como fundente para aleaciones de magnesio; ésta es una sustancia muy tóxica y, por consiguiente, hay que utilizarla con sumo cuidado. Las aleaciones ligeras a veces pueden desgasarse haciendo pasar dióxido de azufre o cloro (o compuestos específicos que se descomponen y producen cloro) por el metal en fusión; para esta operación es necesario contar con un sistema de ventilación por extracción y equipo protector respiratorio. Para reducir la velocidad de enfriamiento del metal caliente en el molde, se situará en el bebedero una mezcla de sustancias (normalmente aluminio y óxido de hierro) cuya reacción es altamente exotérmica. Esta mezcla "aluminotérmica" desprende vapores densos que en la práctica se ha descubierto que son inocuos. Cuando los vapores son de color marrón puede producirse alarma debido a la sospecha de que contienen óxidos de nitrógeno, sin embargo, tal sospecha es infundada. El aluminio finamente dividido que se produce durante el desbaste de las piezas de fundición de aluminio y magnesio entraña un grave peligro de incendio, y para la captación del polvo deben emplearse métodos en fase húmeda.

La fabricación de piezas de fundición de magnesio entraña un riesgo considerable de incendio y explosión. El magnesio fundido se autoinflamará a no ser que se mantenga una barrera protectora de separación entre éste y la atmósfera; a tal efecto se utiliza mucho el azufre fundido. Los trabajadores de la fundición que aplican manualmente polvo de azufre en el crisol pueden padecer dermatitis y deben llevar guantes de material ignífugo. Puesto que el azufre en contacto con el metal arde constantemente, se desprenden considerables cantidades de dióxido de azufre. Debe instalarse un sistema de ventilación por extracción. Debe informarse a los trabajadores del peligro que entraña el

incendio de un crisol o una cuchara de magnesio fundido, ya que puede originar una densa nube de óxido de magnesio finamente dividido. Todos los trabajadores de una fundición de magnesio deben llevar prendas protectoras fabricadas con materiales ignífugos y la ropa recubierta con polvo de magnesio no debe guardarse en taquillas carentes de control de humedad, pues podría producirse una combustión espontánea. Debe eliminarse de la ropa el polvo de magnesio. En las fundiciones de magnesio se utiliza mucho talco para el recubrimiento de los moldes y debe controlarse el polvo para evitar la talcosis. En la inspección de piezas de fundición de aleaciones ligeras se emplean aceites penetrantes y polvos de pulverización para detectar grietas. Se han introducido tintes para mejorar la eficacia de estas técnicas. Se ha descubierto que determinados tintes rojos son absorbidos y se excretan en el sudor, haciendo que se manchen las prendas de vestir del personal; aunque esto resulta molesto, no se han observado efectos en la salud.

### Fundiciones de latón y bronce

Un riesgo especial de las fundiciones de latón y bronce es la emisión de vapores y polvo metálicos tóxicos por las aleaciones normales. Tanto en la fundición como en la colada y el acabado son frecuentes las exposiciones al plomo por encima de los límites de seguridad, sobre todo cuando la composición de las aleaciones tiene un alto contenido en plomo. El peligro por el plomo es particularmente elevado durante la limpieza del horno y la evacuación de las impurezas. La sobreexposición al plomo es frecuente en la fundición y la colada, y también puede producirse durante el esmerilado. Los vapores de zinc y cobre (constituyentes del bronce) son las causas más comunes de la fiebre de los vapores del metal, aunque también se ha observado esta patología en trabajadores de la fundición que utilizan magnesio, aluminio, antimonio, etc. Algunas aleaciones de gran resistencia contienen cadmio, que puede causar neumonía química por exposición aguda y lesiones renales y cáncer de pulmón por exposición crónica.

### Proceso de moldeo permanente

Un adelanto importante ha sido la fundición en moldes de metal permanentes, como en la fundición inyectada. En este caso, la fabricación de modelos es sustituida en gran parte por métodos de ingeniería, siendo en realidad una operación de estampación mediante troqueles. Con ello quedan eliminados la mayoría de los riesgos propios de la fabricación de modelos, al igual que los derivados de la arena, aunque son sustituidos por el riesgo que entraña el uso de cierto tipo de material refractario para revestir el troquel o el molde. En los modernos trabajos de fundición con troquel, se utilizan cada vez más los machos de arena, en cuyo caso siguen existiendo los riesgos derivados del polvo de la fundición con arena.

### Fundición inyectada

El aluminio es un metal de uso común en la fundición inyectada. Alunas piezas de los automóviles, tales como los adornos cromados, son normalmente de fundición inyectada de zinc cobreada, níquelada y cromada. Debe controlarse constantemente el riesgo de fiebre por vapores de zinc, al igual que la neblina de ácido crómico.

Las máquinas de fundición inyectada presentan todos los riesgos comunes a las prensas hidráulicas. Además, el trabajador puede resultar expuesto a neblinas de los aceites empleados como lubricantes de troqueles y deben protegerse de la inhalación de las mismas y el peligro de saturación de la ropa con aceite. Los líquidos hidráulicos resistentes al fuego utilizados en las prensas pueden contener compuestos organofosforosos

tóxicos, y deben extremarse las precauciones durante el mantenimiento de los sistemas hidráulicos.

### **Fundición de precisión**

En las fundiciones de precisión es importante el proceso a la cera perdida, en el que los modelos se hacen inyectando cera de moldeo en un troquel; estos modelos se recubren con un polvo refractario fino que hace las veces de material de revestimiento de moldes, y la cera se funde antes que la pieza o por la introducción del metal de la pieza en sí.

La extracción de la cera entraña un gran peligro de incendio, y su descomposición produce acroleína y otros productos peligrosos del proceso de descomposición. Las estufas utilizadas para extraer la cera deben estar convenientemente ventiladas. Se ha utilizado tricloroetileno para eliminar los últimos residuos de cera; existe el riesgo de que este disolvente pueda quedar retenido en los rincones del molde o ser absorbido por el material refractario y vaporizarse o descomponerse durante la colada. Debería abandonarse la inclusión de materiales refractarios a base de amianto en la fundición a la cera perdida, por los riesgos que entraña el amianto.

### **Problemas de salud y modelos de enfermedad**

Las fundiciones destacan de los demás procesos industriales por su mayor índice de mortalidad debido a derrames de metal fundido y explosiones, mantenimiento de cubilotes, incluido la descarga por el fondo, y riesgos por monóxido de carbono durante la renovación de revestimientos refractarios. Las fundiciones describen una mayor incidencia de lesiones por cuerpos extraños, contusiones y quemaduras, y una menor proporción de lesiones musculoesqueléticas que otras instalaciones. También registran los máximos niveles de exposición al ruido.

Un estudio de varias decenas de lesiones mortales en fundiciones reveló las siguientes causas: aplastamiento entre carros del transportador de moldes y estructuras del edificio durante el mantenimiento y la localización de averías, aplastamiento durante la limpieza de desterronadoras teleactivadas, quemaduras por metal en fusión tras el fallo de la grúa, rotura de moldes, reboso de la cuchara de transferencia, erupción de vapor en una cuchara no seca, caídas desde grúas y plataformas de trabajo, electrocución por equipos de soldadura, aplastamiento por vehículos de manutención, quemaduras durante la descarga de cubilotes por el fondo, y atmósfera con alto contenido de oxígeno y sobreexposición a monóxido de carbono durante la reparación de cubilotes.

### **Muelas**

El estallido o rotura de muelas abrasivas puede ocasionar lesiones mortales o muy graves: la mano o el antebrazo pueden quedar aprisionados y aplastados en los huecos entre la muela y el soporte de apoyo para la pieza en las esmeriladoras de pedestal. Los ojos sin protección corren peligro en todas las fases del trabajo. Los suelos en mal estado de conservación o con obstáculos pueden provocar resbalones y caídas, especialmente cuando se transportan cargas pesadas. La caída de objetos o el desprendimiento de cargas pueden producir lesiones en los pies. Los esfuerzos excesivos durante las operaciones de elevación y transporte pueden producir tirones musculares y tensiones. Los dispositivos de elevación mal mantenidos pueden fallar y provocar la caída de materiales sobre los trabajadores. Igualmente pueden sufrirse sacudidas eléctricas a causa de equipos eléctricos deficientemente mantenidos o carentes de conexión a tierra., en especial herramientas portátiles.

Todos los elementos peligrosos de la maquinaria, en particular las muelas, deben contar con defensas adecuadas,

debiendo bloquearse automáticamente la máquina si se retira la defensa durante el proceso. Se eliminarán los huecos peligrosos entre la muela y el apoyo de la pieza en las esmeriladoras de pedestal, y deberán observarse estrictamente todas las precauciones durante la conservación y mantenimiento de las muelas y al regular su velocidad (el trabajo con esmeriladoras portátiles requiere especial precaución). Se deberá exigir el estricto cumplimiento de las normas sobre el mantenimiento de todos los equipos eléctricos y su correcta puesta a tierra. Los trabajadores recibirán instrucciones acerca de las técnicas correctas de elevación y transporte, y deberán saber sujetar cargas a los ganchos de las grúas y demás dispositivos de elevación. Asimismo se facilitará el equipo de protección personal adecuado, como gafas protectoras y pantallas faciales, y protección para los pies y las piernas. Se deberá contar con los medios adecuados para la rápida prestación de primeros auxilios, incluso para lesiones leves, y de asistencia médica competente cuando sea necesario.

### **Polvo**

Entre las enfermedades de los trabajadores de las fundiciones predominan las causadas por el polvo. Con frecuencia, las exposiciones a sílice están próximas a los límites prescritos o los sobrepasan, incluso en operaciones de limpieza bien controladas en fundiciones de producción modernas y donde las piezas de fundición están libres de polvo visible. Cuando las piezas están cubiertas de polvo o las cabinas tienen fugas, se producen exposiciones que superan varias veces el límite admisible. Es probable que se produzcan sobreexposiciones cuando el polvo visible escapa a la acción de los extractores de ventilación durante el desmoldeo, la preparación de arena o la reparación de revestimientos refractarios.

La silicosis es el riesgo predominante para la salud en los talleres de desbarbado de piezas de fundición de acero; en el desbarbado de piezas de hierro es más frecuente la neumocosis mixta (Landrigan y cols. 1986). En la fundición, la incidencia aumenta en razón directa de la duración de la exposición y los niveles de polvo. Existen algunas pruebas de que las condiciones existentes en las fundiciones de acero tienen mayor probabilidad de causar silicosis que las que se dan en las fundiciones de hierro, debido a que los niveles de sílice libre presente son más altos. Los intentos de determinar un nivel de exposición por debajo del cual no se produce silicosis no han dado resultados concluyentes; el umbral es probablemente inferior a 100 microgramos/m<sup>3</sup> y quizá sea tan solo la mitad de ese nivel.

En la mayoría de los países está disminuyendo la aparición de nuevos casos de silicosis, en parte debido a los cambios tecnológicos, a la tendencia a prescindir de la arena silíceo en las fundiciones y a la preferencia por los revestimientos refractarios básicos en lugar de los de ladrillos de sílice en los hornos de fundición de acero. Una de las razones principales de ello es que la automatización ha hecho que disminuya el número de operarios que trabajan en la producción de acero y en las fundiciones. No obstante, en muchas fundiciones el nivel de exposición al polvo de sílice respirable es aún persistentemente elevado, y en los países donde los procesos son de trabajo intensivo, la silicosis sigue constituyendo un problema importante.

Hace tiempo que se han descrito casos de silicotuberculosis en trabajadores de la fundición. Donde la frecuencia de silicosis ha disminuido, ha habido un descenso paralelo del número de casos de tuberculosis notificados, aunque esta enfermedad aún no ha sido completamente erradicada. En los países donde los niveles de polvo se han mantenido altos, los procesos polvorientos son de trabajo intensivo y la frecuencia de tuberculosis entre la población general es elevada, la tuberculosis sigue siendo una

causa importante de fallecimientos entre los trabajadores de la fundición.

Muchos de los trabajadores que padecen neumoconiosis sufren también bronquitis crónica, a menudo asociada a enfisema; muchos investigadores han creído durante largo tiempo que, al menos en algunos casos, pueden haber contribuido a ello las exposiciones de origen profesional. También se han notificado casos de neumoconiosis asociada a cáncer de pulmón, neumonía lobular, bronconeumonía y trombosis coronaria en trabajadores de la fundición.

Un reciente análisis de estudios de mortalidad de los trabajadores de la fundición en los que se incluía la industria automovilística norteamericana, mostró que estos trabajadores presentaban índices más altos de muerte por cáncer de pulmón en 14 de 15 estudios. Dado que los índices altos de cáncer de pulmón se han observado en los trabajadores de la nave de limpieza, donde la principal exposición es a la sílice, es probable que se den también exposiciones mixtas.

Los estudios de sustancias cancerígenas en el entorno de la fundición se han centrado en los hidrocarburos policíclicos aromáticos que se forman en la descomposición térmica de los aditivos y aglutinantes de la arena. Se ha sugerido que metales como el cromo y el níquel, y polvos como el de sílice y amianto, también pueden ser responsables de parte del exceso de mortalidad. Las diferencias entre las sustancias químicas empleadas en la fabricación de moldes y de machos, el tipo de arena y la composición de las aleaciones de hierro y acero podrían explicar los diferentes niveles de riesgo que se dan en las distintas fundiciones (IARC 1984).

En 8 de 11 estudios se halló un aumento de mortalidad por enfermedades respiratorias no malignas. También se registraron muertes por silicosis. En los estudios clínicos se encontraron cambios radiológicos característicos de neumoconiosis, déficit de la función pulmonar característicos de obstrucción y aumento de los síntomas respiratorios entre trabajadores de fundiciones de producción modernas y "limpias". Estos hallazgos obedecían a exposiciones producidas con posterioridad al decenio de 1960 y parecen indicar que los riesgos para la salud que entrañaban las antiguas fundiciones aún no han sido eliminados.

La prevención de las enfermedades de pulmón pasa esencialmente por el control del polvo y los humos y vapores; la solución aplicable con carácter general consiste en proveer una buena ventilación general unida a una eficiente ventilación por extracción localizada. Los sistemas de bajo volumen y alta velocidad son los más adecuados para algunas operaciones, en especial las que se realizan con esmeriladoras portátiles y herramientas neumáticas.

Los cortafíos y los cinceles neumáticos utilizados para eliminar la arena adherida a las piezas de fundición producen gran cantidad de polvo finamente dividido. También la eliminación de material sobrante con cepillos metálicos giratorios o manuales produce mucho polvo, por lo que se requiere extracción localizada.

A las esmeriladoras de bancada y de bastidor pendular pueden adaptarse fácilmente medidas para controlar el polvo. El repaso de piezas pequeñas con esmeriladoras portátiles puede realizarse sobre bancos ventilados por extracción, o puede aplicarse la ventilación en la propia herramienta. También el cepillado puede llevarse a cabo sobre un banco con ventilación. El control del polvo en piezas de fundición grandes supone un problema, pero se han logrado considerables progresos con sistemas de ventilación de bajo volumen y alta velocidad. Se requiere formación y entrenamiento en su utilización para vencer los reparos de los trabajadores, que consideran estos sistemas engorrosos y se quejan de que dificultan la visión de la zona de trabajo.

La limpieza y el desbarbado de piezas de fundición muy grandes donde no es posible utilizar ventilación local, deben realizarse en una zona aislada y en un momento en que estén presentes pocos trabajadores de los que realizan otras operaciones. A cada operario deberá facilitársele un equipo de protección personal adecuado, que se limpie y repare con regularidad, junto con instrucciones sobre su correcta utilización.

Desde el decenio de 1950, se han introducido en las fundiciones diversos sistemas de resinas sintéticas para aglutinar la arena de los machos y moldes. Estos sistemas comprenden generalmente un material base y un catalizador o endurecedor que inicia la polimerización. Muchos de estos reactivos químicos son sensibilizantes (p. ej., isocianatos, alcohol furfurílico, aminas y formol) y actualmente se les relaciona con casos de asma profesional entre trabajadores de la fundición. En un estudio, 12 de 78 trabajadores expuestos a resinas Pepset (método de caja fría) tenían síntomas de asma, y de ellos, seis presentaron una marcada disminución de los caudales de aire en una prueba de provocación con diisocianato de metilo (Johnson y cols. 1985).

### **Soldadura**

La soldadura en los talleres de desbarbado expone a los trabajadores a humos metálicos, con el consiguiente riesgo de toxicidad y de fiebre por vapores de metal, que depende de la composición de los metales implicados. Para soldar piezas de fundición de hierro hay que utilizar como electrodos varillas de níquel, lo que crea exposición a humos de níquel. La torcha de plasma produce una considerable cantidad de humos metálicos, ozono, óxido de nitrógeno y radiación ultravioleta, y genera elevados niveles de ruido.

Para la soldadura de piezas de fundición pequeñas puede utilizarse un banco ventilado por extracción. Durante las operaciones de soldeo o quemado de piezas de fundición grandes es difícil controlar las exposiciones. Un método eficaz consiste en crear una estación central para estas operaciones y e instalar un sistema de extracción localizada a través de un conducto flexible situado en el punto de soldadura. Esto implica la necesidad de enseñar al trabajador a trasladar el conducto de un punto a otro. Una buena ventilación general y el uso de equipo de protección personal cuando sea necesario, ayudarán a reducir la exposición general al humo y al polvo.

### **Ruido y vibración**

Los mayores niveles de ruido en la fundición se dan normalmente en las operaciones de vaciado y limpieza, y son más altos en las fundiciones mecanizadas que en las manuales. Incluso el sistema de ventilación puede generar exposiciones próximas a los 90 dBA.

Los niveles sonoros en el desbarbado de piezas de fundición de acero pueden ser del orden de 115 a 120 dBA, mientras que en el de las piezas de fundición de hierro están entre 105 y 115 dBA. La British Steel Casting Research Association estableció que las fuentes de ruido durante el desbarbado son las siguientes:

- el escape de la herramienta de desbarbado
- el impacto del martillo o la muela en la pieza de fundición
- la resonancia de la pieza y su vibración contra el soporte
- la transmisión de vibraciones desde el soporte a las estructuras circundantes
- la reflexión directa de ruido por la campana extractora que controla el flujo de aire por el sistema de ventilación.

Las estrategias de control del ruido varían según el tamaño de la pieza, el tipo de metal, la zona de trabajo disponible, el uso de herramientas portátiles y otros factores conexos. Existen ciertas medidas básicas para reducir la exposición al ruido de los

trabajadores que realizan la operación y sus compañeros, tales como aislamiento en el tiempo y el espacio, confinamiento en recintos completamente cerrados, tabiques parciales insonorizantes, ejecución del trabajo sobre superficies fonoabsorbentes, pantallas deflectoras, paneles y campanas de material fonoabsorbente u otros materiales acústicos. Deberán observarse las directrices sobre límites seguros de exposición diaria y, como último recurso, pueden utilizarse dispositivos de protección personal.

Un banco de desbarbado desarrollado por la British Steel Casting Research Association reduce el ruido de esta operación en 4 a 5 dBA y además lleva incorporado un sistema de extracción para eliminar el polvo. Esta mejora es alentadora y permite confiar en nuevos avances que posibiliten reducciones de ruido aún mayores.

### **Síndrome de vibración de la mano y el brazo**

Las herramientas vibrantes portátiles pueden causar el fenómeno de Raynaud (síndrome de vibración de la mano y el brazo—HAVS). Este trastorno es más frecuente en desbarbadores de piezas de fundición de acero que de fundición de hierro, y entre los que utilizan herramientas rotativas. La frecuencia de vibración crítica para la aparición de este fenómeno está entre 2.000 y 3.000 revoluciones por minuto y en el intervalo de 40 a 125 Hz.

Actualmente, se cree que el HAVS tiene diversos efectos en varios otros tejidos del antebrazo aparte de los nervios periféricos y vasos sanguíneos. Se asocia con el síndrome del túnel carpiano y cambios degenerativos en las articulaciones. Un reciente estudio de desbarbadores y esmeriladores de acerías reveló que eran dos veces más propensos a padecer contractura de Dupuytren que un grupo de control (Thomas y Clarke 1992).

La vibración transmitida a las manos del trabajador puede reducirse considerablemente mediante la selección de herramientas diseñadas para reducir los rangos nocivos de frecuencia y amplitud; la orientación del orificio de escape en sentido opuesto a la mano; el uso de varios guantes superpuestos o de uno aislante, y la reducción del tiempo de exposición mediante cambios en las operaciones de trabajo, herramientas y períodos de descanso.

### **Problemas oculares**

Algunos de los tipos de polvo y sustancias químicas que se encuentran en las fundiciones (p. ej., isocianatos, formol y aminor terciarias como dimetiltilamina, trietilamina, etc.) son irritantes y han causado síntomas visuales entre los trabajadores expuestos, tales como picor de ojos y lagrimeo, visión nublada o borrosa, o la llamada "visión gris azulada". Se ha recomendado la reducción ponderada en el tiempo de los niveles de exposición a menos de 3 ppm, en función de la aparición de estos efectos.

### **Otros problemas**

En operaciones de fabricación de machos en caja caliente bien controladas se dan niveles de exposición al formol iguales o superiores al límite de exposición vigente en Estados Unidos. Cuando el control de riesgos es deficiente pueden encontrarse niveles de exposición varias veces superiores al límite máximo establecido.

El amianto ha sido muy utilizado en la industria de la fundición y, hasta hace poco, se usaba con frecuencia en la ropa protectora para trabajadores expuestos al calor. Se han detectado sus efectos en estudios radiológicos de trabajadores de la fundición, tanto entre operarios de producción como de mantenimiento que han estado expuestos al amianto; en un estudio transversal se halló la afectación pleural característica en 20 de 900 trabajadores del acero (Kronenberg y cols. 1991).

### **Exploraciones periódicas**

Todos los trabajadores de la fundición deberían ser sometidos a exploraciones médicas previas a la colocación y periódicas, que incluyan un estudio de síntomas, radiografías de tórax, pruebas de la función pulmonar y audiogramas, con un seguimiento adecuado si se detectan hallazgos cuestionables o anormales. Los efectos añadidos del humo del tabaco al riesgo de problemas respiratorios entre los trabajadores de la fundición imponen la necesidad de incluir consejos acerca del abandono del tabaco en un programa de promoción sanitaria y educación sobre la salud.

### **Conclusión**

Las fundiciones han constituido una actividad industrial esencial durante siglos. A pesar de los continuos avances tecnológicos, presentan a los trabajadores un abanico de riesgos para la salud y la seguridad. Dado que siguen existiendo riesgos incluso en las plantas más modernas y dotadas de programas ejemplares de prevención y control, proteger la salud y el bienestar de los trabajadores continúa siendo un reto para la dirección y para los trabajadores y sus representantes. Un reto difícil tanto en las paradas de las instalaciones (cuando la preocupación por la salud y seguridad de los trabajadores suele quedar relegada a un segundo plano ante los imperativos económicos) como en los momentos de actividad intensa (cuando la demanda de mayor productividad puede inducir a tomar atajos potencialmente peligrosos en los procesos). La educación y la formación en el control de riesgos siguen siendo, por lo tanto, una necesidad constante.

## **FORJA Y ESTAMPACION**

*Robert M. Park*

### **Resumen de procesos**

Conformar piezas metálicas aplicando grandes fuerzas de tracción y compresión es un proceso común en la fabricación industrial. En las operaciones de estampación, el metal, casi siempre chapas, flejes o rollos de chapa, adquiere formas específicas a temperatura ambiente mediante operaciones de corte, prensado y estirado entre estampas, ejecutadas normalmente en una serie de uno o más pasos de impactos discretos. El acero laminado en frío es la materia prima en muchas operaciones de estampación destinadas a crear piezas de chapa metálica en la industria del automóvil y de los electrodomésticos, y en otros sectores. Aproximadamente el 15 % de los trabajadores de la industria automovilística trabajan en operaciones o plantas de estampación.

En la forja, se aplican fuerzas de compresión a bloques metálicos preformados (piezas en bruto), normalmente después de calentarlos a elevadas temperaturas, y también en uno o más pasos de prensado discretos. La forma de la pieza final la determina la de las cavidades de la estampa o estampas metálicas utilizadas. Con las estampas abiertas, lo mismo que en la forja con martinete, la pieza en bruto se comprime entre una estampa unida al yunque inferior y el pistón vertical. Con las estampas cerradas, al igual que en la forja en prensa la pieza en bruto se comprime entre la estampa inferior y una contraestampa superior unida al pistón.

En las forjas con martinete se utiliza un cilindro de vapor o neumático para elevar el martinete, que después se deja caer por gravedad o es accionado con vapor o aire comprimido. El número y la fuerza de los golpes del martinete son controlados manualmente por el operario. Normalmente, éste sujeta la pieza por el extremo frío mientras acciona el martinete. Hubo un tiempo en que la forja con martinete representaba alrededor de dos terceras partes de la totalidad del trabajo de forja que se

Figura 82.1 • Forja en prensa.



realizaba en Estados Unidos, pero actualmente este método es menos utilizado.

En las forjas con prensa se utiliza un cilindro mecánico o hidráulico para conformar la pieza con un solo golpe lento y controlado (véase la Figura 82.1). Por lo general, la forja con prensa se controla automáticamente. Puede realizarse en caliente o a temperatura normal (forja en frío, extrusión). Una variante de la forja convencional es la laminación, en la que se efectúan continuas aplicaciones de fuerza mientras el operario hace girar la pieza.

Antes de aplicar los golpes con el martinete o la prensa, y entre golpe y golpe, se aplican lubricantes por pulverización u otros métodos a las caras de las estampas y a las superficies de la pieza en bruto.

Las piezas de maquinaria de gran resistencia, tales como ejes, coronas dentadas, bulones y componentes de la suspensión de los vehículos son comúnmente productos de acero forjado. Los componentes de alta resistencia para aviones, como largueros de ala, discos de turbinas y trenes de aterrizaje, se forjan en aleaciones de aluminio, titanio o níquel y acero. Aproximadamente el 3 % de los operarios del sector de automoción trabajan en operaciones o plantas de forja.

### Condiciones de trabajo

En las operaciones de forja y estampación se dan muchos de los riesgos comunes en la industria pesada, como lesiones por esfuerzo repetitivo debidas a la manipulación y proceso repetidos de componentes y al accionamiento de ciertos mandos de las máquinas, tales como botones accionables con la palma de la mano. Las piezas pesadas suponen para los trabajadores riesgos de padecer problemas de espalda y de hombros, así como de trastornos musculoesqueléticos de las extremidades superiores. Los operadores de prensas en las plantas de estampación de piezas de automóviles, presentan índices de lesiones por esfuerzo repetitivo comparables a los de los operarios de las plantas de montaje que realizan trabajos de alto riesgo. En la mayoría de las operaciones de estampación y en algunas de forja (p. ej., con martinetes

neumáticos o de vapor) se producen ruido y vibraciones de alta intensidad que provocan pérdida de audición y posiblemente enfermedades cardiovasculares; estos ambientes industriales son de los más ruidosos (más de 100 dBA). Al igual que en otros sistemas de accionamiento automatizado, las cargas de energía que soportan los trabajadores pueden ser considerables, dependiendo de las piezas que se manipulen y de las cadencias de funcionamiento de las máquinas.

En la forja y estampación son frecuentes las lesiones graves como consecuencia de movimientos imprevistos de las máquinas. Tales movimientos pueden deberse a: (1) avería mecánica de sistemas de control de la máquina, tales como mecanismos de embrague en situaciones en que los trabajadores han de estar normalmente dentro del radio de acción de la máquina (un diseño de proceso inaceptable); (2) defectos de diseño o funcionamiento de la máquina que determinan intervenciones no programadas de los trabajadores, como mover piezas atascadas o desalineadas, o (3) procedimientos de mantenimiento inadecuados, de alto riesgo, ejecutados sin el debido bloqueo de la totalidad de la red implicada de la máquina, como la transferencia automatizada de piezas y las funciones de otras máquinas conectadas a la red. La mayoría de las redes de máquinas automatizadas no están configuradas para un bloqueo rápido, eficaz y efectivo o un diagnóstico de averías seguro.

Las neblinas de aceite lubricante de las máquinas producidas durante el funcionamiento normal, son otro riesgo genérico para la salud en las operaciones de forja y estampación con prensas neumáticas, ya que exponen a los trabajadores al riesgo de padecer enfermedades respiratorias, dermatológicas y digestivas.

### Problemas para la salud y la seguridad

#### Estampación

Las operaciones de estampación entrañan un alto riesgo de lesiones graves debido a la necesidad de manipular piezas con cantos vivos. Posiblemente más peligrosa aún es la manipulación de los recortes de contorneado y punzonado de piezas. Los recortes se recogen normalmente mediante canaletas y transportadores de alimentación por gravedad. La eliminación de los atascos que se producen esporádicamente es una actividad de alto riesgo.

Los riesgos químicos específicos de la estampación provienen normalmente de dos fuentes principales: los compuestos de estirado (p. ej., lubricantes de estampas) en las operaciones con prensas y las emisiones de las soldaduras al ensamblar las piezas estampadas. Los compuestos de estirado son necesarios en la mayoría de las estampaciones. El material se pulveriza o se extiende con rodillo sobre la chapa metálica y la propia estampación genera neblinas adicionales. Al igual que otros lubricantes metalúrgicos, los de embutición pueden ser aceites puros o en emulsiones (aceites solubles). Entre los componentes se incluyen fracciones de petróleo, lubricantes especiales (p. ej., derivados de ácidos grasos animales y vegetales, aceites clorados y ceras), alcanolaminas, sulfonatos de petróleo, boratos, espesantes derivados de la celulosa, anticorrosivos y biocidas. Las concentraciones atmosféricas de neblinas en operaciones de estampación pueden alcanzar los niveles de las operaciones comunes de mecanizado, aunque por término medio suelen ser inferiores (0,05 a 2,0 mg/m<sup>3</sup>). No obstante, con frecuencia se ve niebla y una película de aceite acumulada sobre las superficies del edificio, y el contacto con la piel puede ser mayor debido a la manipulación extensiva de las piezas. Las exposiciones con mayor probabilidad de riesgo son los aceites clorados (posibilidad de cáncer, enfermedad hepática, trastornos de la piel), derivados de ácidos grasos de colofonia o resina líquida oleosa (sensibilizantes), fracciones de petróleo (cánceres digestivos) y,

posiblemente, formol (de los biocidas) y nitrosoaminas (de alcalinaminas y nitrito sódico, ya sea como ingredientes de lubricantes de embutición o en recubrimientos superficiales del acero que se recibe). Se ha observado una gran incidencia de cáncer digestivo en dos plantas de estampación de piezas para automóviles. Los crecimientos microbiológicos en sistemas que aplican lubricantes de embutición pasando sobre la chapa metálica un rodillo impregnado en un depósito abierto, pueden exponer a los trabajadores a riesgos de problemas respiratorios y dermatológicos análogos a los de las operaciones de mecanizado.

La soldadura de piezas estampadas se realiza con frecuencia en plantas de estampación, por lo general sin lavado intermedio. Esto produce emisiones tales como humos metálicos y productos de pirólisis y combustión del lubricante de embutición y otros residuos de la superficie. Las operaciones de soldadura habituales (principalmente por resistencia) en las plantas de estampación generan concentraciones atmosféricas totales de partículas del orden de 0,05 a 4,0 mg/m<sup>3</sup>. El contenido metálico (en forma de humos y óxidos) suele representar menos de la mitad de esas partículas, lo que indica que hasta 2,0 mg/m<sup>3</sup> son residuos químicos mal caracterizados. El resultado es una neblina visible en muchas zonas de soldadura de las plantas de estampación. La presencia de derivados clorados y otros ingredientes orgánicos suscita graves preocupaciones en relación la composición del humo de soldadura de estos centros, y exige claramente controles de ventilación. La aplicación de otros materiales antes de la soldadura (tales como imprimación, pintura y adhesivos epóxicos), sobre algunos de los cuales se suelda acto seguido, es causa adicional de preocupación. Las soldaduras de reparación de producción, por lo general realizadas manualmente, suelen crear mayores exposiciones a estos mismos contaminantes atmosféricos. Se han observado índices excesivos de cáncer de pulmón entre soldadores de una planta de estampación de piezas para automóviles.

### Forja

Al igual que la estampación, las operaciones de forja pueden entrañar un alto riesgo de laceraciones cuando los trabajadores manipulan las piezas forjadas o recortan las rebabas o los bordes inservibles de las mismas. En la forja de alto impacto pueden proyectarse fragmentos, cascarilla de óxido o herramientas, y causar lesiones. En algunas operaciones de forja el trabajador sujeta la pieza con unas tenazas durante el prensado o el impacto, lo que incrementa el riesgo de lesiones musculoesqueléticas. En la forja, a diferencia de la estampación, los hornos donde se calientan las piezas (para la forja y el recocido) así como los recipientes de enfriamiento de piezas forjadas calientes suelen estar cerca del lugar de trabajo, lo que crea un elevado riesgo de estrés por calor. Otros factores que contribuyen al estrés por calor son la carga metabólica del trabajador durante el trasiego manual de materiales y, en algunos casos, el calor de los productos de la combustión de los lubricantes de estampas a base de aceite.

La lubricación es necesaria en la mayoría de las operaciones de forja y presenta la particularidad de que el lubricante entra en contacto con piezas que se encuentran a elevada temperatura. Ello provoca su inmediata pirólisis y aerosolización, no solo en las estampas sino también posteriormente, mientras las piezas humeantes se encuentran en los recipientes de enfriamiento. Los lubricantes de estampas de forja pueden contener, entre otros ingredientes, lodos de grafito, espesantes poliméricos, emulsificantes de sulfonatos, fracciones de petróleo, nitrato sódico, nitrito sódico, carbonato sódico, silicato sódico, aceites de silicón y biocidas. Estos lubricantes se aplican por pulverización o, en algunos casos, con una escobilla. Los hornos que se utilizan para calentar el metal a forjar suelen estar alimentados con fuel-oil o gas, o son hornos de inducción. Pueden producirse

emisiones en los hornos caldeados con fuel-oil si el tiro es insuficiente y en los hornos de inducción no ventilados cuando la superficie del metal está contaminada, por ejemplo, con aceite o anticorrosivos, o se ha lubricado antes de la forja para su corte con cizalla o con sierra (como cuando se trata de barras). En Estados Unidos, el nivel total de concentración atmosférica de partículas en las operaciones de forja, suele estar comprendido entre 0,1 y 5,0 mg/m<sup>3</sup> y varía ampliamente a lo largo de las operaciones debido a las corrientes de termoconvección. Se ha observado un elevado índice de cáncer de pulmón entre los trabajadores que realizan operaciones de forja y termotratamiento en dos plantas de fabricación de rodamientos de bolas.

### Medidas de salud y seguridad

Son pocos los estudios que han evaluado los efectos reales de las exposiciones que se producen en las operaciones de estampación y forja sobre la salud de los trabajadores expuestos. No se ha realizado una caracterización exhaustiva de la toxicidad potencial de la mayoría de las operaciones comunes, con la correspondiente identificación y medición de los principales agentes tóxicos. Hasta hace poco no había sido posible evaluar los efectos de larga duración de la tecnología de lubricación de estampas desarrollada en los decenios de 1960 y 1970 sobre la salud de los trabajadores. En consecuencia, estas exposiciones están reguladas por normas genéricas sobre concentración de polvo o total de partículas en suspensión, como la que establece el límite de 5,0 mg/m<sup>3</sup> en Estados Unidos. Aunque es probable que esta norma resulte adecuada en algunas circunstancias, no está demostrado que lo sea en muchas de las operaciones de forja y estampación.

Con un control cuidadoso del procedimiento de aplicación del lubricante en la estampación y forja, es posible reducir en cierta medida las concentraciones de las neblinas de lubricante. La aplicación con rodillo, cuando es viable, es el método más conveniente en la estampación, y si hay que optar por la pulverización resulta beneficioso utilizar la mínima presión de aire posible. Debe investigarse la posibilidad de eliminar los principales ingredientes peligrosos. Los recintos con presión negativa y los colectores de neblina pueden resultar muy eficaces, pero pueden ser incompatibles con la manipulación de las piezas. La filtración del aire descargado de los sistemas neumáticos de alta presión de las prensas reduce la neblina de aceite (y el ruido). El contacto con la piel en las operaciones de estampación puede reducirse mediante la automatización del proceso y el uso de prendas de protección personal adecuadas, que eviten las laceraciones y la saturación de líquido. En cuanto a la soldadura en la planta de estampación, es muy conveniente lavar las piezas antes de soldar, y los cerramientos parciales con ventilación por extracción reducen considerablemente los niveles de humo.

Entre los controles para disminuir el estrés por calor en la estampación y la forja en caliente están reducir al mínimo el trasiego manual de materiales en zonas a elevada temperatura, apantallar los hornos para reducir la radiación de calor; limitar la altura de las bocas y rendijas de descarga de los hornos y utilizar ventiladores de refrigeración. La ubicación de estos ventiladores deberá estar prevista en el diseño de la circulación del aire a fin de controlar las exposiciones a neblinas y el estrés por calor; de otro modo podría ocurrir que la refrigeración se obtuviera a costa de mayores exposiciones.

Mecanizando la manutención de materiales, sustituyendo en la medida de lo posible la forja con martinete por la forja en prensa y ajustando el ritmo de trabajo a niveles ergonómicos, se puede reducir el número de lesiones musculoesqueléticas.

Los niveles de ruido pueden reducirse mediante la combinación de una serie de medidas, tales como la conversión de la forja con martinete a forja en prensa en la medida de lo posible,



el empleo de recintos bien diseñados y la insonorización de los ventiladores de los hornos, embragues neumáticos, conductos de aire y manutención de piezas. Debería implantarse un programa de conservación auditiva.

El equipo de protección personal necesario comprende elementos de protección de la cabeza y los pies, gafas de montura ajustada, protectores de oídos (en las zonas con niveles de ruido excesivos), mandiles y polainas resistentes al calor y al aceite (en caso de empleo abundante de lubricantes de estampas a base de aceite) y protección de ojos y cara contra la radiación infrarroja (alrededor de los hornos).

### Riesgos ambientales para la salud

Los riesgos ambientales derivados de las plantas de estampación son relativamente pequeños en comparación con los de algunos otros tipos de plantas, y comprenden la evacuación de residuos de lubricante de embutición y disoluciones de lavado, y la extracción de humo de soldadura sin la debida limpieza previa. En el pasado, algunas plantas de forja han provocado una grave degradación local de la calidad del aire a causa del humo de forja y del polvo de cascarilla. Sin embargo, esto no tiene por qué ocurrir si se cuenta con un sistema de limpieza del aire de suficiente capacidad. Otro posible riesgo proviene de la eliminación de la chatarra de estampación y de la cascarilla de forja que contienen lubricantes de estampas.

## ● SOLDADURA Y CORTE TERMICO

*Philip A. Platcow y G.S. Lyndon\**

### Resumen de procesos

*Soldadura* es un término genérico por el que se designa la unión de piezas de metal por sus caras de junta haciendo que éstas se vuelvan plásticas o líquidas mediante la aplicación de calor o presión, o ambas cosas. Las tres fuentes de calor directo comúnmente empleadas son:

1. llama producida por la combustión de un gas con aire u oxígeno
2. arco eléctrico, establecido entre un electrodo y una pieza o entre dos electrodos
3. resistencia eléctrica opuesta al paso de una corriente entre dos o más piezas.

A continuación se describen otras fuentes de calor utilizadas en soldadura (véase la Tabla 82.6).

En la *soldadura y corte con gas*, se suministra oxígeno o aire y un gas combustible a un soplete (torcha), donde se mezclan antes de la combustión en la tobera. Normalmente, el soplete se sostiene en la mano (véase la Figura 82.2). El calor funde las caras metálicas de las piezas, con lo que éstas se mezclan y quedan unidas. Normalmente se añade un metal o aleación de aportación. La aleación suele tener un punto de fusión más bajo que las piezas a unir; en ese caso, por lo general las piezas no se calientan hasta la temperatura de fusión (soldadura fuerte, soldadura blanda). Pueden utilizarse fundentes químicos para prevenir la oxidación y facilitar la unión de las piezas.

En la soldadura al arco, éste se establece entre un electrodo y las piezas a soldar. El electrodo puede conectarse a una fuente de corriente alterna (CA) o de corriente continua (CC). La temperatura de esta operación es de unos 4.000°C cuando las piezas se funden y unen. Normalmente es necesario añadir

\* Este artículo es una revisión del artículo "Soldadura y corte térmico", por G.S. Lyndon, de la 3ª edición de la *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

Figura 82.2 • Soldadura y corte con gas con soplete y varilla de metal de aportación. El soldador está protegido por un mandil de cuero, manoplas y gafas de seguridad.



metal fundido a la unión ya sea fundiendo el propio electrodo (procesos con electrodo consumible) o fundiendo por separado una varilla de metal de aportación que no conduce corriente (procesos con electrodo no consumible).

La mayor parte de la soldadura al arco convencional se realiza manualmente por medio de un electrodo consumible revestido, sujeto en un portaelectrodo que el soldador sostiene en la mano. También se utilizan otros muchos procesos de soldadura eléctrica semiautomáticos y automáticos, tales como la soldadura por resistencia o la soldadura con electrodo continuo.

Durante el proceso, la zona de la soldadura debe estar protegida de la atmósfera circundante para prevenir la oxidación y la contaminación. Hay dos tipos de protección: los revestimientos de fundente y la pantalla de gas inerte. En la *soldadura al arco con electrodo revestido de fundente*, el electrodo consumible consta de un núcleo metálico rodeado de un revestimiento de material fundente, que suele estar constituido por una mezcla compleja de mineral y otros componentes. A medida que avanza la soldadura, el fundente se va fundiendo, recubriendo de este modo el baño de metal en fusión con escoria y envolviendo la zona de la soldadura en una atmósfera de gases protectores (por ej., dióxido de carbono) generados por el fundente caliente. Una vez terminada la soldadura es preciso eliminar la escoria, lo que normalmente se hace mediante picado.

En la *soldadura al arco bajo gas protector*, una pantalla de gas inerte impide el contacto con la atmósfera y previene la oxidación y la contaminación durante el proceso de soldadura. Los gases inertes normalmente utilizados con este propósito son el argón, helio, nitrógeno o dióxido de carbono.

Tabla 82.6 • Descripción y riesgos de los procesos de soldadura.

Proceso de soldadura	Descripción	Riesgos
<b>Soldadura y corte con gas</b>		
Soldadura con fusión	El soplete funde la superficie del metal y la varilla de metal de aportación, con lo que se produce la unión de las piezas.	Humos metálicos, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ruido, quemaduras, radiación infrarroja, incendio, explosiones
Soldadura fuerte	Las dos superficies metálicas se unen sin fundir el metal base. La temperatura de fusión del metal de aportación es superior a 450 °C. El calentamiento se realiza con llama, por resistencia y por inducción.	Humos metálicos (en especial de cadmio), fluoruros, incendio, explosión, quemaduras
Soldadura blanda	Similar a la soldadura fuerte, excepto porque la temperatura de fusión del metal de aportación es inferior a 450 °C. El calentamiento se realiza también con soldador.	Fundentes, humos de plomo, quemaduras
Oxicorte de metales y ranuración con soplete	En una de las variantes, el metal se calienta con una llama y se proyecta sobre el punto de corte un chorro de oxígeno que se desplaza a lo largo de la línea a cortar. En la ranuración con soplete se elimina una tira de la superficie metálica sin llegar a traspasar la pieza.	Humos metálicos, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ruido, quemaduras, radiación infrarroja, incendio, explosiones
Soldadura por presión a gas	Las piezas se calientan con chorros de gas mientras están sometidas a presión una contra otra, quedando así unidas por forja.	Humos metálicos, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ruido, quemaduras, radiación infrarroja, incendio, explosiones
<b>Soldadura al arco protegida por fundente</b>		
Soldadura por arco metálico protegido (SMAC); soldadura al arco con electrodo de varilla; soldadura manual por arco metálico (MMA); soldadura por arco abierto	Se practica con un electrodo consumible consistente en un alma metálica rodeada de un revestimiento fundente.	Humos metálicos, fluoruros (en especial con electrodos bajos en hidrógeno), radiación infrarroja y ultravioleta, quemaduras, riesgos eléctricos, incendio; también ruido, ozono, dióxido de nitrógeno
Soldadura por arco sumergido (SAW)	Se deposita sobre la pieza una capa de fundente granulado y se aplica un electrodo consumible de hilo metálico desnudo. El arco provoca la fusión del fundente y produce un baño protector en la zona de la soldadura.	Fluoruros, incendio, quemaduras, radiación infrarroja, riesgos eléctricos; también humos metálicos, ruido, radiación ultravioleta, ozono y dióxido de nitrógeno
<b>Soldadura por arco con protección gaseosa</b>		
Soldadura por arco metálico en atmósfera de gas inerte (MIG); soldadura por arco metálico en atmósfera gaseosa (GMAC)	El electrodo es normalmente un hilo metálico desnudo consumible de composición similar a la del metal que se suelda, y avanza continuamente a medida que se funde en el arco.	Radiación ultravioleta, humos metálicos, ozono, monóxido de carbono (con gas CO <sub>2</sub> ), dióxido de nitrógeno, incendio, quemaduras, radiación infrarroja, riesgos eléctricos, fluoruros, ruido
Soldadura con electrodo de tungsteno en atmósfera de gas inerte (TIG); soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW); soldadura por arco eléctrico en atmósfera de helio ("heliarc")	El electrodo de tungsteno no es consumible, y el metal de aportación consumible se introduce en el arco manualmente.	Radiación ultravioleta, humos metálicos, ozono, dióxido de nitrógeno, incendio, quemaduras, radiación infrarroja, riesgos eléctricos, ruido, fluoruros, monóxido de carbono
Soldadura por arco de plasma (PAW) y metalización por arco de plasma; corte por arco de tungsteno	Es similar a la soldadura TIG, excepto en que el arco y la corriente de gases inertes pasa por un pequeño orificio antes de llegar a la pieza, con lo que se crea un "plasma" de gas fuertemente ionizado que puede alcanzar temperaturas superiores a 33.400 °C. Esta técnica se utiliza también para metalización.	Humos metálicos, ozono, dióxido de nitrógeno, radiación ultravioleta e infrarroja, ruido; incendio, quemaduras, riesgos eléctricos, fluoruros, monóxido de carbono, posiblemente rayos x
Soldadura al arco con hilo tubular relleno de fundente (FCAW); soldadura por arco metálico bajo gas activo (MAG)	Se practica con un electrodo consumible con alma de fundente, a veces bajo atmósfera protectora de dióxido de carbono (MAG).	Radiación ultravioleta, humos metálicos, ozono, monóxido de carbono (con gas CO <sub>2</sub> ), dióxido de nitrógeno, incendio, quemaduras, radiación infrarroja, riesgos eléctricos, fluoruros, ruido
<b>Soldadura eléctrica por resistencia</b>		
Soldadura por resistencia (por puntos, en costura, por protuberancias o a tape)	Una corriente de alta intensidad y baja tensión circula desde los electrodos por los dos componentes a soldar. El calor generado en la interfase entre los componentes hace que éstos alcancen las temperaturas de soldadura. Durante el paso de la corriente, la presión ejercida por los electrodos produce un soldadura por forja. No se utiliza fundente ni metal de aportación.	Ozono, ruido (a veces), riesgos por maquinaria, incendio, quemaduras, riesgos eléctricos, humos metálicos

Continúa en la página siguiente.

Tabla 82. 6 • Descripción y riesgos de los procesos de soldadura.

Continuación.

Proceso de soldadura	Descripción	Riesgos
Soldadura por electroescoria	Se utiliza para soldadura vertical a tope. Las piezas se disponen verticalmente, con una pequeña separación entre ellas, y se colocan chapas o zapatas de cobre en uno o ambos lados de la unión para formar un baño. Se establece un arco bajo una capa de fundente entre uno o más electrodos de alambre en avance continuo y una chapa metálica. Se forma un baño de metal fundido, protegido por fundente o escoria en fusión, que se mantiene fundido por efecto de la resistencia al paso de la corriente entre el electrodo y las piezas. El calor generado por resistencia funde los lados de la junta y el electrodo continuo, llenado así el intersticio de la unión y produciendo la soldadura. Mientras ésta avanza, el metal y la escoria en fusión se mantienen en la posición correcta desplazando las chapas de cobre.	Quemaduras, incendio, radiación infrarroja, riesgos eléctricos, humos metálicos
Soldadura por chispa	Las dos piezas metálicas a soldar se conectan a una fuente de corriente de baja tensión y alta intensidad. Al poner en contacto los extremos de los componentes circula una elevada corriente que provoca el salto de una "chispa" y calienta los extremos de los componentes hasta las temperaturas de soldadura. Se obtiene una soldadura por forja aplicando presión.	Riesgos eléctricos, quemaduras, incendio, humos metálicos
<b>Otros procesos de soldadura</b>		
Soldadura por haz de electrones	Una pieza, colocada en una cámara de vacío, es bombardeada por un haz de electrones aplicado mediante una pistola especial a elevada tensión. La energía de los electrones se transforma en calor al chocar el haz contra la pieza, que queda soldada al fundirse el metal.	Rayos X a elevados voltajes, riesgos eléctricos, quemaduras, polvos metálicos, espacios confinados
Corte por arco de aire	Se establece un arco entre el extremo de un electrodo de carbón (sujeto en un portaelectrodos manual con su propio suministro de aire comprimido) y la pieza. El metal fundido resultante es expulsado por medio de chorros de aire comprimido.	Humos metálicos, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, incendio, quemaduras, radiación infrarroja, riesgos eléctricos
Soldadura por fricción	Técnica de soldadura puramente mecánica en la que uno de los componentes permanece estacionario mientras el otro se hace girar contra él bajo presión. El calor se genera por fricción y la rotación cesa cuando se alcanza la temperatura de forja. Entonces se aplica una presión de forja que efectúa la soldadura.	Calor, quemaduras, riesgos por maquinaria
Soldadura y perforación con laser	Los haces laser pueden utilizarse en aplicaciones industriales que requieren una precisión excepcionalmente elevada, por ejemplo montajes miniaturizados y técnicas de microsoldadura en la industria electrónica o hileras para el sector de las fibras artificiales. El haz laser funde y une las piezas.	Riesgos eléctricos, radiación laser, radiación ultravioleta, incendio, quemaduras, humos metálicos, productos de descomposición de los recubrimientos de las piezas
Soldadura de espárragos	Entre un espárrago metálico (que actúa como electrodo) sujeto en una pistola de soldar espárragos y la chapa metálica a unir, se establece un arco que eleva la temperatura de los extremos de los componentes hasta el punto de fusión. La pistola aprieta el espárrago contra la chapa y lo suelda. El espárrago está rodeado por una virola cerámica protectora.	Humos metálicos, radiación infrarroja y ultravioleta, quemaduras, riesgos eléctricos, incendio, ruido, ozono, dióxido de nitrógeno
Soldadura aluminotérmica, o por termita	Se calienta en un crisol una mezcla de polvo de aluminio y un óxido metálico (de hierro, cobre, etc.) también en polvo, con lo que se produce metal fundido y un intenso calor. Se abre el crisol y el metal fundido fluye a la cavidad a soldar (que está rodeada por un molde de arena). Esta técnica se utiliza con frecuencia para reparar piezas de fundición o de forja.	Incendio, explosión, radiación infrarroja, quemaduras

La elección de uno u otro gas depende de la naturaleza de los materiales a soldar. Los dos tipos más comunes de soldadura al arco bajo gas protector son la soldadura al arco metálico y la soldadura con electrodo de tungsteno en atmósfera de gas inerte (MIG y TIG).

*Soldadura por resistencia* consiste en utilizar la resistencia eléctrica que se opone al paso de una corriente de elevada intensidad y bajo voltaje por los componentes a soldar para generar el calor necesario para fundir el metal. El calor generado en la interfase entre los componentes hace que éstos alcancen las temperaturas de soldadura.

### Riesgos y su prevención

Toda soldadura entraña riesgos de incendio, quemaduras, calor radiante (radiación infrarroja) e inhalación de humos metálicos y otros contaminantes. Otros riesgos inherentes a procesos de soldadura específicos son los riesgos eléctricos, ruido, radiación ultravioleta, ozono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, fluoruros, botellas de gas a presión y explosiones. Para más detalles véase la Tabla 82.6.

Muchas soldaduras no se realizan en talleres donde, generalmente, pueden llevarse a cabo en condiciones controladas, sino sobre el terreno, en la construcción o reparación de grandes

estructuras y maquinarias (p. ej., estructuras de edificios, puentes y torres, barcos, locomotoras y vagones ferroviarios, maquinaria pesada, etc.). El soldador puede tener que llevar todo su equipo al lugar de trabajo, instalarlo y trabajar en espacios confinados o sobre andamiajes. La necesidad de estirarse, arrodillarse o trabajar en otras posturas forzadas e incómodas puede provocar tensión física, fatiga excesiva y lesiones musculoesqueléticas. El trabajo en tiempo caluroso y los efectos oclusivos del equipo de protección personal pueden ocasionar estrés por calor, incluso sin el calor generado por el proceso de soldadura.

### **Botellas de gas a presión**

En las instalaciones de soldadura con gas a alta presión, el oxígeno y el gas combustible (acetileno, hidrógeno, gas ciudad, propano) se suministran a la torcha desde botellas. Los gases almacenados en estas botellas están a elevada presión. Los riesgos especiales de incendio y explosión, y las precauciones necesarias para el empleo y almacenamiento seguros de los gases combustibles se tratan también en otro apartado de esta *Enciclopedia*. Deberán observarse las siguientes precauciones:

- Solo deberán montarse en las botellas manorreductores diseñados para el gas que se utiliza. Por ejemplo, un manorreductor de acetileno no deberá usarse con gas de hulla o hidrógeno (aunque puede utilizarse con propano).
- Los sopletes deben mantenerse en perfecto estado y limpiarse a intervalos periódicos. Las boquillas se limpiarán con una varilla de madera dura o un alambre de latón blando. La conexión de los sopletes a los manorreductores debe realizarse con tubos de goma especiales reforzados y colocados de manera que no corran riesgo de sufrir daños.
- Las botellas de oxígeno y acetileno deben guardarse separadas y siempre en locales ignífugos donde no haya ningún material inflamable y colocadas de manera que puedan extraerse fácilmente en caso de incendio. Deberán consultarse las normas locales de edificación y protección contra incendios.
- Se observará escrupulosamente el código de colores prescrito o recomendado para la identificación de las botellas y accesorios. Muchos países aplican, en este campo, los códigos de colores aceptados internacionalmente para el transporte de materiales peligrosos. Consideraciones relativas a la seguridad y la creciente migración internacional de trabajadores industriales, subrayan la necesidad de aplicar normas internacionales uniformes a este respecto.

### **Generadores de acetileno**

En el proceso de soldadura con gas a baja presión, el acetileno se produce normalmente en generadores mediante reacción de carburo cálcico con agua. Después del gas se canaliza por tuberías hasta el soplete de soldadura o de corte, al que también se suministra oxígeno.

Los grupos generadores estacionarios deben instalarse al aire libre o en un edificio bien ventilado, lejos de los talleres principales. La ventilación de la caseta del generador deberá ser capaz de evitar la formación de una atmósfera tóxica o explosiva. Se instalará una iluminación adecuada y los interruptores, otros mecanismos eléctricos y las lámparas estarán situados fuera del edificio o serán antideflagrantes. No se permitirá fumar ni la presencia de llamas, sopletes, equipos de soldadura o materiales inflamables en la caseta del generador o cerca de ésta si está instalado al aire libre. Muchas de estas precauciones rigen también para los generadores portátiles. Estos últimos solo se utilizarán, limpiarán y recargarán al aire libre o en un taller bien ventilado, lejos de cualquier material inflamable.

El carburo cálcico se suministra en tambores sellados, que deben almacenarse y mantenerse secos sobre una plataforma

elevada por encima del nivel del suelo. Los almacenes estarán a cubierto y si son colindantes con otro edificio la medianería deberá ser ignífuga. El local utilizado como almacén contará con una ventilación adecuada a través del tejado. Los tambores no se abrirán hasta el momento de cargar el generador, y para ello se deberá proveer y utilizar un abridor especial; los tambores nunca se abrirán con martillo y cortafíos. Es peligroso dejar los tambores de carburo cálcico expuestos a cualquier fuente de agua.

Antes de desmontar un generador, se extraerá todo el carburo cálcico y se llenará de agua el grupo. Se dejará el agua en el grupo al menos media hora para asegurarse de que no quede gas en ninguno de sus componentes. El desmontaje y servicio deberá realizarlos exclusivamente el fabricante del equipo o un técnico especializado. Cuando se recargue o limpie un generador, no deberá reutilizarse ninguna parte de la carga antigua.

Los fragmentos de carburo cálcico acuñados en el mecanismo de alimentación o adheridos a algún componente del grupo se eliminarán cuidadosamente utilizando herramientas de bronce u otra aleación adecuada, no férrea, que no produzcan chispas.

Todo el personal implicado seguirá estrictamente las instrucciones del fabricante, que deberán estar expuestas de forma claramente visible. Asimismo deberán observarse las siguientes precauciones:

- Entre el generador y cada uno de los sopletes se montará una válvula de contrapresión debidamente diseñada para prevenir cualquier retroceso de llama o reflujo de gas. Después de un retroceso de llama la válvula deberá inspeccionarse con regularidad. El nivel de agua se comprobará a diario.
- Solo se utilizarán sopletes con inyector, diseñados para funcionamiento a baja presión. Para calentamiento y corte, a veces se utiliza gas ciudad o hidrógeno a baja presión. En estos casos, deberá instalarse una válvula antirretorno entre cada soplete y la tubería de suministro.
- Puede producirse una explosión por un "retroceso de llama" producido al sumergir la punta del soplete en el baño de metal fundido o en barro, pintura u otro material que la obstruya. Deben eliminarse las partículas de escoria o metal adheridas a la punta. Esta deberá enfriarse asimismo con frecuencia.
- Se deberán consultar las normas locales de edificación e incendio.

### **Prevención de incendios y explosiones**

Al elegir el lugar donde se realizarán las operaciones de soldadura se tendrán en cuenta las paredes circundantes, suelos, objetos cercanos y material de desecho.

Deberán seguirse estos procedimientos:

- Se retirará todo el material combustible o se le protegerá debidamente con chapa metálica u otros materiales adecuados; nunca se utilizarán lonas enceradas.
- Se procurará prescindir de estructuras de madera, o se protegerán de modo análogo. Deberán evitarse los suelos de madera.
- Si hubiese aberturas o grietas en suelos y paredes, se adoptarán medidas de precaución adecuadas; el material inflamable de las dependencias contiguas o el piso situado debajo se trasladará a una posición segura. Se consultarán las normas locales de edificación e incendio.
- Siempre se deberán tener a mano extintores adecuados. Si se trata de una planta de baja presión en la que se utilice un generador de acetileno, se deberán tener preparados también cubos de arena seca; los extintores de polvo seco o dióxido de carbono son satisfactorios. Nunca deberá usarse agua.
- Puede ser necesario contar con equipos de bomberos. Se designará a una persona para que se encargue de vigilar el lugar de

trabajo durante el menos media hora después de terminado éste, a fin de atajar cualquier conato de incendio.

- Dado que pueden producirse explosiones cuando hay acetileno en el aire en cualquier proporción comprendida entre el 2 y el 80 %, se requiere una ventilación y una vigilancia adecuadas que garanticen la ausencia de fugas de gas. Para comprobar si hay fugas se utilizará exclusivamente agua jabonosa.
- El oxígeno deberá ser objeto de un control cuidadoso. Por ejemplo, nunca se liberará en el ambiente de un espacio confinado; muchos metales, prendas de vestir y otros materiales se vuelven activamente combustibles en presencia de oxígeno. En el oxicorte, el oxígeno que no se consume se libera a la atmósfera, por lo tanto, este tipo de trabajo nunca se realizará en un espacio confinado sin contar con una ventilación adecuada.
- Las aleaciones ricas en magnesio u otros metales combustibles deberán mantenerse alejadas de llamas o arcos de soldadura.
- La soldadura de recipientes puede ser extremadamente peligrosa. Si se ignora lo que contenía el recipiente, éste deberá tratarse siempre como si hubiese contenido una sustancia inflamable. Las explosiones pueden evitarse eliminando cualquier material inflamable o haciéndolo no explosivo o ininflamable.
- La mezcla de aluminio y óxido de hierro utilizada en la soldadura aluminotérmica es estable en condiciones normales. No obstante, dada la facilidad con que se inflama el polvo de aluminio y la naturaleza casi explosiva de la reacción, deberán tomarse precauciones adecuadas durante su manipulación y el almacenamiento (evitando la exposición al calor intenso y a posibles fuentes de ignición).
- Para soldar en algunas jurisdicciones se requiere un programa de permisos por escrito para trabajos en caliente. Este programa define las precauciones y procedimientos generales que han de observarse durante los trabajos de soldadura, corte, quemado, etc., y ha de incluir las operaciones específicas a realizar junto a las precauciones de seguridad que deben adoptarse. Será específico para cada planta y puede incluir un sistema de permisos que se completará con cada operación.

### **Protección contra el calor y los riesgos de quemaduras**

Pueden producirse quemaduras en los ojos y las partes expuestas del cuerpo por contacto con metal caliente y salpicaduras de partículas de metal incandescente o metal fundido. En la soldadura al arco, una chispa de alta frecuencia utilizada para encender el arco puede causar quemaduras pequeñas y profundas si se concentra en un punto de la piel. La radiación infrarroja y visible de alta intensidad emitida por una llama de soldadura con gas u oxicorte y el metal incandescente del baño de soldadura puede causar molestias al operador y a las personas situadas cerca de donde se realiza la operación. Cada una de éstas deberá estudiarse de antemano, a fin de diseñar y poner en práctica las precauciones necesarias. Se usarán gafas de montura ajustada expresamente diseñadas para la soldadura con gas y el oxicorte, a fin de protegerse los ojos del calor y de la luz irradiados por la pieza. Las cubiertas protectoras de los filtros de vidrio deberán limpiarse según se requiera y sustituirse cuando estén rayadas o dañadas. Cuando se proyecte metal fundido o partículas calientes, la ropa protectora que se lleve puesta deberá desviar las salpicaduras. El tipo y espesor de las prendas ignífugas utilizadas se elegirán en función del grado de riesgo. En las operaciones de corte y soldadura al arco, se utilizarán cubrezapatos de cuero o polainas adecuadas para evitar que caigan partículas calientes en el interior de las botas o zapatos. Para proteger las manos y antebrazos del calor, salpicaduras, escoria, etc., son suficientes unas manoplas de cuero con embocaduras de lona o de cuero. Otros tipos de prendas protectoras son los mandiles de cuero, chaquetas, manguitos, guardapiernas y protecciones para la cabeza. En la soldadura sobre la cabeza es necesario utilizar

una caperuza y una gorra protectoras. Todas las prendas de protección estarán libres de aceite o grasa y tendrán las costuras por el interior, para que no atrapen glóbulos de metal fundido. La ropa no tendrá bolsillos ni puños o bajos vueltos en los que puedan penetrar chispas, y se llevará de manera que las mangas cubran los guantes, las polainas los zapatos, etc. Se examinarán las prendas protectoras para ver si tienen costuras saltadas o agujeros por los que pueda entrar metal fundido o escoria. Los elementos pesados que queden calientes al terminar la soldadura deberán marcarse siempre con la palabra “caliente” como advertencia para otros trabajadores. En la soldadura por resistencia, el calor producido puede no ser visible y pueden producirse quemaduras por manipular conjuntos calientes. A pesar de que, si las condiciones son correctas, no tienen por qué proyectarse partículas de metal caliente o fundido desde los puntos o el cordón de soldadura, o desde la soldadura por proyección, se utilizarán pantallas ininflamables y se tomarán precauciones. Las pantallas también protegen a los transeúntes de quemaduras en los ojos. No se dejarán piezas sueltas en la garganta de la máquina, ya que podrían ser proyectadas a bastante velocidad.

### **Seguridad eléctrica**

Aunque en la soldadura al arco manual las tensiones en vacío son relativamente bajas (unos 80 V o menos), las corrientes de soldadura son elevadas, y los circuitos primarios de los transformadores presentan los riesgos habituales de los equipos que funcionan a la tensión de red. No deberá pasarse por alto, pues, el riesgo de electrocución, especialmente en espacios estrechos o posiciones inseguras.

Antes de empezar a soldar se comprobará siempre la instalación de puesta a tierra del equipo de soldadura. Los cables y conexiones deberán ser resistentes y de la capacidad adecuada. Se utilizará siempre una pinza o un terminal atornillado de puesta a tierra apropiados. Cuando se pongan a tierra dos o más máquinas de soldar conectándolas a la misma estructura, o estén utilizándose también otras herramientas portátiles eléctricas, la conexión a tierra deberá ser supervisada por alguien competente. El sitio en que se trabaje estará seco, será seguro y se hallará libre de obstáculos peligrosos. Es importante que el lugar de trabajo esté bien configurado e iluminado, así como debidamente ventilado, limpio y ordenado. Para trabajar en espacios confinados o en posiciones peligrosas, puede instalarse en el circuito de soldadura protección eléctrica adicional (dispositivos sin carga de baja tensión), asegurándose de que solo haya en el portaelectrodo una corriente de voltaje extremadamente bajo cuando no se esté soldando (véanse comentarios sobre espacios confinados a continuación). Se recomienda utilizar portaelectrodos del tipo en que los electrodos están sujetos por la presión de un muelle o la rosca de un tornillo. Las molestias a causa del calentamiento pueden reducirse mediante un aislamiento térmico eficaz en la parte del portaelectrodo que se sostiene en la mano. Las mordazas y conexiones de los portaelectrodos deberán limpiarse y apretarse periódicamente para evitar el sobrecalentamiento. Se harán las provisiones necesarias para guardar el portaelectrodo de manera segura cuando no se esté utilizando, por medio de un gancho aislado o un soporte totalmente aislado. La conexión del cable estará diseñada de manera que la flexión continuada del cable no provoque el desgaste y fallo del aislamiento. Se evitará arrastrar los cables y los tubos de plástico de alimentación de gas (procesos bajo gas protector) sobre planchas o soldaduras calientes. El conductor del electrodo no deberá entrar en contacto con la pieza o cualquier otro objeto puesto a tierra. No se utilizarán tubos de goma ni cables forrados de goma en ningún lugar próximo a la descarga de alta frecuencia, ya que el ozono corroerá la goma. Para todos los suministros desde el transformador al portaelectrodo se utilizarán

tubos de plástico y cables con cubierta de cloruro de polivinilo (PVC). Tanto los cables con forro de caucho vulcanizado como de caucho natural son satisfactorios en el lado del primario. La suciedad y el polvo metálico u otro tipo de polvo conductor pueden causar una avería en la unidad de descarga de alta frecuencia. Para evitarlo, la unidad deberá limpiarse periódicamente soplando con aire comprimido. Cuando se utilice aire comprimido durante más de unos segundos deberá usarse protección auditiva. Para la soldadura por haz de electrones, antes de cada operación deberá comprobarse la seguridad del equipo utilizado. Se instalará en los distintos armarios un sistema de enclavamientos como protección contra sacudidas eléctricas. Es necesario contar con un sistema fiable de puesta a tierra de todas las unidades y armarios de control. Las tensiones para el equipo de soldadura por plasma utilizado para cortar piezas de gran espesor, pueden ser de hasta 400 V, por lo que hay que prever el peligro consiguiente. La técnica de encendido del arco mediante un impulso de alta frecuencia expone al operario a los riesgos de una desagradable sacudida y una dolorosa y penetrante quemadura por alta frecuencia.

### **Radiación ultravioleta**

La luz brillante emitida por un arco eléctrico contiene una elevada proporción de radiación ultravioleta. La exposición, incluso momentánea, a destellos de arco, incluidos los destellos dispersos de los arcos de otros trabajadores, puede producir una dolorosa conjuntivitis denominada fotoftalmía. Si alguien resulta expuesto al destello del arco, se deberá procurar atención médica inmediata a la persona afectada. También la exposición excesiva a la radiación ultravioleta puede causar sobrecalentamiento y quemaduras en la piel (efecto de quemadura solar). Las precauciones comprenden:

- Se utilizará una pantalla o un casco provistos de un filtro del grado correcto (véase el artículo “Protección ocular y facial” en otra parte de esta *Enciclopedia*). Las pantallas planas de mano no proporcionan suficiente protección frente a la radiación reflejada en los procesos de soldadura al arco bajo gas protector y corte por arco con electrodo de carbón, por lo que deberán utilizarse cascos. Debajo del casco se llevarán gafas de montura ajustada con cristales filtrantes o gafas protectoras con pantallas laterales para evitar la exposición cuando se levanta el casco para inspeccionar el trabajo. Los cascos también deberán proteger de las salpicaduras y la escoria caliente. Los cascos y las pantallas de mano van provistos de un cristal filtrante y una cubierta protectora de vidrio en la parte exterior, que deberán inspeccionarse y limpiarse periódicamente, y sustituirse cuando estén arañados o dañados.
- La cara, la nuca y otras partes expuestas del cuerpo deberán protegerse adecuadamente, en especial cuando se trabaje cerca de otros soldadores
- Los ayudantes llevarán, como mínimo, gafas de montura ajustada apropiadas, y otro equipo de protección personal cuando el riesgo lo requiera.
- Todas las operaciones de soldadura al arco se apantallarán para proteger a otras personas que trabajen en las proximidades. Cuando se trabaje en bancos fijos o en talleres de soldadura se instalarán pantallas permanentes y, si esto no fuese posible, se utilizarán pantallas temporales. Todas las pantallas deberán ser opacas, de construcción robusta y de un material ignífugo.
- El uso de pintura negra para el interior de las cabinas de soldadura se ha convertido en una práctica generalmente aceptada, pero la pintura deberá producir un acabado mate. Se utilizará una iluminación ambiente adecuada para prevenir la fatiga visual, que es causa de dolores de cabeza y accidentes.

- Las cabinas de soldadura y pantallas portátiles se comprobarán periódicamente para asegurarse de que no presentan ningún daño a causa del cual el arco pueda afectar a otras personas que trabajen en las proximidades.

### **Riesgos químicos**

En la soldadura y el oxicorte se producen contaminantes atmosféricos, como humos y gases, procedentes de diversas fuentes:

- el metal que se suelda, el metal de la varilla de aportación o constituyentes de diversos tipos de acero, como acero al níquel o al cromo
- cualquier recubrimiento metálico del elemento que se suelda o de la varilla de metal de aportación (p. ej., zinc y cadmio procedentes del recubrimiento electrolítico, zinc del galvanizado y cobre en forma de una delgada capa de recubrimiento en electrodos continuos de aportación de acero suave)
- pintura, grasa, residuos y otros contaminantes por el estilo presentes en la superficie del elemento que se suelda (p. ej., monóxido de carbono, dióxido de carbono, humo y otros productos de descomposición irritantes)
- capa de fundente sobre la varilla de metal de aportación (p. ej., fluoruro inorgánico)
- la acción del calor o la luz ultravioleta sobre el aire circundante (p. ej., dióxido de nitrógeno, ozono) o sobre hidrocarburos clorados (p. ej., fosgeno)
- gas inerte utilizado como atmósfera protectora (p. ej., dióxido de carbono, helio, argón).

Los humos y gases se eliminarán en la fuente mediante ventilación local por extracción. Esto puede hacerse confinando parcialmente el proceso o instalando campanas que produzcan una corriente de aire de suficiente velocidad a través del lugar de soldadura para asegurar la captura de los humos.

Se prestará especial atención a la ventilación cuando se suelden metales no férreos y ciertos aceros aleados, así como a la protección frente al riesgo de formación de ozono, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno. Existen sistemas de ventilación portátiles y fijos que pueden adquirirse fácilmente. En general, el aire extraído no debe reciclarse. Solo se reciclará si no hay niveles peligrosos de ozono u otros gases tóxicos y el aire extraído se hace pasar por un filtro de alta eficacia.

En la soldadura por haz de electrones y si los materiales que se sueldan son de naturaleza tóxica (p. ej., berilio, plutonio, etc.), se tomarán precauciones para proteger al operario de cualquier nube de polvo que pueda emitirse al abrir la cámara.

Si existe riesgo para la salud a causa de humos tóxicos (p. ej., plomo) y no es posible la ventilación local por extracción —por ejemplo, en la demolición por oxicorte de estructuras recubiertas con pintura de plomo— será necesario utilizar equipo de protección respiratoria. En tales circunstancias, se usará un respirador homologado envolvente de alta eficacia que cubra toda la cara o un respirador motorizado de aire depurado y presión positiva, asimismo de alta eficacia (PAPR). Es necesario un cuidadoso mantenimiento del motor y la batería, sobre todo en el caso del respirador original de presión positiva y alta eficacia. Deberá fomentarse el empleo de respiradores de presión positiva alimentados por tubería de aire comprimido si se dispone de una fuente adecuada de aire comprimido apto para la respiración. Cuando sea necesario utilizar equipo de protección respiratoria se comprobará la seguridad del lugar de trabajo para determinar si es preciso adoptar precauciones suplementarias, teniendo en cuenta las limitaciones de visibilidad, las posibilidades de enredarse, etc., de las personas que usen dicho equipo.

Figura 82.3 • Soldadura en un espacio cerrado.



S. F. Gilman

### Fiebre por vapores de metal

Este trastorno se observa con frecuencia en trabajadores expuestos a vapores de zinc en el proceso de galvanización o estañado, en la fundición de latón, en la soldadura de metal galvanizado y en la metalización o rociado de metal, así como por exposición a otros metales, como cobre, manganeso y hierro. Se da en trabajadores nuevos y en los que se reincorporan al trabajo después de un fin de semana o unas vacaciones. Es una afección aguda que se manifiesta varias horas después de la inhalación inicial de partículas de un metal o sus óxidos. Comienza con mal sabor de boca seguido de sequedad e irritación de la mucosa respiratoria que provoca tos y en casos aislados disnea y “rigidez” torácica. Estos síntomas pueden ir acompañados de náuseas y dolor de cabeza, y unas 10 a 12 horas después de la exposición, escalofríos y fiebre, que puede ser muy alta. Estos síntomas duran varias horas y van seguidos de transpiración, somnolencia y a menudo poliuria y diarrea. No existe ningún tratamiento específico y la recuperación suele ser completa al cabo de unas 24 horas sin que queden secuelas. Puede evitarse manteniendo la exposición a los vapores metálicos perjudiciales claramente dentro de los niveles recomendados, mediante el empleo de un sistema eficaz de ventilación local por extracción.

### Espacios confinados

La entrada en espacios confinados puede entrañar el riesgo de que la atmósfera sea explosiva, tóxica, deficitaria en oxígeno o presente distintas combinaciones de estas deficiencias. Cualquier espacio confinado de este tipo deberá ser certificado por una persona responsable como seguro para entrar y realizar en él trabajos con arco o llama. Puede ser necesario un programa de entrada en espacios confinados que incluya un sistema de autorizaciones de entrada, y esta clase de programa es muy recomendable para trabajos que deban realizarse en espacios que normalmente no se han construido para estar ocupados continuamente. Como ejemplos cabe mencionar, entre otros, los pozos de registro, cámaras acorazadas, bodegas de buques, etc. La ventilación de los espacios confinados es vital ya que la soldadura con gas, además de producir contaminantes atmosféricos, consume oxígeno. Los procesos de soldadura al arco bajo gas

protector pueden reducir el contenido de oxígeno del aire (Véase la Figura 82.3).

### Ruido

El ruido es un riesgo en varios procesos de soldadura, como la soldadura con plasma, algunos tipos de máquinas de soldadura por resistencia y la soldadura con gas. En la soldadura con plasma, el chorro de plasma es expulsado a altísimas velocidades por lo que produce un ruido intenso (hasta 90 dBA), especialmente en las bandas de alta frecuencia. También el empleo de aire comprimido para eliminar el polvo por soplado produce altos niveles de ruido. Para evitar lesiones de oído deberán usarse tapones o cascos protectores e implantarse un programa de conservación de la audición que incluya pruebas de audiometría (capacidad auditiva) y formación de los trabajadores.

### Radiación ionizante

En los talleres donde se inspeccionan soldaduras radiográficamente con equipos de rayos X o rayos gamma, deberán observarse estrictamente las advertencias e instrucciones de costumbre. Los trabajadores se mantendrán a una distancia segura de tales equipos. Las fuentes radiactivas deben manipularse exclusivamente con las herramientas especiales necesarias y observando precauciones especiales.

Se cumplirán las reglas locales y gubernamentales al respecto. Véase el capítulo *Radiación, ionizante* en otra parte de esta *Enciclopedia*.

En la soldadura por haz de electrones debe proveerse un apantallamiento suficiente para evitar que los rayos X atraviesen las paredes y ventanas de la cámara. Cualquier parte de la máquina que proporcione apantallamiento contra la radiación X debería estar enclavada de manera que la máquina no pueda activarse a menos que esas partes estén en la posición de protección. Las máquinas deben comprobarse en el momento de su instalación para ver si tienen fugas de radiación X, y después periódicamente.

### Otros riesgos

Las máquinas de soldadura por resistencia tienen al menos un electrodo, que se mueve con una fuerza considerable. Si se pone en marcha una de estas máquinas teniendo un dedo o una mano entre los electrodos, se producirá un grave aplastamiento. A ser posible, deberá diseñarse un sistema de defensas adecuado para la protección del operario. Se pueden reducir al mínimo los cortes y laceraciones desbarbando primero los componentes y usando guantes o manoplas protectores.

Cuando se realicen tareas de mantenimiento o reparación de maquinaria alimentada por fuentes de energía eléctrica, mecánica o de otra clase, deberán observarse los oportunos procedimientos de bloqueo y etiquetado de advertencia.

Al eliminar la escoria de soldaduras mediante picado u otro procedimiento análogo, se deberán proteger los ojos con gafas de montura ajustada u otros medios.

## TORNOS

*Toni Retsch\**

Los tornos desempeñan un papel muy importante en los talleres de las industrias del metal, como lo demuestra claramente el hecho de que el 90 o 95 % de la viruta producida en el sector de válvulas y racores proviene de estas máquinas herramienta. Alrededor de la décima parte de los accidentes registrados en este

\* Adaptado de la 3ª edición, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

sector se deben a los tornos, lo cual representa la tercera parte de todos los accidentes en que intervienen máquinas. Según un estudio sobre la frecuencia relativa de accidentes por máquina llevado a cabo en una planta de fabricación de pequeñas piezas de precisión y de equipos eléctricos, los tornos ocupan el quinto lugar detrás de las máquinas para el trabajo de la madera, las sierras para metales, las prensas mecánicas y las taladradoras. Así pues, no hay duda sobre la necesidad de aplicar medidas de protección para los tornos.

El torneado es un proceso de mecanizado en el que se reduce el diámetro del material por medio de una herramienta provista de un filo especial. El movimiento de corte se produce haciendo girar la pieza a trabajar, y los movimientos de avance y de penetración los efectúa la herramienta. Haciendo variar estos tres movimientos básicos y eligiendo la geometría apropiada del filo de la herramienta y el material, se puede influir sobre la velocidad de arranque de material, la calidad superficial, la forma de la viruta producida y el desgaste de la herramienta.

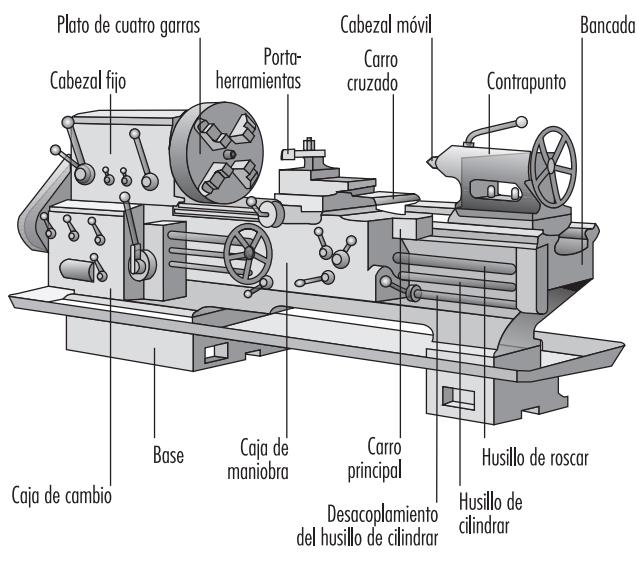
### Estructura de los tornos

Un torno típico está formado por:

- una bancada con guías mecanizadas para el carro principal y para el cabezal móvil.
- un cabezal fijo montado sobre la bancada, con el husillo principal y el plato
- una caja de cambios para el mecanismo de avance acoplada a la parte delantera de la bancada y que transmite el movimiento de avance, dependiente de la velocidad de corte, a través del husillo de roscar o del husillo de cilindrar y de la caja de maniobra hasta el carro principal.
- un carro principal (o carro de bancada) que va equipado con la guía cruzada que permite el movimiento transversal, y
- un portaherramienta montado sobre la guía cruzada (véase la Figura 82.4).

Este modelo básico de torno admite infinitas variantes, desde la máquina universal hasta el torno automático especial diseñado para un único tipo de trabajo.

Figura 82.4 • Tornos, máquinas de cortar y máquinas de roscar.



Los tipos de torno más importantes son los siguientes:

- *Torno paralelo.* Esta es la máquina de toronar de uso más frecuente. Se corresponde con el modelo básico con eje de giro horizontal. La pieza a trabajar se sujeta entre puntos con un plato frontal o con uno de garras.
- *Torno multiherramienta.* Permite emplear varias herramientas a la vez.
- *Torno de torreta, torno revólver.* Las máquinas de este tipo permiten mecanizar la pieza por medio de varias herramientas que se van aplicando sucesivamente, una tras otra. Las herramientas van sujetas en una torreta que puede girar para situarlas en posición de corte. Las torretas son generalmente de tipo o disco o de tipo corona, pero también hay tornos con torreta tipo tambor.
- *Tornos copiadores.* La forma deseada es transmitida desde una plantilla a la pieza mediante un punzón de control.
- *Torno automático.* En estas máquinas están automatizadas las distintas operaciones, incluido el cambio de pieza. Hay tornos automáticos para barra y tornos automáticos con fijación de la pieza mediante garras.
- *Torno vertical (torno taladro).* La pieza gira alrededor de un eje vertical, sujeta a una mesa giratoria horizontal. Este tipo de máquina se emplea normalmente para mecanizar grandes piezas de fundición o de forja.
- *Tornos de control numérico (NC) y tornos de control numérico asistido por ordenador (CNC).* Todas las máquinas antes mencionadas pueden equiparse con un sistema de control numérico o de control numérico asistido por ordenador. El resultado es una máquina semiautomática o totalmente automática que puede utilizarse de forma prácticamente universal gracias a la gran versatilidad y facilidad de programación del sistema de control.

El desarrollo futuro de los tornos se centrará probablemente en los sistemas de control. Los controles por contacto irán siendo sustituidos cada vez en mayor grado por sistemas de control electrónicos. Por lo que respecta a estos últimos, hay una tendencia a la evolución de los controles programados por interpolación hacia controles programados por memoria. A largo plazo, es previsible que el empleo de ordenadores de proceso cada vez más eficaces tenderá a optimizar el proceso de mecanizado.

### Accidentes

Los accidentes con los tornos obedecen normalmente a las siguientes causas:

- inobservancia de las reglas de seguridad al instalar las máquinas en los talleres (por ejemplo, insuficiente espacio entre máquinas, ausencia de un interruptor de desconexión para cada máquina)
- falta de defensas o ausencia de dispositivos auxiliares (se han dado casos de lesiones graves en operarios que trataron de frenar el husillo del torno ejerciendo presión con una mano contra poleas de transmisión carentes de defensas y en operarios que accionaron inadvertidamente palancas o pedales de embrague sin proteger; también se han producido lesiones por proyección de virutas debido a la ausencia de pantallas abatibles o deslizantes)
- mandos mal situados (por ejemplo, el contrapunto puede atravesar la mano del tornero si éste confunde el pedal que controla las garras portapiezas con el que gobierna el circuito hidráulico para el movimiento del contrapunto)
- condiciones de trabajo desfavorables (es decir, fallos desde el punto de vista de la fisiología laboral)
- falta de equipo de protección personal o uso de ropa de trabajo inadecuada (hay casos de torneros que se han provocado



lesiones graves e incluso mortales por llevar ropa holgada o el pelo largo y suelto)

- insuficiente formación del personal (un aprendiz se hirió mortalmente cuando torneaba un eje corto montado entre puntos que iba arrastrado por medio de un soporte acodado sujeto a la cabeza del husillo y por otro recto fijado al eje; el soporte atrapó su manga izquierda, la cual se enrolló en la pieza y arrastró violentamente al aprendiz contra el torno)
- mala organización del trabajo, lo cual da lugar al uso de equipos inadecuados (por ejemplo, en una ocasión se mecanizó en un torno convencional una barra que, por ser demasiado larga para este tipo de torno, sobresalía más de un metro del cabezal; además, la abertura de las garras era demasiado grande para la barra por lo que se ajustó introduciendo cuñas de madera. Cuando el husillo del torno comenzó a girar, el extremo libre de la barra se dobló a 45° y golpeó al operario en la cabeza. El hombre murió a la noche siguiente)
- elementos defectuosos en la máquina (por ejemplo, una chaveta suelta en un embrague puede provocar que empiece a girar el eje del torno mientras el operario está ajustando la pieza en el plato de garras).

### Prevención de accidentes

La prevención de los accidentes con tornos comienza en la fase de diseño. Los proyectistas deben prestar especial atención a los mandos y a los elementos de transmisión.

#### Mandos

Todos los tornos deberán estar dotados de un interruptor o seccionador eléctrico que permita efectuar de forma segura los trabajos de mantenimiento y reparación. Este interruptor deberá desconectar la corriente en todos los polos, cortar de forma fiable las conexiones neumáticas e hidráulicas y desahogar la presión de los circuitos. En las máquinas grandes el interruptor de desconexión deberá ser de un diseño tal que pueda bloquearse con un candado en la posición de circuito abierto, como medida de seguridad contra su reconexión accidental.

Los mandos de la máquina estarán dispuestos de manera que el operario pueda distinguirlos y alcanzarlos fácilmente, y que su manipulación no entrañe ningún peligro. Esto significa que los mandos no deberán colocarse nunca en lugares donde solo puedan ser alcanzados pasando la mano sobre la zona de trabajo de la máquina, o donde puedan ser golpeados por virutas proyectadas.

Los interruptores que controlan la presencia de las defensas y las enclavan con la transmisión de la máquina, deberán seleccionarse e instalarse de manera que abran positivamente el circuito tan pronto como la defensa abandone su posición de protección.

Los dispositivos de parada de emergencia deberán provocar la detención inmediata del movimiento peligroso correspondiente. Estarán diseñados y ubicados de manera que puedan ser accionados fácilmente por el trabajador que esté en peligro. Los pulsadores de parada de emergencia deberán ser fácilmente accesibles y de color rojo.

Los elementos de accionamiento de los mecanismos de control que puedan dar lugar a un movimiento peligroso en la máquina, deberán tener una protección que impida todo accionamiento involuntario. Por ejemplo, las palancas de acoplamiento de los embragues en el cabezal y en el carro de bancada deberán contar con dispositivos de enclavamiento o pantallas de seguridad. Un pulsador puede hacerse más seguro alojándolo en un hueco o rodeándolo con un collarín protector.

Los mandos manuales deben estar diseñados y ubicados de manera que el movimiento de la mano se corresponda con el movimiento que se está controlando de la máquina.

Los mandos deberán marcarse por medio de rótulos fácilmente legibles y comprensibles. Para evitar malentendidos o dificultades lingüísticas se recomienda el uso de símbolos.

#### Elementos de transmisión

Todos los elementos móviles de transmisión (correas, poleas, engranajes) deberán estar protegidos con una cubierta o defensa adecuada. Las personas encargadas de la instalación de la máquina pueden contribuir de modo considerable a la prevención de los accidentes con el torno. Los tornos deben instalarse de forma que los operarios que los atienden no se estorben ni pongan en peligro mutuamente. Los operarios no deberán estar de espaldas a los pasillos. Cuando los puestos de trabajo vecinos o las zonas de paso estén dentro del alcance de las virutas que salen despedidas, deberán instalarse pantallas protectoras.

Las zonas de paso deberán marcarse con claridad. Deberá dejarse espacio suficiente para los equipos de mantenimiento de materiales, para apilar las piezas y para los armarios de herramientas. Las guías para el material en barras no deberán sobresalir hacia las zonas de paso.

El piso sobre el que permanece el operario deberá estar aislado del frío. Habrá que tener cuidado de que el aislamiento no suponga un obstáculo con el que se pueda tropezar, y de que el revestimiento del piso no pueda volverse resbaladizo ni siquiera cuando quede cubierto por una película de aceite.

Las tuberías y conductos se instalarán de manera que no estorben. Deberán evitarse las instalaciones provisionales.

Las medidas técnicas de seguridad en el taller deberán estar dirigidas en particular hacia los puntos siguientes:

- los dispositivos de sujeción de las piezas (platos fijos, platos de garras, mandriles) deberán equilibrarse dinámicamente antes de utilizarse
- la velocidad máxima admisible de los platos de garras deberá ser marcada por el fabricante sobre el plato y deberá ser respetada por el tornero
- cuando se utilicen platos centradores con rosca plana, deberá garantizarse que no puedan salir despedidas las mordazas al poner en marcha el torno
- los platos de este tipo deberán diseñarse de forma que no pueda sacarse la llave antes de asegurar las mordazas. Normalmente, las llaves de plato deberán diseñarse de manera que sea imposible dejarlas en el plato.

Es fundamental disponer de equipos elevadores auxiliares para facilitar el montaje y desmontaje de platos y mandriles pesados. El plato deberá fijarse firmemente para evitar que se suelte del eje en caso de que se frene repentinamente el torno. Esto puede conseguirse con una tuerca de retención roscada a izquierdas sobre la cabeza del eje, empleando un acoplamiento rápido tipo "Camlock", dotando al plato de una chaveta de enclavamiento o asegurándolo con un anillo de bloqueo dividido en dos mitades.

Cuando se empleen dispositivos hidráulicos para fijación de la pieza, tales como platos de garras, mandriles y contrapuntos accionados hidráulicamente, se habrán de tomar medidas para que sea imposible introducir las manos dentro de la zona peligrosa de cierre de los dispositivos. Esto se puede conseguir limitando a 6 mm el recorrido del elemento de apriete, colocando los mandos de hombre muerto de manera que no sea posible introducir las manos en la zona peligrosa, o disponiendo una protección móvil que tenga que estar cerrada para que pueda iniciarse el movimiento de apriete.

Cuando sea peligroso poner en marcha el torno con las mordazas del plato abiertas, la máquina deberá ir equipada con un dispositivo que impida iniciar la rotación del eje antes de cerrar las mordazas. La falta de energía no deberá provocar la

apertura o el cierre de los dispositivos hidráulicos de sujeción de la pieza.

Si disminuye la fuerza de apriete del plato hidráulico, deberá detenerse el giro del eje, y deberá ser imposible ponerlo en marcha. La inversión de la dirección de apriete de dentro a fuera (o viceversa) mientras gira el eje, no deberá provocar el decalado del plato de su posición en el eje. Solo deberá ser posible desmontar los dispositivos de sujeción de su lugar en el eje cuando este último deje de girar.

Al mecanizar material en barras, la parte que sobresalga del torno deberá estar cubierta por guías adecuadas. Los contrapesos de alimentación de la barra estarán protegidos por cubiertas con bisagras que deberán llegar hasta el suelo.

#### **Platos o perros de arrastre**

Para evitar graves accidentes—en especial durante trabajos de pulido en un torno—no deberán utilizarse arrastres sin proteger. Se deberá emplear un arrastre centrador de seguridad, o en el caso de un arrastre convencional se deberá montar un collarín protector. También se pueden utilizar arrastres autoblocantes o dotar al plato de arrastre de una cubierta protectora.

#### **Zona de trabajo del torno**

Los platos de garras de los tornos universales deberán protegerse con cubiertas abisagradas. Si es posible, las cubiertas protectoras deberán ir enclavadas con los circuitos de accionamiento del eje. Los tornos verticales deberán estar protegidos con barras o placas para evitar lesiones producidas por las piezas giratorias. Deberán disponerse plataformas con barandillas para permitir al operario observar el proceso de mecanizado de forma segura. En ciertos casos pueden instalarse cámaras de televisión para que el operario pueda vigilar el filo y el proceso de corte de la herramienta.

Las zonas de trabajo de los tornos automáticos y de los tornos de control numérico y de control numérico computerizado deberán ser totalmente cerradas. Los cerramientos de las máquinas totalmente automáticas solo deberán tener aberturas para introducir el material a mecanizar, expulsar la pieza torneada y retirar la viruta de la zona de trabajo. Estas aberturas no deberán suponer un peligro al pasar por ellas la pieza terminada, y deberá ser imposible alcanzar la zona de peligro a través de ellas.

Las zonas de trabajo de los tornos semiautomáticos, de control numérico y de control numérico computerizado, deberán estar cerradas durante el proceso de mecanizado. Los cerramientos consisten normalmente en cubiertas deslizantes con interruptores fin de carrera y un circuito de enclavamiento.

Las operaciones que requieren un acceso a la zona de trabajo, tales como el cambio de la pieza o de las herramientas de corte, la medición, etc., no deberán efectuarse mientras el torno no haya parado de una forma segura. El poner a cero una transmisión de velocidad no se considera una parada segura. Las máquinas con este tipo de transmisión deberán tener unas cubiertas protectoras enclavadas que no se puedan desenclavar mientras la máquina no haya parado de una forma segura (por ejemplo, cortando la alimentación eléctrica del motor del eje).

Cuando sea necesario realizar operaciones especiales de ajuste de la herramienta, se dispondrá un mando de movimiento lento que permita ciertos movimientos de la máquina estando abierta la cubierta protectora. En tales casos, el operario podrá estar protegido mediante circuitos de diseño especial que, por ejemplo, permitan efectuar los movimientos solo de uno en uno. Esto se puede conseguir por medio de mandos que requieran utilizar ambas manos.

#### **Viruta**

Las virutas largas son peligrosas porque pueden enredarse en brazos y piernas y causar graves lesiones. Las virutas continuas y en espiral pueden evitarse eligiendo velocidades, profundidades de corte y espesores de viruta adecuados, o empleando herramientas de torneado con rompevirutas de garganta o de escalón. Para retirar la viruta deberán emplearse ganchos para viruta con mango y protector.

#### **Ergonomía**

Las máquinas deberán diseñarse de forma que permitan obtener una máxima producción con un mínimo de esfuerzo por parte del operario. Esto puede lograrse adaptando la máquina al trabajador.

Al diseñar los elementos de un torno sobre los que actúa el hombre deberán tenerse en cuenta los factores ergonómicos. Un diseño racional del puesto de trabajo incluye también la disposición de equipos auxiliares de manutención, tales como accesorios de carga y descarga.

Todos los mandos deberán estar situados dentro de la esfera fisiológica o al alcance de las dos manos. Los mandos estarán dispuestos de forma clara y su forma de accionamiento deberá regirse por la lógica. En las máquinas pensadas para operarios que trabajan de pie, deberán evitarse los mandos accionados por pedal.

La experiencia ha demostrado que es beneficioso diseñar el puesto de trabajo para las dos posiciones, de pie y sentado. Cuando el operario tenga que trabajar de pie se le deberá dar la posibilidad de cambiar de postura. En muchos casos los asientos mullidos proporcionan un gran alivio para pies y piernas cansados.

Deberán tomarse medidas para crear un confort térmico óptimo, teniendo en cuenta la temperatura del aire, la humedad relativa, el movimiento del aire y el calor radiante. El taller deberá estar adecuadamente ventilado. Para eliminar las emanaciones gaseosas deberá haber dispositivos extractores locales. Cuando se mecanicen piezas a partir de material en barras deberán usarse tubos guía revestidos de material fonoabsorbente.

El lugar de trabajo deberá disponer preferiblemente de un alumbrado de distribución uniforme y con un adecuado nivel de iluminación.

#### **Ropa de trabajo y protección personal**

Los monos deberán ser ceñidos y cerrados por botones o cremallera hasta el cuello. No deberán tener bolsillos en el pecho, y las mangas deberán ir ceñidas a las muñecas. No deberán usarse cinturones. Cuando se trabaje en un torno no deberán llevarse anillos ni pulseras. Deberá ser obligatorio usar gafas de seguridad. Cuando se mecanicen piezas pesadas deberán calzarse botas de seguridad con puntera de acero. Siempre que haya que retirar viruta se utilizarán guantes protectores.

#### **Formación**

La seguridad de los torneros depende en gran medida de sus métodos de trabajo. Es, pues, muy importante que reciban una completa formación teórica y práctica para adquirir la destreza necesaria y desarrollar una forma de actuación que les proporcione la máxima seguridad posible. La correcta postura, los movimientos correctos y la correcta selección y manejo de las herramientas deberán convertirse en una rutina hasta el punto de que el operario trabaje correctamente incluso en el caso de que disminuya temporalmente su concentración.

Entre los puntos importantes de un programa de formación están una postura erguida, el adecuado montaje y desmontaje del plato de garras y la colocación precisa y segura de las piezas

a tornear. Deberá practicarse mucho la forma correcta de sostener las limas y rasquetas y el trabajo seguro con tela esmeril.

Los trabajadores deberán estar bien informados sobre los peligros de lesión que pueden correr al hacer trabajos de medición, de comprobación de ajustes y de limpieza de los tornos.

### Mantenimiento

Los tornos deberán revisarse y lubricarse periódicamente. Las averías se corregirán de inmediato. Cuando una avería comprometa la seguridad, deberá dejarse la máquina fuera de servicio hasta que se lleve a cabo una acción correctora.

Los trabajos de reparación y mantenimiento solo deberán efectuarse después de haber desconectado la máquina de la toma de energía eléctrica.

## ● RECTIFICADO Y PULIDO

*K. Welinder\**

El rectificado, en el más amplio sentido del término, consiste en el empleo de una herramienta provista de granos abrasivos aglutinados que arrancan pequeñas partículas de la pieza que se trabaja. El objetivo es dar a la pieza una forma determinada, corregir sus dimensiones, suavizar su superficie o avivar los filos. El rectificado se utiliza, por ejemplo, para la eliminación de mazarotas y rebabas en una pieza de fundición, la eliminación de la cascarilla del metal antes de la forja o la soldadura y el desbarbado de piezas en chapisterías y talleres de mecanizado. El pulido se emplea para eliminar imperfecciones superficiales, tales como marcas dejadas por herramientas. En el bruñido no se eliminan partículas metálicas, sino que se utiliza un abrasivo fino mezclado con cera o grasa para conseguir un alto brillo superficial.

El rectificado es el más amplio y variado de todos los métodos de mecanización, y se emplea para muy diversos materiales, predominantemente el hierro y el acero, pero también para otros metales, así como madera, plástico, piedra, vidrio, alfarería, etc. El término rectificado abarca también otros métodos de producir superficies muy suaves y brillantes, tales como el pulido, bruñido, afilado y lapeado.

Las herramientas utilizadas son muelas de dimensiones variables, segmentos de rectificado, puntas de rectificado, piedras de afilar, limas, ruedas de pulir, bandas, discos, etc. En las muelas de rectificado y similares el material abrasivo se mantiene unido por medio de aglutinantes formando un cuerpo rígido, generalmente poroso. En el caso de las bandas abrasivas el aglutinante mantiene el abrasivo unido a un material base flexible. Las ruedas de bruñido están hechas con discos de algodón u otro material textil cosidos entre sí.

Los abrasivos naturales, corindón natural o esmeril (óxidos de aluminio), diamante, piedra esmeril (arenisca), pedernal y almandina (granate) han sido reemplazados en su mayor parte por abrasivos artificiales, como óxido de aluminio (alúmina fundida), carburo de silicio (carborundo) y diamantes sintéticos. Se utilizan también diversos materiales de grano fino, tales como yeso, piedra pómez, trípoli, cenizas de estaño y óxido de hierro, especialmente para pulido y bruñido.

El óxido de aluminio es ampliamente utilizado en muelas de rectificado, seguido por el carburo de silicio. Los diamantes naturales y artificiales se utilizan para importantes aplicaciones especiales. El óxido de aluminio, carburo de silicio, esmeril, granate y pedernal, se emplean en bandas de rectificado y pulido.

\* Adaptado de la 3ª edición, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

En las muelas se utilizan tanto aglutinantes orgánicos como inorgánicos. Los principales tipos de aglutinantes inorgánicos son el silicato vitrificado y la magnesita. Entre los aglutinantes orgánicos destacan la resina fenólica o de urea-formol, la goma y la laca. Los aglutinantes vitrificados y la resina fenólica dominan por completo dentro de sus respectivos grupos. Las muelas de diamante también pueden estar aglutinadas con metales. Los diversos aglutinantes dan a las ruedas diferentes propiedades rectificadoras, así como en relación con la seguridad.

Las bandas y discos abrasivos y de pulido se componen de una base flexible de papel o tela a la cual se une el abrasivo por medio de un adhesivo natural o sintético.

Se utilizan máquinas diferentes para los diversos tipos de operaciones, tales como rectificado de superficies planas, rectificado cilíndrico incluyendo el rectificado sin centros, rectificado de interiores, rectificado de desbaste y corte. Los dos tipos principales son: aquéllos en que la rectificadora o la pieza se mueven a mano y las máquinas con avance mecánico y platos de sujeción. Las máquinas más comunes son las rectificadoras de superficies planas exteriores; rectificadoras, pulidoras y bruñidoras de pedestal; esmeriladoras y pulidoras de disco; rectificadoras de interiores; tronadoras de discos abrasivos; pulidoras de banda; esmeriladoras, pulidoras y bruñidoras portátiles, y otros diversos tipos de pulidoras y bruñidoras.

### Riesgos y su prevención

#### *Rotura*

El principal riesgo de lesiones en el uso de muelas es que la muela puede romperse durante el rectificado. Normalmente las muelas giran a altas velocidades y hay una continua tendencia hacia velocidades cada vez mayores. La mayoría de las naciones industrializadas tienen reglamentaciones que limitan las velocidades máximas a que pueden girar los diversos tipos de muelas de rectificado.

La medida protectora fundamental es hacer la muela lo más resistente posible. La naturaleza del aglutinante es de la máxima importancia. Las muelas con aglutinantes orgánicos, en especial las resinas fenólicas, son más resistentes que las de aglutinantes inorgánicos y más resistentes a los impactos. Para las muelas de aglutinantes orgánicos se permiten velocidades periféricas muy elevadas.

Las muelas que trabajan a velocidades muy elevadas suelen llevar incorporados varios tipos de refuerzos. Por ejemplo, ciertas muelas están equipadas con cubos de acero para incrementar su resistencia a la rotura. Durante la rotación el esfuerzo principal se desarrolla alrededor del taladro central. Para reforzar la muela, la sección que rodea el taladro central, que no participa en el rectificado, puede hacerse de un material especialmente fuerte que no sea adecuado para el rectificado. Las muelas grandes con la sección central reforzada en esta forma se utilizan especialmente en las acerías para rectificar tochos, lingotes y productos análogos, a velocidades de hasta 80 m/s.

Sin embargo, el método más corriente de reforzar muelas de rectificado, es introducir fibra de vidrio en su construcción. Las muelas delgadas, tales como las que se utilizan para corte, pueden llevar incorporada fibra de vidrio en el centro o a cada lado, mientras que las muelas de más espesor tienen varias capas de fibra de vidrio cuyo número depende del espesor de la muela.

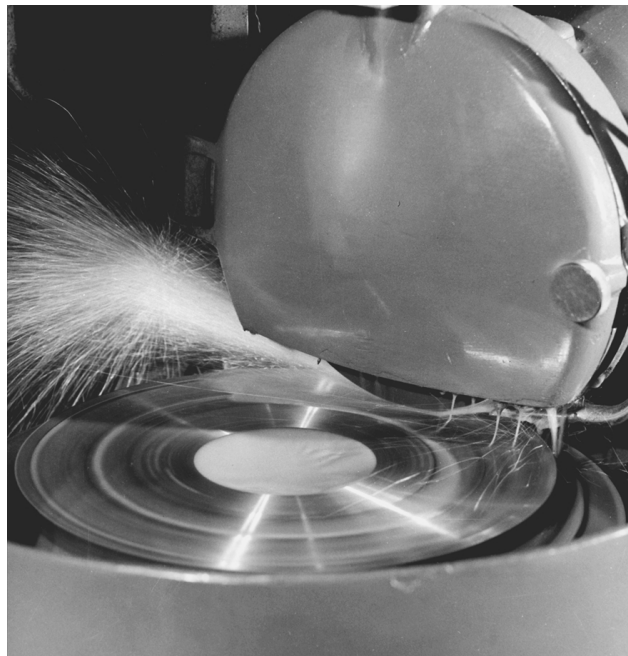
Con excepción de algunas muelas de rectificado de pequeñas dimensiones, todas las muelas, o un muestreo estadístico de ellas deben someterse a pruebas de velocidad por el fabricante. En dichas pruebas, las muelas se hacen girar durante un cierto

período de tiempo a una velocidad superior a la permitida en el rectificado. Los códigos sobre pruebas varían de un país a otro, pero generalmente la muela ha de probarse a una velocidad un 50 % superior a la de trabajo. En algunos países los códigos exigen pruebas especiales para las muelas que consisten en girar a mayores velocidades de las normales, en un instituto central de ensayos. El instituto también puede cortar probetas de la muela e investigar sus propiedades físicas. Las muelas de corte se someten a ciertas pruebas de impacto, de curvado, etc. El fabricante también está obligado a asegurarse de que la muela está bien equilibrada antes de su entrega.

La rotura de una muela puede causar lesiones mortales o muy graves a cualquiera que esté en las proximidades y grandes daños a la planta o a los locales. A pesar de todas las precauciones tomadas por los fabricantes, pueden producirse roturas ocasionales de muelas a menos que se utilicen con el debido cuidado. Las medidas de precaución se refieren a los siguientes aspectos:

- *Manejo y almacenamiento.* Una muela puede resultar dañada o agrietada durante su transporte o manejo. La humedad puede atacar al aglutinante en las muelas de resinas fenólicas y acabar por reducir su resistencia. Las muelas vitrificadas pueden ser sensibles a repetidas variaciones de temperatura. La humedad absorbida irregularmente puede desequilibrar la muela. Por todo ello es muy importante que las muelas se manejen con cuidado en todos los procesos y se mantengan ordenadamente en un lugar seco y protegido.
- *Comprobación de posibles grietas.* Una muela nueva debe comprobarse para asegurarse de que no está deteriorada y de que permanece seca, lo que puede hacerse con gran facilidad golpeándola ligeramente con un mazo de madera. Una muela vitrificada sin defectos producirá un timbre claro, una muela de aglutinante orgánico un timbre de un tono algo menor; pero ambos pueden diferenciarse del sonido bronco de una muela defectuosa. En caso de duda no deberá utilizarse la muela sin consultar antes al proveedor.
- *Pruebas.* Antes de poner en servicio la muela nueva deberá probarse a su máxima velocidad, observando las debidas precauciones. Después del rectificado húmedo la muela debe hacerse girar en vacío para que expulse el agua; de otro modo ésta puede acumularse en el fondo de la muela y causar un desequilibrio que puede originar su rotura la próxima vez que se utilice.
- *Montaje.* Se producen accidentes y roturas cuando las muelas se montan en aparatos inadecuados, por ejemplo en extremos de ejes de máquinas pulidoras. El eje deberá ser del diámetro adecuado, pero no tan grande como para ensanchar el taladro central de la muela; las bridas no deberán ser menores que un tercio del diámetro de la muela y deben ser de acero dulce o un material similar.
- *Velocidad.* Bajo ninguna circunstancia debe superarse la máxima velocidad de funcionamiento permisible especificada por los fabricantes. Debe colocarse un letrero indicando la velocidad del eje en todas las máquinas de rectificar, y debe marcarse la muela con la máxima velocidad periférica permisible y el correspondiente número de revoluciones para una muela nueva. Deben tomarse precauciones especiales con las máquinas de rectificar de velocidad variable y asegurarse del montaje de muelas de la velocidad admisible adecuada en las rectificadoras portátiles.
- *Utilaje.* Siempre que sea posible, deben proporcionarse útiles de dimensiones adecuadas y montados rigidamente. Deben ser ajustables y mantenerse lo más cerca posible de la muela para evitar que la pieza pueda forzarse bruscamente contra ella y romperla o, lo que es más probable, que la mano del operario se introduzca en el hueco y se lesione.

Figura 82.5 • Muela abrasiva vitrificada, debidamente protegida, montada en una esmeriladora de superficie y con una velocidad periférica de 33 m/s.



- *Defensas.* Las muelas abrasivas deben dotarse de defensas suficientemente fuertes para retener los trozos de una muela que se rompa (véase la Figura 82.5). En algunos países existen reglamentaciones detalladas respecto al diseño de las defensas y los materiales a utilizar. En general, debe evitarse el hierro y aluminio fundidos. El distanciamiento de la defensa debe ser lo menor posible y puede ser necesaria una pieza frontal ajustable. Excepcionalmente, cuando la naturaleza del trabajo impide el uso de una defensa, pueden utilizarse bridas protectoras especiales o portaherramientas de seguridad. Los ejes y extremos cónicos de las máquinas pulidoras de doble extremo pueden causar accidentes por enganches a menos que estén provistas de defensas adecuadas.

#### Lesiones de los ojos

El polvo, abrasivos, gránulos y fragmentos son un riesgo corriente para los ojos en todas las operaciones de rectificado en seco. Es esencial su protección eficaz con gafas o anteojos y pantallas fijas a la máquina. Estas son especialmente útiles cuando el uso de las muelas es intermitente, por ejemplo para el afilado de herramientas.

#### Incendios

El rectificado de aleaciones de magnesio lleva consigo un alto riesgo de incendio a menos que se tomen estrictas precauciones contra la ignición accidental y en la eliminación y riego del polvo. Se requieren esmerada limpieza y mantenimiento en todas las conducciones del sistema de evacuación para evitar el riesgo de incendio y también mantener un funcionamiento eficaz de la ventilación. El polvo textil proyectado en las operaciones de pulido entraña riesgo de incendio, por lo que requiere una esmerada limpieza y ventilación local por extracción.

### Vibración

Las esmeriladoras portátiles y de pedestal pueden provocar el síndrome de vibración de la mano y el brazo (HAVS), también conocido como “dedo blanco” por ser éste su síntoma más evidente. Entre las recomendaciones se incluye la limitación de la intensidad y duración de la exposición, el rediseño de las herramientas, el uso de equipo de protección y la vigilancia de la exposición y la salud.

### Riesgos para la salud

Aunque las modernas muelas abrasivas no entrañan en sí mismas el grave riesgo de silicosis asociado en el pasado con las muelas de piedra arenisca, puede desprenderse polvo silíceo altamente peligroso de los materiales que se rectifican, por ejemplo, piezas de fundición con arena. Ciertas muelas aglutinadas con resina pueden contener materiales de relleno que crean un polvo peligroso. Además, las resinas a base de formol pueden emitir formol durante el rectificado. En cualquier caso, el volumen de polvo producido al rectificar hace esencial una eficaz ventilación local por extracción. Es más difícil proporcionar este tipo de ventilación en el caso de muelas portátiles, aunque se ha conseguido algún éxito en este sentido mediante el uso de sistemas de captura de bajo volumen y alta velocidad. Debe evitarse el trabajo prolongado y proporcionarse equipo protector respiratorio en caso necesario. Se requiere también ventilación por extracción para la mayoría de las operaciones de lijado con banda, acabado y pulido, y otras similares. En el caso concreto del bruñido, el polvo textil combustible es causa de gran preocupación.

Debe proporcionarse ropa protectora, buenas instalaciones sanitarias y de aseo con duchas y es aconsejable una vigilancia médica, especialmente para los rectificadores de metales.

endurecen los requisitos exigidos a los lubricantes y aceites de procesado de metales. Actualmente, los aceites lubricantes van desde los muy fluidos y transparentes utilizados para lubricar instrumentos delicados, hasta los aceites densos, de aspecto parecido al alquitrán, que se emplean para lubricar engranajes grandes como los de las acerías. Se utilizan aceites con requisitos muy específicos en los sistemas hidráulicos y para lubricar grandes máquinas herramienta de control numérico por ordenador tales como las que se emplean en la industria aeroespacial para producir piezas de alta precisión, con tolerancias muy estrictas. Cuando se desea un lubricante de prolongada vida útil, como en los motores eléctricos sellados y lubricados de por vida, donde la prolongación de los intervalos entre cambios de aceite representa un considerable ahorro de costes, así como cuando existen amplias gamas de presión y temperatura, como en las aplicaciones aeroespaciales, o cuando es caro y difícil renovar el lubricante, se utilizan aceites, fluidos y grasas sintéticos, o mezclas de aceites sintéticos y derivados del petróleo.

### Aceites industriales

Los aceites industriales, tales como los aceites lubricantes para ejes y piezas similares, lubricantes para engranajes, aceites hidráulicos y para turbinas, y aceites para transmisiones, están diseñados para cumplir requisitos físicos y químicos específicos y funcionar sin cambios perceptibles durante largos periodos y bajo condiciones variables. Los lubricantes para uso aeroespacial deben cumplir condiciones totalmente nuevas, como limpieza, durabilidad, resistencia a la radiación cósmica y aptitud para funcionar a temperaturas extremadamente altas y bajas, en ausencia de gravedad y en el vacío.

Las transmisiones, turbinas y sistemas hidráulicos contienen fluidos que transfieren fuerza o potencia, depósitos para contener esos fluidos, bombas para impulsarlos de un lugar a otro y equipos auxiliares tales como válvulas, tuberías, radiadores y filtros. Los sistemas hidráulicos, transmisiones y turbinas requieren fluidos de viscosidades específicas y gran estabilidad química para poder funcionar con suavidad y transferir la potencia de forma controlada. Entre las características que deben reunir los buenos aceites hidráulicos y de turbinas están un elevado índice de viscosidad, gran estabilidad térmica, larga vida útil en sistemas circulantes, resistencia a la formación de sedimentos, alta lubricidad, propiedades antiespumantes, protección contra el óxido y buena desemulsionabilidad.

Los lubricantes para engranajes están estudiados para formar películas tenaces y resistentes que proporcionen la necesaria lubricación entre engranajes bajo presiones extremas. Las características de estos aceites comprenden buena estabilidad química, desemulsionabilidad y resistencia al aumento de viscosidad y a la formación de sedimentos. Los aceites para ejes son ligeros, extremadamente limpios y transparentes, con aditivos para mejorar la lubricidad. Las características más importantes de los aceites que se utilizan para lubricar dos superficies planas deslizantes cuando están sometidas a una presión elevada y se mueven a baja velocidad, son la lubricidad y la adherencia para ofrecer resistencia a la expulsión por aplastamiento y a la presión extrema.

Los aceites para cilindros y compresores tienen las características combinadas de los aceites industriales y para automóviles. Deben resistir la acumulación de sedimentos, actuar como agentes de transferencia térmica (cilindros de motores de combustión interna), proporcionar lubricación a los cilindros y pistones, crear estanqueidad para resistir la presión producida por el retorno de gases, ser química y térmicamente estables (en especial el aceite para depresores y bombas de vacío), tener un alto índice de viscosidad y resistir el lavado por agua (cilindros de vapor) y la detergencia.

## ● LUBRICANTES INDUSTRIALES, FLUIDOS DE MECANIZADO Y ACEITES PARA AUTOMOVILES

*Richard S. Kraus*

La revolución industrial no hubiera sido posible sin el desarrollo de aceites industriales refinados derivados del petróleo, lubricantes, aceites de corte y grasas. Antes de que se descubriese, en el decenio de 1860, que era posible obtener un lubricante superior destilando petróleo crudo al vacío, la industria dependía de aceites naturales y grasas animales tales como el tocino, y del aceite de ballena para la lubricación de piezas móviles. Estos aceites y productos animales eran especialmente susceptibles de fusión, oxidación y descomposición por exposición al calor y a la humedad producidos por las máquinas de vapor que impulsaban la mayoría de los equipos industriales en aquel entonces. La evolución de productos refinados derivados del petróleo prosiguió ininterrumpidamente desde el primer lubricante, que se utilizó para curtir cuero, hasta los modernos aceites y grasas sintéticos que tienen mayor vida útil, cualidades lubricantes superiores y mejor resistencia a los cambios bajo temperaturas y condiciones climáticas variables.

### Lubricantes industriales

Todas las piezas móviles de maquinaria y equipos requieren lubricación. Aunque ésta puede proporcionarse con materiales secos como el Teflón o el grafito, que se utilizan en piezas tales como cojinetes de motores eléctricos pequeños, los aceites y grasas son los lubricantes empleados con más frecuencia. A medida que aumenta la complejidad de la maquinaria se

### Aceites para motores de automóviles

Los fabricantes de motores de combustión interna y algunas organizaciones, como la Society of Automotive Engineers (SAE) en Estados Unidos y Canadá, han establecido criterios de rendimiento específicos para los aceites destinados a motores de automóviles. Los aceites para motores de automóviles de gasolina y diesel son sometidos a una serie de ensayos de rendimiento para determinar su estabilidad química y térmica, resistencia a la corrosión, viscosidad, protección contra el desgaste, lubricidad, detergencia y rendimiento a alta y baja temperatura. Después se clasifican conforme a un sistema de códigos que permite a los consumidores determinar su idoneidad para servicio pesado y para diferentes temperaturas y gamas de viscosidad.

Los aceites para motores de automóviles, transmisiones y cajas de cambios se diseñan con altos índices de viscosidad para que soporten los cambios de viscosidad que acompañan a los cambios de temperatura. Los aceites para motores de automóviles están especialmente formulados para resistir la descomposición bajo altas temperaturas al lubricar motores de combustión interna. Los aceites para motores de combustión interna no deben ser demasiado densos, a fin de que puedan lubricar las piezas móviles internas cuando el motor arranca en tiempo frío, pero tampoco deben perder viscosidad a medida que el motor se alienta durante su funcionamiento. Deben poder soportar la acumulación de carbonilla en las válvulas, segmentos y cilindros, y la formación de ácidos o depósitos corrosivos a causa de la humedad. Los aceites para motores de automóviles contienen detergentes diseñados para mantener en suspensión las partículas de carbonilla y las partículas metálicas producidas por el desgaste, para que puedan eliminarse por filtración al circular el aceite y no se acumulen en las piezas internas del motor con lo que éstas resultarían dañadas.

### Fluidos de corte

Los tres tipos de fluidos de corte utilizados en la industria son aceites minerales, aceites solubles y fluidos sintéticos. Los aceites de corte son normalmente una mezcla de aceites minerales de alta calidad y estabilidad, y diversas viscosidades, con aditivos que les confieren características específicas según el tipo de material que se mecaniza y del trabajo que se ha de realizar. Los fluidos de corte solubles en agua son aceites minerales (o sintéticos) que contienen emulsionantes y aditivos especiales, como antiespumantes, anticorrosivos, detergentes, bactericidas y germicidas. Antes de utilizarlos, se diluyen con agua en diversas proporciones. Los fluidos de corte sintéticos, en lugar de emulsiones, son disoluciones de fluidos no derivados del petróleo, aditivos y agua, y algunos de ellos son difícilmente inflamables por ser éste un requisito para mecanizar determinados metales. Los fluidos semi-sintéticos contienen del 10 al 15 % de aceite mineral. Algunos fluidos especiales tienen a la vez características de aceite lubricante y de fluido de corte debido a la tendencia de estos líquidos a sufrir fugas y entremezclarse en algunas máquinas herramientas tales como las máquinas de roscar automáticas de varios ejes.

Las características deseadas de los fluidos de corte dependen de la composición del metal que se trabaja, de la herramienta que se utiliza y del tipo de operación de corte, cepillado o conformación que se lleva a cabo. Los fluidos de corte mejoran y favorecen el proceso de mecanizado mediante su refrigeración y lubricación (es decir, protegen el filo de la herramienta de corte). Por ejemplo, cuando se trabaja un metal blando que produce un elevado calentamiento, el criterio más importante es la refrigeración. Esta mejora cuando se utiliza un aceite ligero (por ejemplo keroseno) o un fluido de corte de base acuosa. El embotamiento del filo de las herramientas de corte se controla con aditivos antisoldadura o antidesgaste tales como azufre, cloro o compuestos de fósforo. La lubricidad, que es importante

cuando se trabaja acero para vencer la abrasividad del sulfuro de hierro, la proporcionan grasas sintéticas y animales o aditivos de aceite de ballena sulfurados.

### Otros aceites de mecanizado y de proceso

Los fluidos de rectificado están estudiados para proporcionar refrigeración y evitar la acumulación de limaduras metálicas en las muelas. Sus características son estabilidad térmica y química, protección contra el óxido (fluidos solubles), prevención de formación de depósitos de goma por evaporación y un punto de inflamabilidad seguro para el trabajo que se realiza.

Los aceites de temple, que requieren una gran estabilidad, se emplean en el tratamiento de metales para controlar los cambios que experimenta la estructura molecular del acero al enfriarse. El temple en aceite ligero se utiliza para cementar piezas de acero pequeñas y baratas. Para producir aceros para máquinas herramienta, que son bastante duros exteriormente y tienen menor resistencia interna, se efectúa un temple más lento. Para el tratamiento de aceros aleados y aceros ricos en carbono se utiliza un aceite de temple discontinuo o polifásico.

Los aceites de laminación son aceites minerales o solubles de fórmula especialmente estudiada para lubricar y dar un acabado suave al metal, en especial al aluminio, cobre y latón, mientras pasa por los trenes de laminación en caliente o en frío. Los aceites de desmoldeo se emplean para recubrir los moldes y troqueles a fin de facilitar la extracción de las piezas metálicas conformadas. Los aceites curtientes todavía se utilizan en la industria de fabricación de fieltro y cuero. Los aceites para transformadores son fluidos dieléctricos de fórmula especial que se utilizan en transformadores y grandes disyuntores e interruptores eléctricos.

Los aceites de transferencia térmica se usan en sistemas abiertos o cerrados y pueden durar hasta 15 años en servicio. Sus características principales son una buena estabilidad térmica, ya que los sistemas funcionan a temperaturas de 150 a 315 °C, estabilidad frente a la oxidación y alta temperatura de inflamabilidad. Estos aceites son normalmente demasiado viscosos para ser bombeados a temperatura ambiente y hay que calentarlos para darles la fluidez necesaria.

Los disolventes derivados del petróleo se utilizan para limpiar piezas mediante rociado, lavado o inmersión. Los disolventes eliminan el aceite y emulsionan la suciedad y las partículas metálicas. Los aceites anticorrosivos pueden ser de base disolvente o acuosa. Se aplican a los rollos de chapa de acero inoxidable, cojinetes y otros componentes mediante inmersión o rociado, y dejan sobre la superficie del metal una película polarizada o de parafina que la protege de las huellas de dedos y la oxidación, al tiempo que repele el agua.

### Grasas

Las grasas son mezclas de líquidos, espesantes y aditivos utilizadas para lubricar piezas y equipos que no pueden hacerse estancos para que retengan el aceite o son difícilmente accesibles, y cuando las fugas o salpicaduras de lubricantes líquidos podrían contaminar productos o crear riesgos. Tienen un amplio campo de aplicaciones y requisitos de rendimiento, desde la lubricación de cojinetes en motores de aviones de reacción a temperaturas bajo hasta la de engranajes de laminadores en caliente, y resisten el lavado con ácidos o agua así como la fricción continua producida en los rodamientos de rodillos de las ruedas de los vagones ferroviarios.

La grasa se hace mezclando jabones metálicos (sales de ácidos grasos de cadena larga) y aceite lubricante a temperaturas de 205 a 315 °C. En las grasas sintéticas se utilizan diésteres, ésteres de silicona o fosfóricos y glicoles de polialquilenos como líquidos. Las características de la grasa dependen en gran

medida del líquido, el elemento metálico (por ej., calcio, sodio, aluminio, litio, etc.) del jabón y los aditivos utilizados para mejorar el rendimiento y la estabilidad, y reducir la fricción. Entre estos últimos están los aditivos para presiones extremas, que recubren el metal con una fina capa de compuestos de azufre metálicos no corrosivos, naftenato de plomo o ditiofosfato de zinc, anticorrosivos, antioxidantes, ácidos grasos para aumentar la lubricidad, aditivos para dar adherencia, colorantes de identificación e inhibidores del agua. Algunas grasas contienen cargas de grafito o molibdeno que recubren las piezas metálicas y les proporcionan lubricación cuando la grasa se ha agotado o descompuesto.

### Aditivos para lubricantes industriales, grasas y aceites de motores de automóviles

Además de materias primas lubricantes de alta calidad, con estabilidad química y térmica y altos índices de viscosidad, es necesario utilizar aditivos para mejorar el fluido y proporcionar las características específicas requeridas a los lubricantes industriales, fluidos de corte, grasas y aceites para motores de automóviles. Entre los aditivos más utilizados están los siguientes:

- **Antioxidantes.** Los inhibidores de la oxidación, tales como el 2-6 dietil butil terciario, paracresol y fenil naftilamina, reducen la velocidad de deterioro del aceite al romper las moléculas de cadena larga que se forman por exposición al oxígeno. Estos inhibidores se utilizan para recubrir metales como el cobre, zinc y plomo, y evitar su contacto con el aceite a fin de que no actúen como catalizadores, ya que acelerarían la oxidación y formarían ácidos que atacan a otros metales.
- **Antiespumantes.** Los despumantes, tales como las siliconas y los poliorganosiloxanos, se utilizan en aceites hidráulicos, aceites para engranajes, lubricantes de transmisiones y aceites para turbinas, con el fin de reducir la tensión superficial y eliminar el aire introducido en el aceite por las bombas y compresores, para mantener constante la presión hidráulica y evitar la cavitación.
- **Anticorrosivos.** Los aditivos anticorrosión, tales como el naftenato de plomo y el sulfonato de sodio, se emplean para evitar que se forme óxido sobre las piezas y sistemas metálicos cuando el aceite circulante se ha contaminado con agua o por la entrada de aire húmedo en los depósitos del sistema al enfriarse éstos cuando el equipo o la maquinaria están parados.
- **Aditivos antidesgaste.** Los aditivos antidesgaste, como el tricresilfosfato, forman compuestos polares que son atraídos por las superficies metálicas y crean una barrera física protectora adicional en caso de que la película de aceite no sea suficiente.
- **Correctores del índice de viscosidad.** Ayudan a los aceites a resistir los efectos de los cambios de temperatura. Lamentablemente, su eficacia disminuye con el uso prolongado. Los aceites sintéticos se diseñan con índices de viscosidad muy elevados, lo que les permite conservar su estructura dentro de intervalos de temperatura más amplios y durante períodos de tiempo mucho más largos que los aceites minerales con aditivos correctores del índice de viscosidad.
- **Desemulsionantes.** Inhibidores del agua y compuestos especiales separan el agua del aceite e impiden la formación de gomas; contienen aceites parafínicos que proporcionan mayor lubricidad. Se utilizan cuando la maquinaria está sujeta a lavado por agua o donde hay mucha humedad, como en cilindros de vapor, compresores de aire y cajas de cambios contaminadas por fluidos de corte solubles.
- **Colorantes.** Los colorantes se emplean para ayudar a los usuarios a reconocer los distintos aceites utilizados con fines específicos, como lubricantes de transmisiones y aceites para engranajes, a fin de evitar su aplicación errónea.

- **Aditivos contra presiones extremas.** Los aditivos contra presiones extremas, tales como compuestos grasos sulfurados no corrosivos, ditiofosfato de zinc y naftenato de plomo, se emplean en aceites lubricantes de automóviles, engranajes y transmisiones para formar recubrimientos que protejan las superficies metálicas cuando la película de aceite protectora pierda espesor o sea expulsada por aplastamiento y no pueda evitar el contacto de metal contra metal.
- **Detergentes.** Los detergentes de metilsulfonatos y metalfenatos se utilizan para mantener en suspensión la suciedad, carbonilla y partículas metálicas producidas por desgaste en aceites hidráulicos y lubricantes de engranajes, motores y transmisiones. Estos contaminantes se eliminan normalmente mediante el paso del aceite por un filtro para evitar que continúen circulando por el sistema, donde podrían causar daños.
- **Aditivos para crear adherencia.** Los aditivos de adherencia se usan para que los aceites se adhieran a los cojinetes, cárteres de engranajes, grandes engranajes descubiertos en trenes de laminación y máquinas de construcción, y maquinaria aérea, ofreciendo de ese modo resistencia a las fugas. Su adherencia disminuye tras un uso prolongado.
- **Emulsionantes.** En los aceites solubles se utilizan ácidos y aceites grasos como emulsionantes para favorecer la formación de disoluciones con agua.
- **Aditivos para lubricidad.** Se emplea grasa animal, tocino, sebo, aceite de ballena y aceites vegetales para dar mayor untuosidad a los aceites de corte y a algunos aceites para engranajes.
- **Bactericidas.** Se añaden bactericidas y germicidas como fenol y aceite de pino a los aceites de corte solubles para prolongar su vida útil, mantener su estabilidad, reducir olores y prevenir la dermatitis.

### Fabricación de lubricantes industriales y aceites para automóviles

Los lubricantes y aceites industriales, grasas, fluidos de corte y aceites para motores de automóviles se fabrican en instalaciones de mezcla y envasado denominadas “plantas de lubricantes” o “plantas de mezcla”. Estas instalaciones pueden estar ubicadas en o junto a refinerías que producen materias primas para lubricantes, o hallarse a cierta distancia de aquéllas y recibir las materias primas en buques cisterna o barcazas, vagones cisterna o camiones cisterna. Las plantas de mezcla y envasado mezclan e incorporan aditivos a las materias primas de los aceites lubricantes para fabricar una amplia gama de productos acabados que después se envían a granel o en distintos envases.

Los procesos de mezcla y composición utilizados para fabricar lubricantes, fluidos y grasas dependen de la antigüedad y refinamiento de las instalaciones, del equipo disponible, de los tipos y fórmulas de los aditivos empleados y de la variedad y volumen de productos fabricados. El proceso puede consistir en la simple mezcla física de las materias primas y aditivos en una cuba utilizando mezcladoras, paletas o agitación por aire, o puede requerir la aportación de calor auxiliar por medio de baterías eléctricas o de vapor para facilitar la disolución e incorporación de los aditivos. Otros fluidos y lubricantes industriales se producen automáticamente mezclando las materias primas y lodos premezclados de aditivos y aceite mediante sistemas de colectores. La grasa puede fabricarse por lotes o mediante un proceso continuo. Las plantas de lubricantes pueden preparar sus propios aditivos a partir de productos químicos o comprar aditivos ya preparados a empresas especializadas; una misma planta puede utilizar ambos métodos. Cuando las plantas de lubricantes fabrican sus propios aditivos y combinados de aditivos, pueden tener que utilizar altas temperaturas y presiones además de reacciones químicas y agitación física para combinar los productos químicos y materiales.

Una vez producidos, los fluidos y lubricantes pueden permanecer en las cubas de mezcla o almacenarse en depósitos para que los aditivos se mantengan en suspensión o disolución, para tener tiempo de probar el producto a fin de determinar si cumple las especificaciones de calidad y los requisitos de homologación, y para que las temperaturas de proceso vuelvan al nivel del ambiente antes del envasado y expedición de los productos. Una vez concluidas las pruebas, se da salida a los productos acabados para su envío a granel o su envasado en recipientes.

Los productos acabados se envían a granel en vagones o camiones cisterna directamente a los consumidores, distribuidores o plantas externas de envasado. También se envían a los consumidores y distribuidores en vagones o camiones de transporte convencionales envasados en diversos tipos de recipientes, a saber:

- Contenedores intermedios de transporte a granel, metálicos, de plástico o mixtos de metal y plástico o metal y fibra, de 227 l a unos 2.840 l de capacidad, que se expiden como unidades individuales en palets incorporados o no, apilados a 1 ó 2 alturas.
- Bidones metálicos, de fibra o de plástico con una capacidad de 208 l, 114 l ó 180 kg; se envían normalmente en grupos de 4 por palet.
- Tambores de metal o plástico con una capacidad de 60 l ó 54 kg, y bidones pequeños de metal o plástico de 19 l ó 16 kg; se apilan sobre palets y se flejan o envuelven en retráctilado para mantener la estabilidad.
- Latas o bombonas de plástico de 8 l ó 4 l de capacidad; botellas de plástico o de fibra y latas de 1 l, y cartuchos de grasa de 2 kg; se embalan en cajas de cartón que se apilan sobre palets y se flejan o envuelven en retráctilado para su envío.

Algunas plantas de mezcla y envasado envían palets de productos mixtos y recipientes y envases de tamaños mixtos directamente a pequeños consumidores. Por ejemplo, un envío de un solo palet a una estación de servicio podría estar formado por 1 tambor de lubricante para transmisiones, 2 barriles pequeños de grasa, 8 cajas de envases de aceite para motores de automóviles y 4 bidones pequeños de lubricante para engranajes.

### Calidad de los productos

La calidad de los productos lubricantes es importante para el correcto funcionamiento de las máquinas y equipos y para producir piezas y materiales de calidad. Las plantas de mezcla y envasado fabrican productos acabados derivados del petróleo bajo estrictas especificaciones y requisitos de calidad. Los usuarios deben mantener el nivel de calidad estableciendo prácticas seguras para la manipulación, almacenamiento, dispensación y trasiego de lubricantes desde sus envases o depósitos originales al equipo surtidor y al punto de aplicación de la máquina o el equipo a lubricar o el sistema a rellenar. Algunos complejos industriales han instalado sistemas centralizados de dispensación, lubricación e hidráulicos que reducen al mínimo la contaminación y la exposición. Los aceites industriales, lubricantes, aceites de corte y grasas se deterioran por contaminación con agua o humedad, exposición a temperaturas excesivamente altas o bajas, mezcla inadvertida con otros productos y almacenamiento a largo plazo que permite que los aditivos se separen o sufran alteraciones químicas.

### Salud y seguridad

Puesto que los productos acabados industriales y para automóviles son utilizados y manipulados por consumidores, es necesario que estén relativamente exentos de riesgos. Existe la posibilidad

de que se produzcan exposiciones peligrosas al mezclar y componer productos, manipular aditivos, utilizar fluidos de corte y trabajar con sistemas de lubricación por niebla de aceite.

El capítulo *Refinerías de petróleo y gas natural* de esta *Enciclopedia* proporciona información relativa a los riesgos inherentes a las instalaciones auxiliares de las plantas de mezcla y envasado, tales como salas de calderas, laboratorios, oficinas, separadores de aceite y agua e instalaciones de tratamiento de residuos, muelles marítimos, almacenamiento en depósitos, operaciones de almacén, sistemas de carga de vagones y camiones cisterna, e instalaciones de carga y descarga de vagones y camiones de transporte de envases.

### Seguridad

La fabricación de aditivos y lodos, composición y mezcla de lodos, y operaciones de mezcla durante el proceso requieren estrictos controles para mantener la calidad deseada del producto y, junto con el uso de equipos de protección personal, reducir al mínimo la exposición a productos químicos y materiales potencialmente peligrosos, así como el contacto con superficies calientes y vapor. Los tambores y otros recipientes de aditivos deben almacenarse de forma segura y mantenerse herméticamente cerrados hasta el momento de utilizarlos. Los aditivos envasados en tambores y sacos han de manejarse correctamente para evitar tirones musculares. Los productos químicos peligrosos deberán almacenarse correctamente, y no deben guardarse productos químicos incompatibles donde puedan mezclarse entre sí. Entre las precauciones que deben adoptarse al trabajar con maquinaria de llenado y envasado están el llevar guantes y evitar pillarse los dedos en los dispositivos de engatillado de tapas de barriles y bidones. No deberán retirarse, desconectarse ni puentearse defensas o sistemas de protección de las máquinas con el fin de acelerar el trabajo. Los contenedores y tambores intermedios de envasado a granel deben inspeccionarse antes de llenarlos para asegurarse de que están limpios y son adecuados.

Se establecerá un sistema de autorizaciones de entrada en espacios confinados para la entrada en depósitos de almacenamiento y cubas de mezcla con fines de limpieza, inspección, mantenimiento o reparación. Igualmente deberá establecerse y ponerse en práctica un procedimiento de bloqueo y etiquetado antes de trabajar en maquinaria de envasado, cubas de mezcla con mezcladores, cintas transportadoras, paletizadoras y demás equipos con piezas móviles.

Se retirarán de la zona de almacenamiento los tambores y contenedores con fugas y se limpiarán los derrames para evitar resbalones y caídas. El reciclaje, quema y evacuación de lubricantes, aceites para motores de automóviles y fluidos de corte residuales, derramados y usados, deberán realizarse de acuerdo con las reglas gubernamentales y los procedimientos establecidos por la empresa. Los trabajadores utilizarán equipos de protección personal adecuados al limpiar derrames y manipular productos usados o residuales. El aceite de motor, fluidos de corte o lubricantes industriales drenados que puedan estar contaminados con gasolina y disolventes inflamables, se guardarán en lugar seguro, lejos de cualquier fuente de ignición, hasta que puedan evacuarse correctamente.

### Protección contra incendios

Aunque la probabilidad de incendio es menor en las operaciones de mezcla y composición de lubricantes industriales y para automóviles que en los procesos de refinación, hay que adoptar precauciones al fabricar aceites y grasas de mecanizado debido a las altas temperaturas de mezcla y composición y a los bajos puntos de inflamabilidad de los productos que se utilizan. Se tomarán precauciones especiales para evitar incendios cuando se dispensen productos o se llenen recipientes a temperaturas



superiores a sus puntos de inflamabilidad. Al trasvasar líquidos inflamables de un recipiente a otro deberán utilizarse técnicas adecuadas de conexión y puesta a tierra para prevenir la acumulación y descarga de energía electrostática. Los motores eléctricos y equipos portátiles deberán tener la homologación adecuada para los riesgos existentes en la zona en que se instalen o utilicen.

Existe riesgo de incendio si la fuga de un producto o la emisión de vapores en las zonas de mezcla de lubricantes y procesado o almacenamiento de grasas entra en contacto con una fuente de ignición. Deberá considerarse el establecimiento y puesta en práctica de un sistema de autorizaciones para trabajos en caliente con el fin de evitar incendios en las instalaciones de mezcla y envasado. Los depósitos de almacenamiento instalados en el interior de edificios se construirán, ventilarán y protegerán de acuerdo con los requisitos gubernamentales y las normas de la empresa. Los productos apilados o almacenados en bastidores no deberán entorpecer el uso de los sistemas de protección contra incendios, las puertas de seguridad en caso de incendio ni las rutas de salida.

El almacenamiento de productos acabados, tanto a granel como en contenedores y otros envases, deberá efectuarse de acuerdo con las prácticas reconocidas y las reglamentaciones sobre prevención de incendios. Por ejemplo, los líquidos y aditivos inflamables en forma de soluciones de líquidos inflamables, pueden almacenarse en edificios externos o en locales de almacenamiento separados interiores o anexos, especialmente diseñados al efecto. Muchos aditivos se almacenan en salas caldeadas (38 a 65 °C) o calientes (a más de 65 °C) para mantener los ingredientes en suspensión, reducir la viscosidad de los productos densos o facilitar la mezcla y composición. Estos locales de almacenamiento deberán cumplir los requisitos de clasificación eléctrica, drenaje, extracción y ventilación contra explosiones, en especial cuando se almacenen o dispensen líquidos inflamables o combustibles a temperaturas superiores a sus puntos de inflamabilidad.

### Salud

Al realizar operaciones de mezcla, muestreo y composición, deberá considerarse el empleo de equipo de protección personal y respiratoria para evitar exposiciones al calor, vapor, polvo, neblinas, gases, humos, sales metálicas, productos químicos y aditivos. Cuando se realicen actividades de inspección y mantenimiento, al tomar muestras y manipular hidrocarburos y aditivos durante las operaciones de producción y envasado, así como al limpiar derrames y evacuar emisiones gaseosas, puede ser necesario observar prácticas seguras de trabajo y una higiene adecuada, y utilizar protección personal apropiada para evitar la exposición a neblinas de aceite, humos y gases, aditivos, ruido y calor, en concreto:

- Para trabajos de tipo general deberá usarse calzado de trabajo con suela antideslizante o resistente al aceite, y cuando exista riesgo de lesiones en los pies por caída o rodadura de objetos o equipos se utilizará calzado de seguridad homologado con puntera protectora y suela antideslizante o resistente al aceite.
- Para exposiciones peligrosas a productos químicos, polvo o vapor, puede ser necesario usar gafas de montura ajustada y protección respiratoria.
- Al manipular sustancias químicas peligrosas, aditivos y disoluciones cáusticas, y al limpiar derrames de estos productos, deberán usarse guantes, mandiles y calzado impermeables, pantallas faciales y gafas de seguridad resistentes a los productos químicos.
- Al trabajar en pozos u otras zonas con riesgo de lesiones craneoencefálicas, puede ser necesario utilizar protección para la cabeza.

- Deberá proporcionarse un fácil acceso para la adecuada limpieza e instalaciones de secado para controlar derrames y salpicaduras.

El aceite es una causa común de dermatitis, afección que puede controlarse mediante el uso de equipo de protección y prácticas adecuadas de higiene personal. Debe evitarse el contacto directo de la piel con cualquier tipo de grasa o lubricante producido. Los aceites ligeros como el keroseno, los aceites de base disolvente y los lubricantes para ejes desgrasan la piel y causan sarpullidos. Los productos densos, como los aceites para engranajes y las grasas, obstruyen los poros de la piel, lo que provoca foliculitis.

Los riesgos para la salud derivados de la contaminación microbiana del aceite pueden resumirse como sigue:

- Las afecciones de la piel preexistentes pueden agravarse.
- Los aerosoles lubricantes de tamaño respirable pueden causar enfermedades respiratorias.
- Los organismos pueden modificar la composición del producto y hacer que resulte directamente nocivo.
- Pueden introducirse bacterias dañinas procedentes de animales, aves o personas.

Los operarios pueden sufrir dermatitis de contacto cuando están expuestos a fluidos de corte durante la producción, el trabajo o el mantenimiento y al limpiarse las manos cubiertas de aceite con trapos que contienen diminutas partículas metálicas. El metal produce pequeñas laceraciones en la piel que pueden infectarse. Los fluidos de corte de base acuosa que manchan la piel y la ropa pueden contener bacterias y causar infecciones, y los emulsionantes pueden disolver las grasas de la piel. La foliculitis por aceite se produce a causa de la exposición prolongada a fluidos de corte de base oleosa, por ejemplo por llevar ropa empapada en aceite. Los trabajadores deberán quitarse la ropa empapada en aceite y no ponérsela de nuevo hasta que haya sido lavada. También puede ocasionar dermatitis el uso de jabones, detergentes o disolventes para limpiarse la piel. El mejor modo de controlar la dermatitis es observar una higiene adecuada y reducir al mínimo la exposición. Si la dermatitis persiste, se deberá consultar al médico.

En el extenso estudio realizado como base para la elaboración de su documento de criterios, el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de Estados Unidos descubrió una relación entre la exposición a fluidos de mecanizado y el riesgo de padecer cáncer de diversos órganos, como estómago, páncreas, laringe y recto (NIOSH 1996). Aún no se ha determinado cuáles son las fórmulas específicas responsables del elevado riesgo de cáncer.

La exposición profesional a neblinas y aerosoles de aceites se asocia a diversos efectos respiratorios no malignos, como neumonía lipóide, asma, irritación aguda de las vías respiratorias, bronquitis crónica y deterioro de la función pulmonar (NIOSH 1996).

Los fluidos de mecanizado se contaminan fácilmente con bacterias y hongos. Pueden afectar a la piel y, cuando se inhalan en forma de aerosoles contaminados, pueden tener efectos sistémicos.

Para eliminar componentes aromáticos de los lubricantes industriales se utilizan procesos de refinación tales como el hidrocarbado y el tratamiento con ácidos, y se ha restringido el uso de materias primas de base nafténica con el fin de reducir al mínimo la carcinogenicidad. También los aditivos introducidos en la mezcla y la composición pueden crear un potencial de riesgo para la salud. Las exposiciones a compuestos clorados y compuestos de plomo, como los que se utilizan en algunos lubricantes y grasas para engranajes, causan irritación de la piel

y pueden ser potencialmente peligrosos. Se han dado casos de parálisis nerviosas provocadas por triortocresilfosfato al utilizar accidentalmente aceite lubricante para cocinar. Los aceites sintéticos están formados principalmente por nitrito sódico, trietanolamina y aditivos. La trietanolamina comercial contiene dietanolamina, que puede reaccionar con el nitrito sódico y formar un compuesto cancerígeno relativamente débil, la N-nitrosodietanolamina, lo que puede constituir un riesgo. Los lubricantes semisintéticos y los aditivos incluidos en su fórmula presentan los riesgos de ambos productos.

La información relativa a la seguridad de los lubricantes, aceites y grasas es importante tanto para los empleados de los fabricantes de estos productos como para los de sus usuarios. Los fabricantes deberían tener a su disposición fichas técnicas de seguridad (FTS) u otra información sobre todos los aditivos y materias primas utilizados en la mezcla y composición de los productos. Muchas empresas han realizado pruebas epidemiológicas y toxicológicas para determinar los niveles de riesgo de sus productos en relación con cualquier efecto agudo o crónico para la salud. Debería facilitarse esta información a los trabajadores y usuarios mediante etiquetas de advertencia y documentación informativa sobre seguridad de los productos.

## ● METALES, TRATAMIENTO DE SUPERFICIE

J.G. Jones, J.R. Bevan, J.A. Catton,  
A. Zober, N. Fish, K.M. Morse,  
G. Thomas, M.A. El Kadeem  
y Philip A. Platcow\*

Existe una gran variedad de técnicas de acabado de la superficie de los productos metálicos que se utilizan para que éstos ofrezcan resistencia a la corrosión, ajusten mejor y tengan mejor aspecto (véase la Tabla 82.7). Algunos productos se someten a una secuencia de varias de estas técnicas. En este artículo se describen brevemente algunas de las que se utilizan con más frecuencia.

Para poder aplicar cualquiera de estas técnicas primero es necesario limpiar a fondo los productos. Se utilizan varios métodos de limpieza, individualmente o en secuencia, como por ejemplo esmerilado, cepillado y pulido mecánico (que producen polvo metálico o de óxido—el polvo de aluminio puede ser explosivo), desengrasado al vapor, lavado con disolventes orgánicos de la grasa, limpieza en baños de disoluciones ácidas o alcalinas concentradas y desengrasado electrolítico. Este último consiste en la inmersión en baños que contienen cianuro y un álcali concentrado y en los que el hidrógeno u oxígeno formados electrolíticamente eliminan la grasa, dejando superficies metálicas en bruto libres de óxidos y grasa. La limpieza va seguida de un lavado y secado adecuados del producto.

El diseño apropiado del equipo y un sistema eficaz de ventilación local por extracción reducen el riesgo en parte. A los trabajadores expuestos a salpicaduras deberán proporcionárseles gafas de seguridad o pantallas para los ojos y guantes, mandiles y ropa de protección. Deberá haber cerca duchas de emergencia y fuentes para lavados oculares en perfecto estado de funcionamiento, y los derrames y salpicaduras deberán eliminarse rápidamente mediante lavados. Para utilizar equipos electrolíticos los guantes y el calzado no deberán ser conductores de la electricidad, y deberán adoptarse otras precauciones eléctricas normales, como la instalación de interruptores de fugas a tierra y procedimientos de bloqueo y etiquetado.

\* Adaptado de la 3ª edición, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*.

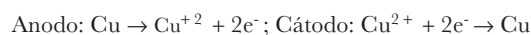
## Procesos de tratamiento

### Pulido electrolítico

El pulido electrolítico se utiliza para producir superficies de aspecto y reflectividad mejorados, eliminar el exceso de metal con objeto de obtener las dimensiones exactas necesarias y preparar la superficie para inspección de imperfecciones. El proceso consiste en la dilución anódica preferente de los puntos altos de la superficie después del desengrasado al vapor y la limpieza alcalina en caliente. Como soluciones electrolíticas se utilizan normalmente ácidos, por lo que se requiere un lavado adecuado a continuación.

### Recubrimiento electrolítico

El recubrimiento electrolítico es un proceso químico o electroquímico consistente en aplicar una capa metálica al producto, por ejemplo níquel para protegerlo contra la corrosión, cromo duro para mejorar las propiedades de la superficie o plata y oro para embellecerla. En ocasiones se utilizan materiales no metálicos. El producto, conectado como cátodo, y un ánodo del metal a depositar se sumergen en una disolución electrolítica (que puede ser ácida, alcalina o alcalina con sales de cianuro y complejos) y se conecta externamente a una fuente de corriente continua. Los cationes con carga positiva del ánodo metálico migran hacia el cátodo, donde son reducidos al metal y depositados en forma de capa delgada (véase la Figura 82.6). El proceso continúa hasta que el nuevo recubrimiento alcanza el espesor deseado; entonces se lava, seca y pule el producto.



En la *electroconformación*, un proceso estrechamente relacionado con el recubrimiento electrolítico, objetos moldeados, por ejemplo, en yeso o plástico, se hacen conductores mediante la aplicación de grafito y después se conectan como cátodo para que el metal se deposite sobre ellos.

En el *anodizado*, un proceso que ha adquirido creciente importancia en los últimos años, se conectan como ánodo productos de aluminio (también se utilizan titanio y otros metales) y se

Figura 82.6 • Esquema del recubrimiento electrolítico.

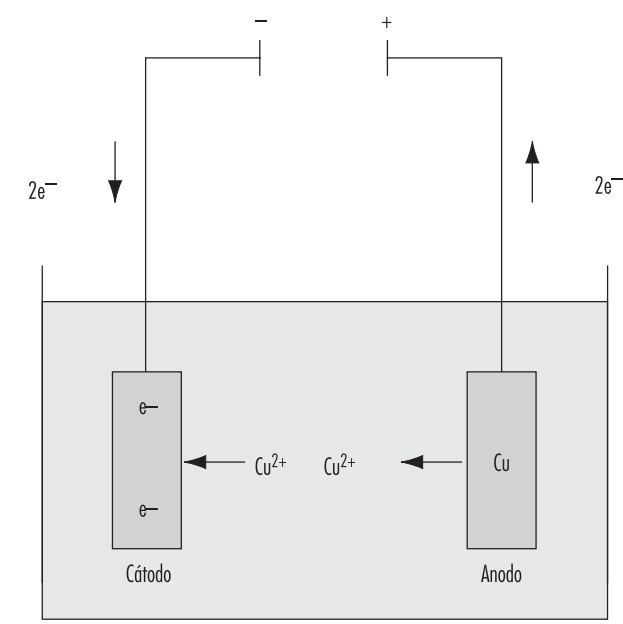


Tabla 82.7 • Resumen de los riesgos inherentes a los distintos métodos de tratamiento de metales.

Método de tratamiento de metales	Riesgos	Precauciones
Pulido electrolítico	Quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos	Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción.
Recubrimiento electrolítico	Exposición a cromo y níquel potencialmente cancerígenos; exposición a cianuros; quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos; sacudidas eléctricas; el proceso puede ser en fase húmeda, con el consiguiente riesgo de resbalones y caídas; producción de polvo potencialmente explosivo; riesgos ergonómicos	Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción, normalmente ranurado, de tipo impelente-aspirante. Limpiar los derrames inmediatamente. Instalar pavimento antideslizante. Utilizar procedimientos y puestos de trabajo bien diseñados para evitar el estrés de origen ergonómico.
Esmaltes y vidriados	Riesgos físicos por esmeriladoras, transportadores, molinos; riesgo de quemaduras por líquidos y equipos a altas temperaturas; exposición a polvos que pueden causar cáncer de pulmón	Instalar defensas adecuadas en las máquinas, incluyendo enclavamientos. Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción para evitar la exposición al polvo. Puede ser necesario instalar equipos de filtros APAE.
Mordentado	Exposición a ácido fluorhídrico; quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos; riesgo de quemaduras por líquidos y equipos a altas temperaturas	Implantar un programa que evite la exposición al ácido fluorhídrico. Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción.
Galvanizado	Riesgo de quemaduras por líquidos, metales y equipos a altas temperaturas; quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos; fiebre por vapores de metal; posible exposición al plomo	Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción. Implantar un programa de reducción/vigilancia de la exposición al plomo.
Termotratamiento	Riesgo de quemaduras por líquidos, metales y equipos a altas temperaturas; quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos; posibles atmósferas explosivas de hidrógeno; posible exposición a monóxido de carbono; posible exposición a cianuros; riesgo de incendio por temple en aceite	Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción. Colocar letreros advirtiendo de la presencia de equipos y superficies a altas temperaturas. Instalar sistemas para vigilar la concentración de monóxido de carbono. Instalar sistemas adecuados de lucha contra incendios.
Metalización	Riesgo de quemaduras por metales y equipos a altas temperaturas; posibles atmósferas explosivas de polvo, acetileno; fiebre por vapores metálicos de zinc	Instalar sistemas adecuados de lucha contra incendios. Separar correctamente los productos químicos y los gases. Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción.
Fosfatado	Quemaduras e irritación por productos químicos cáusticos y corrosivos	Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción.
Recubrimiento con plásticos	Exposición a sensibilizantes químicos	Buscar alternativas a los sensibilizantes. Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción.
Imprimación	Exposición a diversos disolventes potencialmente tóxicos e inflamables, exposición a sensibilizantes químicos, exposición a cromo potencialmente cancerígeno	Buscar alternativas a los sensibilizantes. Usar equipo de protección personal adecuado. Instalar un sistema eficaz de ventilación por extracción. Separar correctamente los productos químicos y los gases.

sumergen en ácido sulfúrico diluido. Sin embargo, en lugar de formarse iones de aluminio positivos y de migrar para depositarse en el cátodo, se oxidan con los átomos de oxígeno liberados en el ánodo y se unen a éste formando una capa de óxido. Esta capa es disuelta en parte por la disolución de ácido sulfúrico, con lo que la superficie se hace porosa. A continuación, pueden depositarse en estos poros materiales coloreados o fotosensibles, como por ejemplo en la fabricación de placas de características.

### Esmaltes y vidriados

El esmalte vítreo o de porcelana se utiliza para aplicar un recubrimiento muy resistente al calor, las manchas y la corrosión a determinados metales, normalmente hierro o acero, en una gran variedad de productos, como bañeras, cocinas eléctricas y de gas, menaje de cocina, depósitos y recipientes de almacenamiento, y equipos eléctricos. También se utilizan esmaltes para la decoración de artículos de vidrio y cerámica, joyería y objetos de adorno. El uso especializado de esmaltes en polvo para la

producción de prestigiosos objetos ornamentales como los de Cloisonné y Limoges, se conoce desde hace siglos. Los recubrimientos vitrificados se aplican a todo tipo de objetos de alfarería.

Para la fabricación de esmaltes y vidriados se utilizan, entre otros, los siguientes materiales:

- refractarios, como cuarzo, feldespato y arcilla
- fundentes, como borax (borato sódico decahidratado), ceniza de sosa (carbonato sódico anhidro), nitrato sódico, espato flúor, criolita, carbonato de bario, carbonato de magnesio, monóxido de plomo, tetraóxido de plomo y óxido de zinc
- colores, como óxidos de antimonio, cadmio, cobalto, hierro, níquel, manganeso, selenio, vanadio, uranio y titanio
- opacificantes, como óxidos de antimonio, titanio, estaño y circonio, y antimoniato sódico
- electrolitos, como bórax, ceniza de sosa, carbonato y sulfato de magnesio, nitrito sódico y aluminato sódico
- floculantes, como arcilla, gomas, alginato de amonio, bentonita y sílice coloidal.

El primer paso en todos los tipos de esmaltado vítreo o vidriado consiste en la confección de la frita, o polvo de esmalte. Esto comprende la preparación de las materias primas, su fusión y la aplicación de la frita.

Tras una cuidadosa limpieza de los productos metálicos (por ejemplo, mediante chorro de granalla, baño decapante, desengrasado), puede aplicarse el esmalte por varios procedimientos:

- En el proceso en húmedo, se sumerge el objeto en el baño acuoso de esmalte, se extrae de él y se deja escurrir, o bien, en el “slushing”, el baño de esmalte es más grueso y debe sacudirse para desprenderlo del objeto.
- En el proceso en seco el objeto, una vez imprimado, se calienta hasta la temperatura de esmaltado y después se espolvorea con esmalte tamizado. El esmalte se sinteriza sobre el objeto y, cuando éste es devuelto al horno, se funde y adquiere una superficie suave.
- Cada vez se utiliza más la aplicación por pulverización, normalmente en una operación mecanizada para la que se requiere una cabina ventilada por extracción.
- Los esmaltes decorativos suelen aplicarse a mano, utilizando pinceles o utensilios similares.
- Los esmaltes vítreos para artículos de loza y porcelana se aplican generalmente por inmersión o pulverización. Aunque algunas operaciones de inmersión están empezando a mecanizarse, en la industria de la porcelana doméstica normalmente las piezas se sumergen a mano. Se sostiene el objeto en la mano, se le sumerge en una cuba de vidriado de grandes dimensiones, se elimina el exceso de esmalte con un giro de muñeca y se coloca el objeto en un secador. Para pulverizar el esmalte debe utilizarse una campana o cabina cerrada provista de un eficaz sistema de ventilación por extracción.

A continuación, los objetos preparados se “cuecen” en un horno o estufa, normalmente caldeados con gas.

### **Mordentado**

El ataque químico produce un acabado mate o satinado. Casi siempre se utiliza como tratamiento previo al anodizado, lacado, recubrimiento de conversión, pulido o abrillantado químico. Normalmente se aplica al aluminio y al acero inoxidable, aunque también se utiliza para muchos otros metales.

El aluminio se ataca normalmente con disoluciones alcalinas que contienen diversas mezclas de hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, fosfato trisódico y carbonato de sodio, junto con otros ingredientes para evitar la formación de escoria. En uno de los procesos más comunes se emplea hidróxido de sodio en una concentración de 10 a 40 g/l; la disolución se mantiene a una temperatura de 50 a 85 °C y la inmersión puede durar hasta 10 minutos.

El ataque alcalino va normalmente precedido y seguido de un tratamiento en diversas mezclas de ácido clorhídrico, fluorhídrico, nítrico, fosfórico, crómico o sulfúrico. El tratamiento típico con ácido consiste en inmersiones de 15 a 60 segundos en una mezcla de tres partes en volumen de ácido nítrico y una parte en volumen de ácido fluorhídrico, mantenida a una temperatura de 20 °C.

### **Galvanizado**

El galvanizado consiste en aplicar un recubrimiento de zinc a diversos productos de acero para protegerlos de la corrosión. Para que el recubrimiento se adhiera correctamente, el producto debe estar limpio y libre de óxido, lo que normalmente requiere varios procesos de limpieza, lavado, secado o recocido antes de que el producto entre en el baño de galvanizado. En el galvanizado por inmersión en baño caliente el producto se hace pasar por un

baño de zinc en fusión; el galvanizado “en frío” es, en esencia, un recubrimiento electrolítico como el descrito anteriormente.

Normalmente, los productos fabricados se galvanizan en un proceso por lotes, mientras que para fleje, chapa o alambre de acero, se utiliza el método de banda continua. Puede emplearse fundente para mantener un grado satisfactorio de limpieza tanto del producto como del baño de zinc y facilitar el secado. A veces se utiliza un paso previo de aplicación de fundente seguido de un recubrimiento con fundente de cloruro de amonio en la superficie del baño de zinc, y otras se aplica únicamente este último recubrimiento. Para galvanizar tuberías se sumerge la tubería en una disolución caliente de cloruro amónico de zinc después de limpiarla y antes de introducirla en el baño de zinc fundido. Los fundentes se descomponen y forman gases irritantes de cloruro de hidrógeno y amoníaco, lo que hace necesario utilizar ventilación local por extracción.

Los distintos tipos de galvanizado continuo por inmersión en caliente difieren básicamente en la forma de limpiar el producto y en si la limpieza se realiza durante el proceso.

- limpieza por oxidación a la llama de los aceites de la superficie, con reducción subsiguiente en el horno y recocido dentro del proceso.
- limpieza electrolítica antes del recocido, dentro del proceso.
- limpieza en baño ácido y limpieza alcalina, utilizando un fundente antes de pasar al horno precalentado y recociendo en un horno antes del galvanizado
- limpieza en baño ácido y limpieza alcalina, eliminando el fundente y precalentando en un gas reductor (por ej., hidrógeno) antes del galvanizado.

En la cadena de galvanizado continuo de fleje o banda de acero de poco espesor, se omite el baño ácido y el uso de fundente; se utiliza limpieza alcalina y se mantiene limpia la superficie del fleje calentándola en una cámara o un horno bajo atmósfera reductora de hidrógeno hasta que pasa bajo la superficie del baño de zinc fundido.

El galvanizado continuo de alambre requiere fases de recocido, que normalmente se aplican en una cubeta de plomo fundido situada delante de los tanques de limpieza y galvanizado; enfriamiento al aire o con agua; baño decapante de ácido clorhídrico diluido caliente; lavado; aplicación de un fundente; secado, y después galvanizado en el baño de zinc fundido.

En el fondo del baño de zinc fundido se deposita una espuma constituida por una aleación de hierro y zinc, que hay que retirar periódicamente. Diversos tipos de materiales se hacen flotar en la superficie del baño de zinc para evitar la oxidación del zinc fundido. En los puntos de entrada y salida del alambre o el fleje que se galvanizan se requiere un despumado frecuente.

### **Termotratamiento**

El termotratamiento, o proceso de calentamiento y enfriamiento de un metal en estado sólido, es generalmente una parte del proceso de los productos metálicos. Casi siempre implica un cambio en la estructura cristalina del metal, que se traduce en una modificación de sus propiedades (por ej., recocido para hacer el metal más maleable, calentamiento y lento enfriamiento para reducir la dureza, calentamiento y temple para aumentarla, calentamiento a baja temperatura para reducir al mínimo las tensiones internas).

### **Recocido**

El recocido es un tratamiento térmico de “ablandamiento” muy utilizado para facilitar el trabajo en frío del metal, mejorar la mecanizabilidad, eliminar las tensiones del producto antes de que se utilice, etc. Consiste en calentar el metal hasta una temperatura específica, mantenerlo a esa temperatura durante un

intervalo de tiempo preestablecido y permitir que se enfríe a una determinada velocidad. Se utilizan varias técnicas de recocido:

- *Recocido azul*, en el que se forma una capa de óxido azul en la superficie de aleaciones a base de hierro
- *Recocido brillante*, que se lleva a cabo en una atmósfera controlada para reducir al mínimo la oxidación superficial
- *Recocido en horno cerrado o en caja cerrada*, un método en el que tanto los metales férreos como los no férreos se calientan en un recipiente metálico herméticamente cerrado, con o sin empaquetadura, y después se dejan enfriar lentamente
- *Recocido completo o de regeneración*, el cual se realiza normalmente en una atmósfera protectora y tiene por objeto la obtención de la máxima ductilidad económicamente posible
- *Maleabilización*, una clase especial de recocido que se aplica a piezas de fundición de hierro para hacerlas maleables transformando el carbono combinado en el hierro en carbono fino (es decir, grafito)
- *Recocido parcial*, un proceso a baja temperatura para eliminar tensiones internas inducidas en el metal por trabajo en frío
- *Recocido subcrítico o "esferoidización"*, que mejora la mecanizabilidad al permitir que el carburo de hierro de la estructura cristalina adquiera una forma esferoidal.

#### Endurecimiento por envejecimiento

Este es un proceso frecuentemente utilizado en las aleaciones de cobre-aluminio en las cuales el endurecimiento natural que tiene lugar en la aleación se acelera por calentamiento a unos 180 °C durante una hora aproximadamente.

#### Homogenización

Este es un tratamiento que se aplica generalmente a lingotes o productos compactos de polvo de metal y tiene por objeto eliminar o reducir en gran parte la segregación. Se consigue por calentamiento a unos 20 °C por debajo de la temperatura de fusión del metal durante dos horas o más, y después enfriando bruscamente.

#### Normalizado

Proceso similar al recocido completo o de regeneración. Garantiza la uniformidad de las propiedades mecánicas deseadas y produce mayor tenacidad y resistencia a la carga mecánica.

#### Temple isotérmico

Tipo especial de proceso de recocido que se aplica generalmente a material de sección transversal pequeña el cual ha de estirarse, por ejemplo, alambre de acero de 0,6 % de carbono. El metal se calienta en un horno ordinario por encima de la temperatura de transformación y después se pasa directamente del horno, por ejemplo a un baño de plomo mantenido a una temperatura de unos 170 °C.

#### Endurecimiento por temple y revenido

En una aleación a base de hierro puede conseguirse un aumento de dureza calentando por encima de la temperatura de transformación y enfriando rápidamente a la temperatura ambiente en aceite, agua o aire. Frecuentemente la pieza queda sometida a tensiones internas demasiado elevadas para utilizarla en ese estado por lo que, con objeto de incrementar su tenacidad, se la somete a un revenido calentándola a una temperatura por debajo de la gama de transformación y permitiendo que se enfríe a la velocidad deseada.

El martemple y el austemple son procesos similares, excepto que la pieza se enfría, por ejemplo, en un baño de sal o de plomo mantenido a una temperatura de 400 °C.

#### Endurecimiento superficial y cementación

Este es otro proceso de termotratamiento aplicado frecuentemente a las aleaciones a base de hierro, que permite que la superficie del objeto sea dura, mientras que el núcleo permanece relativamente dúctil. El proceso tiene las siguientes variantes:

- *Endurecimiento a la llama*: consiste en endurecer las superficies del objeto, por ejemplo dientes de engranajes, cojinetes, guías, etc., calentándolas con un soplete de gas a alta temperatura y enfriándolas en aceite, agua u otro medio adecuado.
- *Endurecimiento por inducción eléctrica*: es similar al endurecimiento a la llama, excepto que el calentamiento es producido por corrientes parásitas inducidas en las capas superficiales.
- *Cementación*: incrementa el contenido de carbono de la superficie de una aleación a base de hierro calentando la pieza en un medio sólido, líquido o gaseoso, tal como carbón vegetal y carbonato de bario, cianuro de sodio líquido y carbonato de sodio, monóxido de carbono gaseoso, metano, etc., a una temperatura de unos 900 °C.
- *Nitruración*: incrementa el contenido de nitrógeno de la superficie de una pieza de hierro colado o acero de baja aleación especial por calentamiento en un medio nitrogenado, generalmente gas amoníaco, a unos 500-600 °C.
- *Cianuración*: es un método de cementación en el cual la composición superficial de una pieza de acero de bajo contenido en carbono se enriquece simultáneamente tanto en carbono como en nitrógeno. Generalmente consiste en el calentamiento de la pieza en un baño de cianuro de sodio fundido al 30 % a una temperatura de -870 °C durante una hora, seguido de enfriamiento en aceite o agua.
- *Carbonitruración*: se trata de un proceso gaseoso para la absorción simultánea de carbono y nitrógeno en la capa superficial del acero calentándolo a una temperatura de 800 a 875 °C en una atmósfera de gas cementante (véase anteriormente) y un gas nitrificante, por ejemplo 2-5 % de amoníaco anhidro.

#### Metalización

La metalización, o rociado de metal, es una técnica para aplicar una capa metálica protectora a una superficie desbastada mecánicamente rociándola con gotas de metal fundido. También se utiliza para recrecer superficies desgastadas o corroídas y recuperar piezas de componentes mal mecanizadas. El proceso se denomina generalmente "Schooping" en honor de su inventor, el Dr. Schoop.

El equipo de metalización consiste en la llamada pistola "Schooping", una pistola de pulverización de mano a través de la cual el metal, en forma de alambre, se alimenta a un soplete de gas combustible y oxígeno que lo funde y, una vez fundido en esta forma, se pulveriza sobre la pieza por medio de una corriente de aire comprimido. La fuente de calor es una mezcla de oxígeno y acetileno, propano o gas natural comprimido. Generalmente el alambre, enrollado en espiral, se endereza antes de ser alimentado a la pistola. Para esta técnica puede utilizarse cualquier metal que pueda estirarse en forma de alambre; la pistola puede aceptar también el metal en forma de polvo en lugar de alambre.

#### Fosfatado

Este proceso se aplica principalmente al acero dulce y galvanizado y al aluminio, para aumentar la adhesión y la resistencia a la corrosión de la pintura, cera o aceite. También se utiliza para formar una capa que actúa como una película de separación en la embutición profunda de planchas y mejora su resistencia al desgaste. El tratamiento consiste esencialmente en permitir que la superficie del metal reaccione con una disolución de uno o más fosfatos de hierro, zinc, manganeso, sodio o amonio. Las

disoluciones de fosfato sódico y amónico se usan para tratamientos mixtos de limpieza y fosfatado. La necesidad de fosfatar piezas multimetálicas y el deseo de aumentar la velocidad de las líneas de producción en las operaciones automatizadas han determinado la necesidad de reducir los tiempos de reacción mediante la adición de aceleradores, tales como fluoruros, cloratos, molibdatos y compuestos de níquel a las disoluciones de fosfatación. Para reducir el tamaño de los cristales y, en consecuencia, aumentar la flexibilidad de los recubrimientos de fosfato de zinc, se añaden afinadores de cristales, tales como el fosfato de zinc terciario o el fosfato de titanio, al baño de lavado previo a la fosfatación. Las etapas de este proceso son las siguientes:

- limpieza con sosa cáustica caliente
- cepillado y lavado
- nueva limpieza con sosa cáustica caliente
- lavado en baño de agua de acondicionamiento
- rociado o inmersión en disoluciones calientes de fosfatos ácidos
- lavado con agua fría
- lavado con ácido crómico templado
- nuevo lavado con agua fría
- secado.

### **Imprimación**

Las imprimaciones de pinturas orgánicas se aplican a las superficies metálicas para mejorar la adhesión de pinturas a aplicar posteriormente y de retardar la corrosión en la interfase pintura-metal. Las imprimaciones normalmente contienen resinas, pigmentos y disolventes, y pueden aplicarse a la superficie del metal, previamente preparada, por medio de brocha, pistola, inmersión, recubrimiento con rodillo o por electroforesis.

Los disolventes pueden ser cualquier combinación de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, cetonas, ésteres, alcoholes y éteres. Las resinas corrientemente utilizadas son butinol de polivinilo, resinas fenólicas, alquidos de aceite secantes, aceites epoxidicos, ésteres de epóxido, silicatos de etilo y gomas cloradas. En algunas imprimaciones complejas se utilizan corrientemente agentes de enlace tales como la pentamina de tetraetileno, hexamina de pentaetileno, isocianatos y urea-formol. En la composición de imprimaciones se emplean ciertos pigmentos inorgánicos, como compuestos de plomo, bario, cromo, zinc y calcio, entre otros.

### **Recubrimiento con plásticos**

El recubrimiento de metales con plásticos puede aplicarse en forma líquida, en forma de polvos que después de vulcanizan o sinterizan por calentamiento, o bien como láminas prefabricadas que se aplican a la superficie del metal con un adhesivo. Los plásticos más corrientemente utilizados son el polietileno, poliamidas (nylon) y PVC (cloruro de polivinilo). En el último se pueden incluir los plastificantes basados en ésteres y estabilizadores monoméricos y poliméricos tales como carbonatos de plomo, sales ácidas grasas de bario y cadmio, dilaurato dibutilico de estaño, mercáptidos alquílicos de estaño y fosfato de zinc. Aunque la mayor parte de los plásticos utilizados son de baja toxicidad y no son irritantes, algunos de los plastificantes son sensibilizadores de la piel.

### **Riesgos y su prevención**

Como fácilmente puede deducirse de la complejidad de los procesos antes esbozados, el tratamiento de superficie de los metales entraña una gran variedad de riesgos para la seguridad y la salud. Muchos de ellos se presentan normalmente en las operaciones de fabricación, mientras que otros provienen de la exclusividad de las técnicas y materiales utilizados. Algunos

representan una amenaza para la vida, no obstante, la mayoría pueden prevenirse o controlarse.

### **Diseño del lugar de trabajo**

El lugar de trabajo debe diseñarse de manera que permita la entrega de las materias primas y suministros y la retirada de los productos acabados sin entorpecer el proceso en curso. Dado que la mayoría de los productos químicos son inflamables o propensos a reaccionar cuando se mezclan entre sí, es esencial mantenerlos debidamente separados tanto durante el almacenamiento como durante el transporte. Muchas de las operaciones de acabado de metales implican el empleo de líquidos, y cuando se producen fugas, derrames o salpicaduras de ácidos o álcalis deben eliminarse rápidamente mediante lavado. Por la misma razón, deben preverse suelos antideslizantes y con un adecuado sistema de drenaje. Se deberá observar una escrupulosa limpieza para mantener las zonas de trabajo y otras áreas limpias y libres de acumulaciones de material. Los sistemas de eliminación de residuos y efluentes sólidos y líquidos procedentes de los hornos y los extractores de ventilación, deberán diseñarse teniendo en cuenta los aspectos ambientales.

Los puestos de trabajo y las tareas deberían basarse en principios ergonómicos para reducir las tensiones, tirones musculares, fatiga excesiva y lesiones por esfuerzo repetitivo. Las defensas de las máquinas deberán tener un sistema de bloqueo automático que desconecte la alimentación eléctrica de la máquina si se retira la defensa. Las protecciones contra salpicaduras son esenciales. Habida cuenta del peligro de salpicaduras de disoluciones ácidas y alcalinas calientes deberán instalarse cerca fuentes para lavados oculares y duchas de cuerpo fácilmente accesibles. Se colocarán letreros de aviso para alertar a otros miembros del personal de producción y mantenimiento sobre riesgos tales como baños químicos y superficies calientes.

### **Evaluación de productos químicos**

Deberá evaluarse el potencial de toxicidad y riesgos físicos de todos los productos químicos, y éstos deberán sustituirse por otros menos peligrosos siempre que sea posible. No obstante, dado que el material menos tóxico puede ser más inflamable, también se tendrán en cuenta los riesgos de incendio y explosión. Asimismo se deberá considerar la compatibilidad química de los materiales. Por ejemplo, la mezcla accidental de nitrato y sales de cianuro puede ocasionar una explosión debido a las propiedades fuertemente oxidantes de los nitratos.

### **Ventilación**

La mayoría de los procesos de recubrimiento de metales requieren una ventilación por extracción local estratégicamente situada para aspirar los vapores u otros contaminantes y alejarlos del trabajador. Algunos sistemas inyectan aire fresco a través del tanque para "empujar" a los contaminantes atmosféricos hacia el lado de evacuación del sistema. Las entradas de aire fresco deben estar situadas lejos de las salidas de ventilación para evitar el reciclaje de gases potencialmente tóxicos.

### **Equipo de protección personal**

Los procesos deben estar estudiados para prevenir exposiciones potencialmente tóxicas, pero dado que éstas no siempre pueden evitarse totalmente, se deberá proporcionar a los trabajadores equipos de protección personal adecuados, tales como gafas de montura ajustada con o sin pantallas faciales según se requiera, guantes, monos o mandiles y zapatos. Dado que muchas de las exposiciones tienen que ver con disoluciones corrosivas o cáusticas calientes, los elementos protectores deberán estar aislados y ser resistentes a los productos químicos. Si existe riesgo de exposición eléctrica, los equipos de protección personal deberán ser

eléctricamente no conductores. Estos equipos deberán estar disponibles en cantidad adecuada para permitir que los elementos contaminados húmedos se limpien y sequen antes de que se utilicen de nuevo. Cuando exista riesgo de quemaduras térmicas por metales calientes, hornos, etc., se deberá contar con guantes aislados y otras prendas protectoras.

Un importante complemento es la disponibilidad de instalaciones para lavado y taquillas limpias en los vestuarios, para que la ropa de los trabajadores permanezca libre de contaminación y éstos no se lleven a casa materiales tóxicos.

### **Formación y supervisión de los trabajadores**

La educación y formación de los trabajadores son esenciales tanto cuando éstos son nuevos en el puesto de trabajo como cuando se han introducido cambios en el equipo o el proceso. Se deberán facilitar fichas técnicas de seguridad (FTS) de cada uno de los productos químicos que expliquen los riesgos químicos y físicos en idiomas y niveles educativos que garanticen su comprensión por los trabajadores. Las pruebas de cualificación y la formación de reconversión profesional periódica permitirán asegurarse de que los trabajadores han retenido la información necesaria. Es aconsejable una estrecha supervisión para asegurarse de que se están siguiendo los procedimientos correctos.

### **Riesgos especiales**

Ciertos riesgos son exclusivos del sector de recubrimiento de metales y merecen por ello una consideración especial.

#### **Disoluciones ácidas y alcalinas**

Las disoluciones ácidas y alcalinas calientes utilizadas para la limpieza y tratamiento de metales son particularmente cáusticas y corrosivas. Irritan la piel y las mucosas y son especialmente peligrosas cuando se producen salpicaduras que afectan a los ojos. Es esencial contar con fuentes para lavados oculares y duchas de emergencia. El uso de ropa protectora y gafas de montura ajustada proporcionará protección frente a las inevitables salpicaduras; cuando éstas afecten a la piel se deberá lavar inmediata y abundantemente la zona afectada con agua fría y limpia durante 15 minutos como mínimo; puede ser necesario recibir atención médica, sobre todo si han resultado afectados los ojos.

Se deberán tomar precauciones al utilizar hidrocarburos clorados, ya que puede formarse fosgeno al reaccionar éstos con ácidos y metales. Los ácidos nítrico y fluorhídrico son especialmente peligrosos cuando se inhalan sus gases, porque sus efectos en los pulmones pueden tardar 4 horas o más en manifestarse. Puede aparecer tardíamente bronquitis, neumonía e incluso edema pulmonar potencialmente letal en un trabajador en el que aparentemente la exposición no había producido ningún efecto al principio. Es aconsejable un tratamiento médico profiláctico inmediato y, con frecuencia, la hospitalización de los trabajadores expuestos. El contacto de la piel con ácido fluorhídrico puede ocasionar graves quemaduras sin dolor durante varias horas. Es esencial recibir atención médica con prontitud.

#### **Polvo**

El polvo metálico y de óxido constituye un problema especialmente grave en las operaciones de esmerilado y pulido, y lo más eficaz para su eliminación es la ventilación local por extracción en el punto en que se produce. Los conductos de extracción deben diseñarse de forma que favorezcan un flujo suave y la velocidad del aire debe ser suficiente para impedir que las partículas se separen de la corriente de ventilación. El polvo de aluminio y de magnesio puede ser explosivo, por lo que debe recogerse en una trampa húmeda. El problema del plomo ha disminuido al reducirse su empleo en la cerámica y los esmaltes de porcelana,

pero sigue siendo un riesgo profesional generalizado contra el que siempre deben tomarse precauciones. El berilio y sus compuestos han suscitado interés recientemente debido a su posible carcinogenicidad y al riesgo de beriliosis crónica.

Ciertas operaciones, tales como la calcinación, machaqueo y secado de pedernal, cuarzo o piedra; el cribado, mezcla y pesaje de estas sustancias en estado seco y la carga de hornos con tales materiales, entrañan riesgo de silicosis y neumoconiosis. Los citados materiales representan también un peligro cuando se utilizan en procesos en fase húmeda y salpican el lugar de trabajo y la ropa de los trabajadores, convirtiéndose de nuevo en polvo cuando se secan. Las principales medidas preventivas son los sistemas de ventilación local por extracción, una limpieza escrupulosa y una adecuada higiene personal.

#### **Disolventes orgánicos**

Los disolventes y otros productos químicos orgánicos utilizados en ciertos procesos, como el desengrasado, son peligrosos cuando se inhalan. En la fase aguda, sus efectos narcóticos pueden conducir a una parálisis respiratoria y provocar la muerte. En la exposición crónica, sus efectos más frecuentes son la toxicidad para el sistema nervioso central y las lesiones hepáticas y renales. Como protección deben utilizarse sistemas de ventilación local por extracción con una zona de seguridad de 80 a 100 cm como mínimo entre la fuente y la zona de respiración del trabajador. También deben instalarse sistemas de ventilación en los bancos de trabajo para eliminar los vapores residuales de las piezas terminadas. El desengrasado de la piel por disolventes orgánicos puede ser precursor de dermatitis. Muchos disolventes también son inflamables.

#### **Cianuro**

En el desengrasado electrolítico, el recubrimiento electrolítico y la cianuración se utilizan con frecuencia baños que contienen cianuros los cuales, al reaccionar con el ácido, forman ácido cianhídrico (ácido prúsico), un producto volátil y potencialmente letal. La concentración letal en el aire es de 300 a 500 ppm. También pueden producirse exposiciones mortales por absorción a través de la piel o ingestión de cianuros. Es esencial que los trabajadores que utilizan cianuro observen una escrupulosa limpieza. No se deberá comer sin haberse lavado antes y nunca deberá haber alimentos en la zona de trabajo. Después de una posible exposición accidental a cianuro, deberán lavarse cuidadosamente las manos y la ropa.

Las medidas de primeros auxilios en caso de envenenamiento por cianuro consisten en llevar a la víctima al aire libre, quitarle la ropa contaminada, lavar abundantemente con agua las zonas afectadas, oxigenoterapia e inhalación de nitrito de amilo. Son esenciales la ventilación local por extracción y una adecuada protección de la piel.

#### **Cromo y níquel**

Los compuestos de cromo y níquel utilizados en los baños galvanicos para recubrimiento electrolítico pueden ser peligrosos. Los compuestos de cromo pueden causar quemaduras, ulceración y eccema de la piel y las mucosas, así como una perforación característica del tabique nasal. También puede producirse asma bronquial. Las sales de níquel pueden causar lesiones de la piel alérgicas o tóxico-irritativas rebeldes. Existen pruebas de que tanto los compuestos de cromo como los de níquel pueden ser cancerígenos. Son esenciales la ventilación local por extracción y una adecuada protección de la piel.

#### **Hornos y estufas**

Es necesario adoptar precauciones especiales cuando se trabaja con hornos como los que se utilizan, por ejemplo, en el

termotratamiento de metales, donde se manipulan componentes a elevadas temperaturas y los materiales utilizados en el proceso pueden ser tóxicos o explosivos, o ambas cosas a la vez. Los medios gaseosos (atmósferas) del horno pueden reaccionar con la carga de metal (atmósferas oxidantes o reductoras) o pueden ser neutros y protectores. La mayoría de estos últimos contienen hasta el 50 % de hidrógeno y el 20 % de monóxido de carbono que, además de ser combustibles, forman mezclas altamente explosivas con el aire a elevadas temperaturas. La temperatura de ignición varía entre 450 y 750 °C, pero una chispa local puede provocar la ignición incluso a temperaturas inferiores. El peligro de explosión es mayor durante el encendido y el apagado del horno. Dado que un horno tiende a aspirar aire mientras se enfría (lo que supone un riesgo especial cuando se interrumpe la alimentación de combustible o energía eléctrica), debería contarse con el suministro de un gas inerte, por ejemplo nitrógeno o dióxido de carbono para utilizarlo con fines de purga cuando se apague el horno o se inyecte una atmósfera protectora en un horno caliente.

El monóxido de carbono es quizá el mayor de los riesgos que presentan los hornos y estufas. Al ser incoloro e inodoro, con frecuencia alcanza niveles tóxicos antes de que el operario se aperciba de ello. El dolor de cabeza es uno de los primeros síntomas de toxicidad, por lo tanto, si un operario experimenta dolor de cabeza durante el trabajo deberá trasladarse inmediatamente al aire libre. Entre las zonas de peligro están los huecos en los que puede acumularse monóxido de carbono; debe recordarse que la obra de ladrillo es porosa y puede retener el gas durante la purga normal y emitirlo al terminar ésta.

Los hornos de plomo pueden ser peligrosos, ya que el plomo tiende a evaporarse con gran rapidez a temperaturas superiores a 870 °C. Por lo tanto, se requiere un sistema eficaz de extracción de humos. También puede ser peligrosa la rotura o el fallo de una cuba, por lo que deberá haber un pozo o un foso de suficiente capacidad para recoger el metal fundido si sucediese esto.

### Incendio y explosión

Muchos de los compuestos utilizados en el recubrimiento de metales son inflamables y, en ciertas circunstancias, explosivos. La mayoría de los hornos y estufas de secado son de alimentación por gas, por lo que deben adoptarse precauciones especiales, como la instalación de dispositivos de seguridad contra apagado de llama en los quemadores, válvulas de corte por baja presión en las tuberías de suministro y paneles de seguridad contra explosiones en la estructura de las estufas. En las operaciones electrolíticas, el hidrógeno formado en el proceso puede acumularse en la superficie del baño y, si no es evacuado, puede alcanzar concentraciones explosivas. Los hornos deben ventilarse adecuadamente y los quemadores protegerse contra la obstrucción por goteo de material.

También el temple en aceite entraña riesgo de incendio, sobre todo si la carga de metal no se sumerge completamente. Los aceites de temple deberán tener un punto de inflamabilidad elevado, y su temperatura no deberá exceder de 27 °C.

Las botellas de oxígeno y gas combustible comprimidos que se utilizan en el metalizado presentan riesgos de incendio y explosión si no se almacenan y utilizan correctamente. Véase el artículo "Soldadura y corte térmico" en este capítulo, donde se indican con detalle las precauciones necesarias.

Cuando así lo requieran las ordenanzas locales, deberá proveerse y mantenerse en perfecto estado de funcionamiento un equipo adecuado de lucha contra incendios, alarmas incluidas, y se deberá instruir a los trabajadores en su correcta utilización.

### Calor

El uso de hornos, llamas libres, estufas, disoluciones calientes y metales fundidos presenta inevitablemente el riesgo de una exposición excesiva al calor, que se ve agravada en los climas calurosos y húmedos y, en especial, por las prendas y equipos protectores oclusivos. La instalación de un sistema de acondicionamiento de aire para toda una planta puede no ser económicamente viable, pero puede ser útil suministrar aire refrigerado a través de los sistemas de ventilación local. Los descansos en ambientes frescos y una ingesta de líquidos adecuada (los líquidos que se tomen en el puesto de trabajo deberán estar libres de contaminantes tóxicos) ayudará a prevenir la toxicidad del calor. Se deberá enseñar tanto a los trabajadores como a sus supervisores a reconocer los síntomas del estrés por calor.

### Conclusión

El tratamiento de superficie de los metales implica múltiples procesos que entrañan una amplia gama de exposiciones potencialmente tóxicas, la mayoría de las cuales pueden evitarse o controlarse mediante la aplicación diligente de medidas preventivas generalmente reconocidas.

## RECUPERACION DE METALES

*Melvin E. Cassady  
y Richard D. Ringenwald, Jr.*

La recuperación de metales es el proceso consistente en producir metales a partir de chatarra. Estos metales recuperados no se diferencian en nada de los obtenidos mediante el procesado primario de un mineral del metal. Sin embargo, el proceso es ligeramente distinto y la exposición puede ser también diferente. Los controles técnicos son básicamente los mismos. La recuperación de metales es muy importante para la economía mundial dado el progresivo agotamiento de las materias primas y la contaminación del medio ambiente por los materiales de la chatarra.

El aluminio, cobre, plomo y zinc representan el 95 % de la producción de la industria de los metales no féreos recuperados. También se recuperan magnesio, mercurio, níquel, metales preciosos, cadmio, selenio, cobalto, estaño y titanio (el hierro y el acero se tratan en el capítulo *Siderurgia*. Véase también el artículo "Fundición y afino del cobre, plomo y zinc" en este capítulo).

### Estrategias de control

#### *Principios de control de las emisiones y exposiciones*

La recuperación de metales implica exposiciones a polvo, humos, disolventes, ruido, calor, neblinas ácidas y otros riesgos y materiales potencialmente peligrosos. Puede haber algunas modificaciones viables de los procesos y la manipulación de materiales que eliminen o reduzcan la generación de emisiones, por ejemplo reducir la manutención, rebajar las temperaturas de las cubas, disminuir la formación de impurezas y la generación de polvo en la superficie, y modificar la configuración de la planta para reducir la manipulación de materiales o la agitación del polvo depositado.

En algunos casos es posible reducir la exposición eligiendo máquinas que realicen las tareas de alto riesgo para que no sea necesaria la presencia de operarios en la zona. Esto puede servir también para reducir riesgos ergonómicos debidos a la manipulación de materiales.

Con el fin de evitar la contaminación cruzada de las zonas limpias de la planta, es conveniente aislar los procesos que



generan emisiones significativas. Una barrera física contendrá las emisiones y reducirá su dispersión. De ese modo, habrá menos personas expuestas y disminuirá el número de fuentes de emisiones que contribuyen a la exposición en las distintas áreas. Esto simplifica las evaluaciones de la exposición y permite determinar y controlar más fácilmente sus fuentes principales. Con frecuencia, las operaciones de recuperación están aisladas del resto de las operaciones de la planta.

A veces es posible confinar o aislar una fuente de emisiones específica. Como los recintos de confinamiento rara vez son herméticos, suele aplicárseles un sistema de extracción por corriente de aire negativa. Una de las formas más corrientes de controlar emisiones es proporcionar ventilación local por extracción en el punto en que se generan las emisiones. Al capturar las emisiones en el lugar donde se originan disminuye el riesgo de que se dispersen en el aire y se evita la exposición secundaria de los operarios por agitación de contaminantes ya depositados.

La velocidad de captura de una campana extractora deberá ser lo bastante grande como para impedir que los humos o el polvo escapen del flujo de aire aspirado por la campana. Dicho flujo deberá tener suficiente velocidad para llevar el humo y las partículas de polvo hasta la campana y vencer los efectos perturbadores de las corrientes transversales y otros movimientos aleatorios del aire. La velocidad necesaria para ello dependerá del tipo de aplicación. Debe restringirse el uso de calentadores de recirculación y ventiladores de refrigeración personal, ya que pueden imponerse a la ventilación local por extracción.

Todos los sistemas de ventilación por extracción o dilución necesitan renovación de aire, por lo que se les conoce también como sistemas de aire de relleno. Si un sistema de este tipo está bien diseñado e integrado en los sistemas de ventilación natural y de confort, cabe esperar un control más eficaz de las exposiciones. Por ejemplo, las salidas de renovación de aire deben colocarse de manera que el aire limpio fluya desde ellas a través de los operarios hacia la fuente de emisiones y desde ésta al sistema de extracción. Esta técnica se utiliza con frecuencia en las islas con admisión de aire puro y con ella el operario queda situado entre el aire limpio entrante y la fuente de emisiones.

Las llamadas zonas limpias se aseguran mediante el control directo de las emisiones y planes de limpieza y mantenimiento. El ambiente de estas zonas registra bajos niveles de contaminantes. A los trabajadores de las zonas contaminadas puede protegerse mediante cabinas de servicio con admisión de aire puro, islas, casetas elevadas de vigilancia y salas de control, complementadas con protección respiratoria personal.

La exposición media diaria de los trabajadores puede reducirse poniendo a su disposición zonas limpias tales como salas de descanso y comedores con alimentación de aire fresco filtrado. La exposición media a los contaminantes ponderada en el tiempo de los trabajadores puede reducirse si estos pasan algún tiempo en una zona relativamente libre de contaminantes. Otra conocida aplicación de este principio es la isla con admisión de aire puro, en la que se suministra aire fresco filtrado a la zona de respiración del operario en su puesto de trabajo.

Deberá preverse espacio suficiente para campanas extractoras, conductos de aire, salas de control, actividades de mantenimiento, limpieza y almacenamiento de equipos.

Los vehículos con ruedas son fuentes importantes de emisiones secundarias. Donde se utilice el transporte por medio de este tipo de vehículos, pueden reducirse las emisiones pavimentando todas las superficies, manteniendo éstas libres de acumulaciones de materiales polvorientos, reduciendo la longitud de los trayectos y la velocidad de los vehículos y reconduciendo el escape de los vehículos y la descarga de los ventiladores de refrigeración. Se deberá elegir un material de pavimentación apropiado, por ejemplo hormigón, después

de considerar factores tales como la carga, utilización y conservación de la superficie. A algunas superficies pueden aplicárseles recubrimientos para facilitar el baldeo de las zonas de tránsito.

Todos los sistemas de ventilación por evacuación, dilución y renovación de aire deberán ser objeto de un adecuado mantenimiento para que permitan un control eficaz de los contaminantes atmosféricos. Además de los sistemas de ventilación general deberá mantenerse el equipo de proceso, a fin de eliminar los derrames de material y las emisiones fugitivas.

### **Ejecución del programa de métodos de trabajo**

Aunque las normas hacen hincapié en los controles técnicos como medio de asegurar su cumplimiento, los controles de los métodos de trabajo son esenciales para el éxito del programa de control. Los controles técnicos pueden ser ineficaces a causa de unos malos hábitos de trabajo, de un mantenimiento inadecuado y de una conservación de las instalaciones o una higiene personal deficientes. Los trabajadores que utilizan los mismos equipos en distintos turnos puede sufrir exposiciones atmosféricas muy diferentes a causa de diferencias en estos factores entre unos turnos y otros.

Aunque se descuidan con frecuencia, los programas de métodos de trabajo constituyen una buena práctica de dirección y una buena medida de sentido común; son eficaces en relación con el coste pero requieren una actitud responsable y cooperativa por parte de los trabajadores y de los supervisores de línea. La actitud de la alta dirección en relación con la salud y la seguridad se refleja en la actitud de los supervisores de línea. De igual modo, si los supervisores no velan por el cumplimiento de estos programas, las actitudes de los trabajadores pueden resentirse. Se pueden fomentar las buenas actitudes en relación con la salud y la seguridad por medio de los siguientes métodos:

- un clima de cooperación que propicie la participación de los trabajadores en los programas
- programas oficiales de formación y educación
- promover el programa de salud y seguridad de la planta. Para que el programa sea eficaz es preciso motivar a los trabajadores y ganarse su confianza.

No hay que limitarse a “implantar” los programas de métodos de trabajo. Lo mismo que un sistema de ventilación, requieren mantenimiento y continuas verificaciones para asegurarse de que están funcionando correctamente. Estos programas son responsabilidad tanto de la dirección como de los trabajadores y deben establecerse para enseñar, fomentar y supervisar los “buenos” métodos, es decir, aquellos que aseguran un bajo nivel de exposición.

### **Equipo de protección personal**

En todos los trabajos deberán usarse sistemáticamente gafas de seguridad con pantallas laterales, monos, calzado de seguridad y guantes de trabajo. Quienes realicen operaciones de fundición y colada de metales o aleaciones, deberán llevar mandiles y guantes o manoplas de cuero u otro material adecuado para protegerse de las salpicaduras de metal fundido.

En aquellas operaciones en las que los controles técnicos no resulten adecuados para controlar las emisiones de polvo o humo, deberá usarse una protección respiratoria adecuada. Si los niveles de ruido son excesivos y no pueden evitarse por medios técnicos o no es posible aislar las fuentes de ruido, se deberá utilizar protección para los oídos. También deberá aplicarse un programa de conservación de la audición que incluya pruebas de audiometría y formación al respecto.

## Procesos

### Aluminio

La industria del aluminio recuperado utiliza chatarra que contiene aluminio para producir aluminio metálico y aleaciones de aluminio. El proceso utilizado en esta industria comprende tratamiento previo de la chatarra, segunda fusión, aleación y colada. La industria del aluminio de segunda fusión utiliza como materias primas, entre otros materiales, chatarra nueva y vieja, lingotes exudados y algo de aluminio primario. La chatarra nueva está formada por recortes, productos de forja y otros sólidos adquiridos a la industria aeronáutica, fabricantes de estructuras y otras plantas de fabricación. Las virutas de taladrado y de torno son un subproducto del mecanizado de piezas de fundición, varillas y piezas de forja por la industria aeronáutica y la del automóvil. Las impurezas, espumas y escorias se obtienen de las plantas de primera reducción, de las plantas de segunda fusión y de las fundiciones. La chatarra vieja está formada por piezas de automóviles, elementos de uso doméstico y piezas de aviones. El proceso consta de los siguientes pasos:

- **Inspección y clasificación.** Después de comprar la chatarra de aluminio se la somete a una inspección. La chatarra limpia que no requiere tratamiento previo se transporta al almacén o se carga directamente en el horno de fundición. El aluminio que requiere pretratamiento se clasifica a mano. Se retiran el hierro, acero inoxidable, zinc y latón libres, así como los materiales sobremedida.
- **Trituración y cribado.** La materia prima para este proceso es la chatarra vieja, en especial las piezas de fundición y la chapa contaminada con hierro. La chatarra, una vez clasificada, se transporta a una trituradora o molino de martillos, donde el material se desmenuza y tritura, y el hierro se separa del aluminio. El material triturado se pasa sobre cribas vibrantes para eliminar la suciedad y las partículas finas.
- **Embalado.** La chatarra de aluminio voluminosa, como planchas inservibles, piezas de fundición y recortes, se compacta utilizando un equipo de embalado especialmente diseñado al efecto.
- **Desmenuzado y clasificación.** El cable de aluminio puro con refuerzo o aislamiento de acero, se corta con cizallas tipo cocodrilo, después de lo cual se granula o se reduce a fragmentos aún más pequeños en molinos de martillos para separar del aluminio el alma de hierro y el forro de plástico.
- **Calcínación y secado.** Las virutas de taladrado y de torno se tratan previamente para eliminar los aceites de corte, grasas, humedad y hierro libre. La chatarra se tritura en un molino de martillos o una trituradora de anillos; la humedad y los materiales orgánicos se volatilizan en un secador rotativo de gas o fuel-oil, los fragmentos secos se criban para eliminar las partículas finas de aluminio, el material restante se trata magnéticamente para separar el hierro, y las virutas limpias y secas se clasifican en cajas de piezas.
- **Procesado de impurezas calientes.** Se puede separar el aluminio de las impurezas calientes descargadas del horno de afino mediante tratamiento en lotes por fundente con una mezcla de sal y criolita. Este proceso se lleva a cabo en una cuba con revestimiento refractario y rotación mecánica. Periódicamente se drena el metal a través de un orificio existente en la base de la cuba.
- **Molituración en seco.** En el proceso de molituración en seco, la escoria fría cargada de aluminio y otros residuos se procesa mediante molituración, cribado y concentración hasta obtener un producto que contiene de un 60 a un 70 % de aluminio como mínimo. Para reducir los óxidos y los materiales no metálicos a polvo fino pueden utilizarse molinos de bolas, de

varillas o de martillos. La suciedad y otros materiales no recuperables se separan del metal mediante cribado, clasificación por corriente de aire o separación magnética.

- **Tostación.** Una de las materias primas de este proceso es la hoja de aluminio con dorsal de papel, gutapercha o aislamiento. En el proceso de tostación, los materiales carbonosos asociados con las hojas de aluminio se tuestan y después se separan del producto metálico.
- **Exudación de aluminio.** La exudación es un proceso pirometalúrgico que se utiliza para recuperar el aluminio de la chatarra con alto contenido de hierro. Son materias primas para este proceso la chatarra, piezas de fundición y escoria de aluminio con alta proporción de hierro. Generalmente se utilizan hornos de reverbero de llama y solera inclinada. La separación se produce al fundirse el aluminio y otros constituyentes de bajo punto de fusión, con lo cual escurren por la solera y pasan por una rejilla a moldes refrigerados por aire, cubos de recogida o pozos de retención. El producto obtenido se denomina "lingotes exudados". Los materiales con punto de fusión más alto, como el hierro, latón y productos de la oxidación formados durante el proceso de exudación, se extraen periódicamente del horno mediante sangrado.
- **Fundición y afino en horno de reverbero (con cloro).** Se utilizan hornos de reverbero para convertir chatarra limpia clasificada, lingotes exudados o, en algunos casos, chatarra sin tratar, en aleaciones según especificación. La chatarra se carga en el horno por medios mecánicos. Los materiales a procesar se añaden por lotes o mediante alimentación continua. Una vez cargada la chatarra se añade un fundente para evitar el contacto del metal fundido con el aire y su subsiguiente oxidación (fundente protector). Se añaden fundentes disolventes que reaccionan con los materiales no metálicos, tales como residuos de recubrimientos quemados y suciedad, formándose compuestos insolubles que flotan y suben a la superficie en forma de escoria. Después se añaden aleantes, dependiendo de las especificaciones. La *desmagnesiación* es el proceso consistente en reducir el contenido de magnesio de la carga fundida. Cuando la reducción se efectúa con cloro gaseoso, se inyecta cloro a través de tubos o lanzas de carbono y al burbujear reacciona con el magnesio y el aluminio. En la fase de despumado se extraen de la superficie del caldo los fundentes semisólidos impuros.
- **Fundición y afino en horno de reverbero (con flúor).** Este proceso es similar al de fundición y afino en horno de reverbero con cloro, pero en lugar de cloro se emplea fluoruro de aluminio.

La Tabla 82.8 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de aluminio.

### Recuperación de cobre

La industria de segunda fusión del cobre utiliza chatarra que contiene cobre para producir cobre metálico y aleaciones de cobre. Las materias primas empleadas pueden clasificarse como chatarra nueva producida en la fabricación de productos acabados o chatarra vieja procedente de artículos obsoletos, desgastados o recuperados. Entre las fuentes de chatarra vieja están el alambre, accesorios de fontanería, equipos eléctricos, automóviles y electrodomésticos. Otros materiales con un contenido valioso de cobre son las escorias, impurezas y cenizas de fundición, y las barreduras de fundiciones. La recuperación comprende los siguientes pasos:

- **Separación y clasificación.** La chatarra se clasifica de acuerdo con su contenido de cobre y su estado de limpieza. La chatarra limpia puede separarse a mano para cargarla directamente en un horno de fusión y aleación. Los componentes férreos pueden separarse magnéticamente. El aislamiento y las

Tabla 82.8 • Controles técnicos y administrativos para el aluminio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposición	Controles técnicos y administrativos
Clasificación	Desoldadura con soplete— vapores metálicos, por ejemplo de plomo y cadmio	Ventilación por extracción local durante la desoldadura; equipo de protección personal —protección respiratoria al desoldar
Trituración/cribado	Polvos y aerosoles inespecíficos, neblinas de aceite, partículas metálicas y ruido	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva
Embalado	Ninguna exposición conocida	Ningún control
Calcinación/secado	Partículas inespecíficas que pueden incluir metales, hollín y materias orgánicas pesadas condensadas. Gases y vapores conteniendo fluoruros, dióxido de azufre, cloruros, monóxido de carbono, hidrocarburos y aldehídos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso contra el estrés por calor, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva
Procesado de impurezas calientes	Algunos vapores	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Molituración en seco	Polvo	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Tostación	Polvo	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso contra el estrés por calor, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva
Exudación	Vapores y partículas metálicos, gases y vapores inespecíficos, calor y ruido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso contra el estrés por calor, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y protección respiratoria
Fundición y afino en horno de reverbero (con cloro)	Productos de la combustión, cloro, cloruros de hidrógeno, cloruros metálicos, cloruros de aluminio, ruido y calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso contra el estrés por calor, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y protección respiratoria
Fundición y afino en horno de reverbero (con flúor)	Productos de la combustión, flúor, fluoruros de hidrógeno, fluoruros metálicos, fluoruros de aluminio, ruido y calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso contra el estrés por calor, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y protección respiratoria

cubiertas de plomo de los cables se separan a mano o con equipos especialmente diseñados al efecto.

- *Briquetado y trituración.* Una vez limpios, el alambre, chapa fina, tela metálica, virutas de taladrado y torno, y fragmentos pequeños, se compactan para poder manipularlos con más facilidad. El equipo utilizado para ello consiste en prensas hidráulicas embaladoras, molinos de martillos y molinos de bolas.
- *Desmenuzado.* La separación del alambre de cobre del aislamiento se lleva a cabo reduciendo el tamaño de la mezcla. Después, el material desmenuzado se clasifica por medios neumáticos o hidráulicos y si hay materiales féreos se separan magnéticamente.
- *Trituración y separación por gravedad.* Este proceso desempeña la misma función que el desmenuzado, pero utilizando un medio de separación acuoso y materiales diferentes como materia prima, por ejemplo escorias, impurezas, espumas, cenizas de fundición, barreduras y polvo de cámara de sacos filtrantes.
- *Secado.* Se eliminan las impurezas orgánicas volátiles tales como fluidos de corte, aceites y grasas que contienen las virutas de taladrado y de torno y los fragmentos pequeños.
- *Quemado del aislamiento.* En este proceso se separan del alambre de cobre el aislamiento y otros revestimientos quemando estos materiales en hornos. La chatarra de alambre se carga por lotes en una cámara de ignición primaria o un postquemador. Después, los productos de combustión volátiles se recogen haciéndolos pasar por una cámara de combustión secundaria o

una cámara de sacos. Se genera materia en partículas inespecífica que puede contener humo, arcilla y óxidos metálicos. Los gases y vapores pueden contener óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, cloruros, monóxido de carbono, hidrocarburos y aldehídos.

- *Exudación.* Los componentes de fusión con baja presión de vapor se eliminan de la chatarra calentando ésta a una temperatura controlada, justo por encima del punto de fusión de los metales que se desea exudar. Por lo general el metal primario, es decir, el cobre, no es el componente que se funde.
- *Lixiviación en carbonato de amonio.* Se puede recuperar el cobre de una chatarra relativamente limpia por lixiviación y disolución en una disolución básica de carbonato de amonio. Los iones cúpricos de la disolución de amonio reaccionan con el cobre metálico y producen iones cuprosos, que pueden reoxidarse y devolverse al estado cúprico mediante oxidación en aire. Una vez separada la disolución cruda del residuo lixiviado, se recupera el óxido de cobre por destilación al vapor.
- *Destilación al vapor.* El material lixiviado obtenido en el proceso de lixiviación en carbonato se hierve para precipitar el óxido de cobre, el cual se seca a continuación.
- *Reducción hidrotérmica en hidrógeno.* La disolución de carbonato de amonio, que contiene iones de cobre, se calienta bajo presión en hidrógeno, con lo que el cobre precipita en forma de polvo. A continuación, el cobre se filtra, lava, seca y sinteriza en una atmósfera de hidrógeno, y el polvo obtenido se tritura y tamiza.

- *Lixiviación en ácido sulfúrico.* Se disuelve la chatarra de cobre en ácido sulfúrico para formar una disolución de sulfato de cobre que se utilizará como carga en el proceso de extracción electro-lítica. Después de la digestión, el residuo no disuelto se filtra.
- *Fundición en convertidor.* El cobre negro fundido se carga en un convertidor, recipiente de acero en forma de pera o cilíndrico revestido de ladrillo refractario. Se inyecta aire en las cargas fundidas a través de unas toberas, o *tuyères*. El aire oxida el sulfuro de cobre y otros metales. Se añade un fundente que contiene sílice para que reaccione con los óxidos de hierro y forme una escoria de silicato férrico. Esta escoria se extrae del horno por despumación, generalmente inclinando el horno, y después se efectúa una inyección de aire y un despumado secundarios. El cobre obtenido en este proceso recibe el nombre de cobre blister y por lo general se le somete a un afinado ulterior en un horno de afinado a fuego.
- *Afinado a fuego.* El cobre blister procedente del convertidor se afina a fuego en un horno basculante cilíndrico, parecido a un horno de reverbero. La carga de este cobre en el horno de afino se realiza en una atmósfera oxidante. Se extraen las impurezas de la superficie mediante despumado y se crea una atmósfera reductora añadiendo troncos de madera verdes o gas natural. Después se procede a la colada del caldo resultante. Si el cobre va a ser afinado electrolíticamente, se cuela como ánodo.
- *Afinado electrolítico.* Los ánodos del proceso de afinado a fuego se colocan en un tanque que contiene ácido sulfúrico y por el que circula corriente continua. El cobre del ánodo se ioniza y los iones de cobre se depositan sobre una chapa inicial de cobre puro. Al disolverse los ánodos en el electrolito, las impurezas se depositan en el fondo de la célula en forma de lodo, el cual puede procesarse de nuevo para recuperar otros metales valiosos. El cátodo de cobre producido se funde y se cuela en moldes de diversas formas.

La Tabla 82.9 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de cobre.

### Recuperación de plomo

Las materias primas que adquieren las fundiciones de plomo recuperado pueden requerir un procesado previo a su carga en el horno de fundición. En este apartado se tratan los materiales que compran con más frecuencia las fundiciones de plomo recuperado y los controles técnicos y prácticas de trabajo que pueden aplicarse para limitar la exposición de los trabajadores al plomo durante las operaciones de procesado de las materias primas. Hay que señalar que en las instalaciones de recuperación de plomo suele haber polvo de plomo por todas partes y que cualquier corriente de aire producida por vehículos puede agitar este polvo, el cual podrá ser entonces inhalado o adherirse al calzado, la ropa, la piel y el cabello.

### Baterías de automóviles

La materia prima más común en una fundición de plomo recuperado son las baterías procedentes de los desguaces de automóviles. En el proceso de fundición y afino se recupera como plomo metálico aproximadamente el 50 % en peso de cada una de estas baterías. Alrededor del 90 % de las baterías de automóviles que se fabrican hoy en día, tienen la caja o carcasa de polipropileno. Casi todas las fundiciones de plomo de segunda fusión recuperan estas carcasas de polipropileno por el alto valor económico de este material. En la mayor parte de estos procesos pueden generarse humos metálicos, en especial de plomo y antimonio.

Durante la *rotura de las baterías de automóviles* existe riesgo de formación de arsenamina o estibina debido a la presencia de

arsénico o antimonio, utilizados como endurecedores en la aleación de las placas, así como riesgo de presencia de hidrógeno naciente.

Estos son los cuatro procesos más comunes para la rotura de las baterías de automóviles:

1. serrado a alta velocidad
2. serrado a baja velocidad
3. cizallado
4. trituración de la batería completa (triturador o desmenizador Saturn o molino de martillos).

De estos procesos, los tres primeros implican el corte de la parte superior de la batería para después extraer los grupos o el material que contiene el plomo. El cuarto proceso consiste en triturar la batería completa en un molino de martillos y separar los componentes por gravedad.

La *separación de los materiales de las baterías de automóviles* se lleva a cabo después de la rotura de las baterías con el fin de separar el material que contiene plomo del material de la carcasa. Al retirar esta última pueden formarse neblinas ácidas. Las técnicas más utilizadas para esta operación son las siguientes:

- *Técnica manual.* Es la que emplean la mayoría de las fundiciones de plomo recuperado y sigue siendo la más utilizada por las pequeñas y medianas fundiciones. Tras el paso de la batería por la sierra o la cizalla, un operario vuelca manualmente los grupos o el material que contiene plomo en una pila y coloca la carcasa y la parte superior de la batería en otra pila o en un sistema de transporte
- *Tambor giratorio.* Después de serrar o cortar la parte superior para separar los grupos de las carcasas, las baterías se colocan en un tambor giratorio. Las nervaduras interiores del tambor provocan la salida de los grupos mientras el tambor gira lentamente. Los grupos caen por las ranuras del tambor mientras que las carcasas son transportadas hasta el extremo de éste y se recogen a la salida. Una vez separadas del material que contiene plomo, las carcasas y las tapas de plástico y goma se someten a un proceso adicional.
- *Proceso de inmersión y flotación.* El proceso de inmersión y flotación normalmente se combina con el de desmenzado en molino de martillos o trituradora para fragmentar la batería. Los trozos de ésta, tanto los que contienen plomo como los fragmentos de las carcasas, se introducen en una serie de tanques llenos de agua. El material que contiene plomo se sumerge hasta el fondo de los tanques, de donde se extrae por medio de un transportador de tornillo sin fin o cadena de arrastre, mientras que el material de la carcasa flota y se recoge en la superficie del tanque.

La mayoría de las fundiciones de plomo recuperado compran periódicamente baterías industriales que han sido utilizadas para impulsar maquinaria móvil eléctrica u otros usos industriales. La carcasa de muchas de estas baterías es de acero y para retirarla es preciso abrirla con un soplete o una sierra manual de gas.

### Otros tipos de chatarra que se compra por su contenido de plomo

Las fundiciones de plomo recuperado compran también diversos otros tipos de chatarra para utilizarla como materia prima en el proceso de fundición. Entre estos materiales están chatarra procedente de plantas de fabricación de baterías, espumas de afino de plomo, chatarra de plomo metálico, como lingotes de linotipia y envueltas de cables, y residuos de plomo tetraetilo. Estos tipos de materiales pueden cargarse directamente en hornos de fundición o mezclarse con otros materiales de carga.

Tabla 82.9 • Controles técnicos y administrativos para el cobre, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Separación y clasificación	Contaminantes atmosféricos por manipulación y desoldadura del material o corte de la chatarra	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Briquetado y trituración	Polvo y aerosoles inespecíficos, neblinas de aceite, partículas metálicas y ruido	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Desmenuzado	Polvo inespecífico, material aislante de cables, partículas metálicas y ruido	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Trituración y separación por gravedad	Polvo inespecífico, partículas metálicas de fundentes, escorias e impurezas, y ruido	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Secado	Partículas inespecíficas que pueden incluir metales, hollín y materias orgánicas pesadas condensadas Gases y vapores conteniendo fluoruros, dióxido de azufre, cloruros, monóxido de carbono, hidrocarburos y aldehídos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Quemado del aislamiento	Partículas inespecíficas que pueden incluir humo, arcilla y óxidos metálicos Gases y vapores conteniendo óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, cloruros, monóxido de carbono, hidrocarburos y aldehídos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección respiratoria
Exudación	Vapores metálicos y partículas, gases, vapores y partículas inespecíficos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Lixiviación en carbonato de amonio	Amoníaco	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección respiratoria
Destilación al vapor	Amoníaco	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — gafas con pantallas laterales
Reducción hidrotérmica en hidrógeno	Amoníaco	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección respiratoria
Lixiviación en ácido sulfúrico	Neblinas de ácido sulfúrico	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Fundición en convertidor	Metales volátiles, ruido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección respiratoria y protección auditiva
Fundición en crisol eléctrico	Partículas, óxidos de azufre y de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, ruido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección auditiva
Afinado a fuego	Oxidos de azufre, hidrocarburos, partículas	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección auditiva
Afinado electrolítico	Acido sulfúrico y metales procedentes de lodos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas

### Manutención y transporte de la materia prima

Una parte esencial del proceso de fundición de plomo recuperado es la manutención, transporte y almacenamiento de la materia prima. Los materiales se transportan con carretillas elevadoras, palas cargadoras o transportadores mecánicos (tornillos sin fin, elevadores de cangilones o cintas transportadoras). El principal medio de transporte de materiales en la industria de segunda fusión es la maquinaria móvil.

Entre los medios de transporte mecánicos que utilizan habitualmente las fundiciones de plomo recuperado están los sistemas de cintas transportadoras, que pueden emplearse para llevar el material de carga del horno desde las zonas de almacenamiento hasta la zona de calcinación del horno; los transportadores de tornillo sin fin, para llevar el polvo del conducto de gases desde la cámara de sacos filtrantes hasta un horno de aglomeración o una zona de almacenamiento, los elevadores de cangilones y los cables o cadenas de arrastre.

### Fundición

La operación de fundición en un taller de fundición de plomo recuperado consiste en reducir la chatarra que contiene plomo a plomo metálico en un horno de cuba o de reverbero.

Los *hornos de cuba* se cargan con el material que contiene plomo, coque (combustible) caliza y hierro (fundente). Estos materiales se introducen en el horno por la parte superior o por una compuerta de carga situada en el lateral de la cuba, cerca de la parte superior del horno. Entre los riesgos ambientales asociados con las operaciones de los hornos de cuba están los humos y partículas metálicas (en especial plomo y antimonio), calor, ruido y monóxido de carbono. En la industria del plomo de segunda fusión se utilizan diversos mecanismos de transporte del material de carga, de los cuales el más común es probablemente el montacargas de cubetas. Otros son las tolvas vibrantes, cintas transportadoras y elevadores de cubetas.

Tabla 82.10 • Controles técnicos y administrativos para el plomo, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Vehículos	Polvo de plomo de las carreteras y salpicaduras de agua que contiene plomo	Baldear las zonas y mantenerlas mojadas. Formación de los operarios, prácticas de trabajo prudentes y una adecuada limpieza son elementos esenciales para reducir al mínimo las emisiones de plomo cuando se trabaja con maquinaria móvil. Confinar el equipo y proveer un sistema de filtración de aire de presión positiva.
Transportadores	Polvo de plomo	También es conveniente equipar los sistemas de cintas transportadoras con poleas de retorno autolimpiantes o limpiadores de cinta si se utilizan para transportar materiales de carga de hornos o polvo de conductos de humos.
Rotura de carcasas de baterías	Polvo de plomo, neblinas ácidas	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Preparación de cargas	Polvo de plomo	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Horno de cuba	Vapores y partículas metálicos (plomo, antimonio), calor y ruido, monóxido de carbono	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección respiratoria y auditiva
Horno de reverbero	Vapores y partículas metálicos (plomo, antimonio), calor y ruido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos, aislamiento de la fuente de ruido; equipo de protección personal — protección respiratoria y auditiva
Afino	Partículas de plomo y posiblemente metales aleantes y agentes fundentes, ruido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección auditiva
Colada	Partículas de plomo y posiblemente metales aleantes	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas

Las operaciones de sangrado de los hornos de cuba comprenden la descarga del plomo fundido y la escoria del horno en moldes o cucharas. Algunas fundiciones vierten el metal directamente en una caldera de conservación que lo mantiene en fusión para el afinado. El resto de las fundiciones cuelean el metal del horno en bloques y dejan que éstos se solidifiquen.

El aire inyectado para el proceso de combustión entra en el horno de cuba a través de unas toberas en las que de vez en cuando empiezan a acumularse residuos y hay que desatascarlas físicamente, por lo general introduciendo una varilla de acero, para evitar que se obstruyan. El método convencional para ello consiste en quitar la tapa de las toberas e introducir la varilla. Una vez desprendidos los residuos, se coloca de nuevo la tapa.

Los hornos de reverbero se cargan con materia prima que contiene plomo por medio de un mecanismo de carga del horno. En la industria del plomo de segunda fusión, estos hornos suelen tener un arco apoyado o suspendido construido de ladrillo refractario. Muchos de los contaminantes y riesgos físicos asociados con los hornos de reverbero son similares a los de los hornos de cuba. Tales mecanismos pueden ser un cilindro hidráulico, un transportador de tornillo u otros dispositivos similares a los descritos en relación con los hornos de cuba.

Las operaciones de sangrado de los hornos de reverbero son también muy parecidas a las de los hornos de cuba.

#### Afino

El afinado del plomo en las fundiciones de plomo recuperado se lleva a cabo en calderas de caldeo indirecto. Por lo general, el metal procedente de los hornos se funde en la caldera y después se ajusta el contenido de oligoelementos para producir la aleación deseada. Los productos usuales son plomo blando (puro) y diversas aleaciones de plomo duro (con antimonio).

En casi todas las operaciones de afinado de plomo secundario se emplean métodos manuales para añadir materiales aleantes a las calderas y métodos también manuales de extracción de impurezas. Las impurezas se llevan hasta el borde de la caldera, se

extraen con una pala o un cucharón y se vierten en un recipiente.

La Tabla 82.10 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de plomo.

#### Recuperación de zinc

La industria del zinc recuperado utiliza recortes nuevos, espumas y cenizas, espumas de fundición inyectada, impurezas de galvanizado, polvo de conducto de humos y residuos químicos como materias primas para la obtención de zinc. La mayor parte de la chatarra nueva procesada está constituida por aleaciones a base de zinc y cobre procedentes de las cubas de galvanizado y de fundición inyectada. En la chatarra vieja se incluyen planchas viejas de zinc procedentes de grabadores, piezas de fundición inyectada y chatarra formada por varillas y matrices. Los procesos son los siguientes:

- *Exudación reverberatoria.* Se utilizan hornos de reverbero para separar el zinc de otros metales controlando la temperatura del horno. Como materias primas para este proceso se utilizan chatarra de productos de fundición inyectada tales como parrillas de radiador de automóviles y placas de matrícula, y revestimientos o residuos de zinc. Se carga la chatarra en el horno, se añade fundente y se funde el contenido. A continuación, se extrae el residuo de alto punto de fusión y el zinc fundido pasa directamente desde el horno a los procesos subsiguientes, como fundición, afinado o aleación, o a recipientes colectores. Entre los contaminantes del metal están el zinc, aluminio, cobre, hierro, plomo, cadmio, manganeso y cromo. Otros contaminantes son los fundentes, óxidos de azufre, cloruros y fluoruros.
- *Exudación rotativa.* En este proceso se carga en un horno de caldeo directo chatarra de zinc, productos de fundición inyectada, residuos y espumas, y se funden. Se despuma el caldo y el zinc metálico se recoge en calderas situadas fuera del horno. A continuación se extrae el material no fusible, es decir, la escoria, antes de recargar el horno. El metal obtenido en este proceso se somete a procesos de destilación o aleación. Los

contaminantes son similares a los del proceso de exudación en horno de reverbero.

- **Exudación en horno de mufla y en caldera.** En estos procesos se cargan en el horno de mufla chatarra de zinc, productos de fundición inyectada al vapor, residuos y espumas, se exuda el material y el zinc exudado se somete a procesos de afino o aleación. El residuo se extrae mediante una criba vibrante que separa las impurezas de la escoria. Los contaminantes son similares a los del proceso de exudación en horno de reverbero.
- **Trituración y cribado.** Los residuos de zinc se pulverizan o trituran para romper los enlaces físicos entre el zinc metálico y los fundentes contaminantes. Después, el material reducido se separa en una fase de cribado o clasificación neumática. La trituración puede producir óxido de zinc y pequeñas cantidades de metales pesados y cloruros.
- **Lixiviación con carbonato sódico.** Los residuos se tratan químicamente para lixiviar el zinc y convertirlo en óxido de zinc. Primero se tritura y se lava la chatarra, fase en la que se separa el zinc del material por lixiviación. La porción acuosa se trata con carbonato sódico, lo que hace que el zinc se precipite. El precipitado se seca y calcina para obtener óxido de zinc en bruto, y a continuación se reduce el óxido de zinc a zinc metálico. Pueden producirse diversas sales de zinc contaminantes.
- **Fundición en caldera, crisol, horno de reverbero y por inducción eléctrica.** Se carga la chatarra en el horno y se añaden fundentes. Se agita el baño para formar una espuma que puede recogerse en la superficie. Una vez despumado el horno, se cuela el zinc en cucharas o moldes. Pueden producirse humos de óxido de zinc, amoníaco y cloruro de amonio, cloruro de hidrógeno y cloruro de zinc.
- **Aleación.** La función de este proceso es producir aleaciones de zinc a partir de chatarra de zinc pretratada, añadiéndole en una caldera de afino fundentes y aleantes solidificados o en fusión. Después se mezcla el contenido, se extraen las impurezas por despumación y se cuela el metal en moldes de

diversas formas. Existe riesgo de exposición a partículas que contienen zinc, metales de aleación, cloruros, gases y vapores inespecíficos, y calor.

- **Destilación en mufla.** El proceso de destilación en mufla se utiliza para recuperar zinc a partir de aleaciones y fabricar lingotes de zinc puro. El proceso es semicontinuo y consiste en cargar el zinc fundido desde un crisol o un horno de exudación a la sección de mufla, vaporizar el zinc, condensar el zinc vaporizado y colarlo en moldes desde el condensador. Periódicamente se extrae el residuo de la mufla.
- **Destilación/oxidación en retorta y destilación/oxidación en mufla.** El producto del proceso de destilación/oxidación en retorta y destilación/oxidación en mufla es óxido de zinc. El proceso es similar a la destilación en retorta hasta la fase de vaporización pero, en este proceso, se elude el condensador y se añade aire para la combustión. El vapor se descarga en una corriente de aire a través de un orificio. La combustión se produce espontáneamente en el interior de una cámara refractaria revestida de vapor. El producto es transportado por los gases de la combustión y el aire sobrante hasta una cámara de sacos, donde se recoge. El aire sobrante asegura la oxidación completa y la refrigeración del producto. Estos procesos de destilación pueden dar lugar a exposiciones a humos de óxido de zinc, así como a partículas de otros metales y a óxidos de azufre.

La Tabla 82.11 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de zinc.

#### Recuperación de magnesio

La chatarra vieja se obtiene de fuentes tales como piezas procedentes del desguace de automóviles y aviones y planchas litográficas inservibles, así como algunos lodos de fundiciones de magnesio primario. La chatarra nueva se compone de recortes, virutas de torno y de taladrado, espumas, escorias, impurezas y artículos defectuosos de talleres de laminación de chapa y plantas

Tabla 82.11 • Controles técnicos y administrativos para el zinc, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Exudación reverberatoria	Partículas que contienen zinc, aluminio, cobre, hierro, plomo, cadmio, manganeso y cromo, contaminantes procedentes de fundentes, óxidos de azufre, cloruros y fluoruros	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, estrés por calor—régimen de trabajo/descanso, líquidos
Exudación rotativa	Partículas que contienen zinc, aluminio, cobre, hierro, plomo, cadmio, manganeso y cromo, contaminantes procedentes de fundentes, óxidos de azufre, cloruros y fluoruros	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Exudación en horno de mufla y en caldera	Partículas que contienen zinc, aluminio, cobre, hierro, plomo, cadmio, manganeso y cromo, contaminantes procedentes de fundentes, óxidos de azufre, cloruros y fluoruros	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Trituración/cribado	Oxido de zinc, pequeñas cantidades de metales pesados, cloruros	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Lixiviación con carbonato sódico	Oxido de zinc, carbonato sódico, carbonato de zinc, hidróxido de zinc, cloruro de hidrógeno, cloruro de zinc	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Fundición en caldera, crisol, horno de reverbero y por inducción eléctrica	Vapores de óxido de zinc, amoníaco, cloruro amónico, cloruro de hidrógeno, cloruro de zinc	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Aleación	Partículas conteniendo zinc, metales aleantes, cloruros; gases y vapores inespecíficos; calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Destilación en retorta, destilación/oxidación en retorta y destilación en mufla	Vapores de óxido de zinc, otras partículas metálicas, óxidos de azufre	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Destilación por resistencia de varilla de grafito	Vapores de óxido de zinc, otras partículas metálicas, óxidos de azufre	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos

Tabla 82.12 • Controles técnicos y administrativos para el magnesio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Clasificación de chatarra	Polvo	Baldeo con agua
Fundición en crisol abierto	Vapores y polvo, alto riesgo de incendio	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas y prácticas de trabajo
Casting	Polvo y vapores, calor y alto riesgo de incendio	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos

de fabricación de estructuras. El mayor peligro que entraña la manipulación de magnesio es el de incendio. Los fragmentos pequeños de este metal pueden inflamarse fácilmente a causa de una chispa o una llama.

- *Clasificación manual.* Este proceso se utiliza para separar las fracciones de magnesio y sus aleaciones de otros metales presentes en la chatarra. Esta última se esparce manualmente y se clasifica de acuerdo con su peso.
- *Fundición en crisol abierto.* Este proceso se utiliza para separar el magnesio de los contaminantes contenidos en la chatarra clasificada. La chatarra se carga en un crisol, se calienta y se le añade un fundente formado por una mezcla de cloruros de calcio, sodio y potasio. Después, el magnesio fundido se cuela en lingotes.

La Tabla 82.12 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de magnesio.

#### Recuperación de mercurio.

Las principales fuentes de mercurio son amalgamas dentales, baterías de mercurio desechadas, lodos de procesos electrolíticos en los que se utiliza mercurio como catalizador, mercurio procedente del desmantelamiento de plantas de cloroálcali e instrumentos que contienen mercurio. Todos estos procesos pueden contaminarse con vapor de mercurio.

- *Trituración.* El proceso de trituración se emplea para separar el mercurio residual de los recipientes metálicos, de plástico y de vidrio. Una vez triturados los recipientes, el mercurio líquido contaminado se lleva al proceso de filtración.
- *Filtración.* Las impurezas insolubles, tales como suciedad, se eliminan pasando la chatarra que contiene vapor de mercurio por un medio filtrante. El mercurio filtrado se lleva al proceso de oxigenación y los sólidos que no pasan por los filtros se envían a la destilación en retorta.
- *Destilación al vacío.* La destilación al vacío se utiliza para refinar el mercurio contaminado cuando las presiones de vapor de las impurezas son sustancialmente inferiores a la del mercurio. La carga de mercurio se vaporiza en un crisol de calentamiento y los vapores se condensan utilizando un condensador refrigerado por agua. El mercurio purificado se recoge y se envía a la operación de envasado. El residuo que queda en el crisol de calentamiento se lleva al proceso de calentamiento en retorta para recuperar los mínimos restos de mercurio que no se han recuperado en el proceso de destilación al vacío.
- *Purificación mediante solución.* En este proceso se eliminan los contaminantes metálicos y orgánicos lavando el mercurio líquido sin tratar con un ácido diluido. El proceso consta de los siguientes pasos: lixiviación del mercurio líquido en bruto con ácido nítrico diluido para separar las impurezas metálicas; agitación del ácido y el mercurio con aire comprimido para conseguir una mezcla homogénea; decantación para separar el mercurio del ácido; lavado con agua para eliminar el ácido residual, y filtración del mercurio en un medio como carbón activado o gel de sílice para eliminar los últimos restos de humedad. Además de al vapor de mercurio puede haber exposición a disolventes, compuestos químicos orgánicos y neblinas ácidas.
- *Oxigenación.* Este proceso consiste en refinar el mercurio filtrado eliminando las impurezas metálicas mediante oxidación por agitación con aire. El proceso de oxidación consta de dos fases, agitación y filtración. En la fase de agitación, el mercurio contaminado se agita con aire en un recipiente cerrado para oxidar los contaminantes metálicos. Después de la agitación, el mercurio se filtra sobre un lecho de carbón vegetal para eliminar los óxidos metálicos sólidos.
- *Calentamiento en retorta.* Este proceso se utiliza para producir mercurio puro volatizando el que contiene la chatarra sólida portadora de este metal. El proceso consta de las siguientes fases: calentamiento de la chatarra por medio de una fuente de calor externa en un alambique cerrado o una pila de bateas

Tabla 82.13 • Controles técnicos y administrativos para el mercurio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Trituración	Mercurio volátil	Extracción local; equipo de protección personal — protección respiratoria
Filtración	Mercurio volátil	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal — protección respiratoria
Destilación al vacío	Mercurio volátil	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal — protección respiratoria
Purificación de soluciones	Mercurio volátil, disolventes, materiales orgánicos y neblinas ácidas	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección respiratoria
Oxidación	Mercurio volátil	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal — protección respiratoria
Calentamiento en retorta	Mercurio volátil	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal — protección respiratoria



Tabla 82.14 • Controles técnicos y administrativos para el níquel, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Clasificación	Polvo	Extracción local y sustitución de disolventes
Desengrasado	Disolvente	Ventilación por extracción local y sustitución y/o recuperación de disolventes, ventilación general de zonas
Fundición	Vapores, polvo, ruido, calor	Ventilación por extracción local, régimen de trabajo/descanso, líquidos; equipo de protección personal — protección respiratoria y auditiva
Afino	Vapores, polvo, ruido, calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos; equipo de protección personal — protección respiratoria y auditiva
Colada	Calor, vapores metálicos	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos

para vaporizar el mercurio; condensar el vapor de mercurio en condensadores refrigerados por agua, y recoger el mercurio condensado en un recipiente.

La tabla 82.13 ofrece una lista de exposiciones y controles correspondientes a las operaciones de recuperación de mercurio.

#### Recuperación de níquel

Las principales materias primas para la recuperación de níquel son aleaciones a base de vapores de níquel, cobre y aluminio, que se encuentran en forma de chatarra vieja o nueva. La chatarra vieja está formada por piezas de diferentes aleaciones procedentes del desguace de aviones y maquinaria, mientras que la nueva consiste en recortes de chapa, virutas y otros fragmentos generados como subproductos de la fabricación de productos aleados. La recuperación de níquel comprende los siguientes pasos:

- **Clasificación.** La chatarra se inspecciona y se separa a mano de los materiales no metálicos o que no contienen níquel. La clasificación produce exposición al polvo.
- **Desengrase.** La chatarra de níquel se desengrasa con tricloroetileno. La mezcla se filtra o centrifuga para separar la chatarra de níquel. La disolución agotada de tricloroetileno y grasa se hace pasar por un sistema de recuperación de disolvente. Puede producirse exposición al disolvente durante el desengrase.
- **Fundición en horno de arco eléctrico u horno de reverbero rotativo.** La chatarra se carga en un horno de arco y se le añade un reductor, normalmente cal. La carga se funde y se cuela en lingotes o se lleva directamente a un reactor para su afinado.

adicional. Pueden producirse exposiciones a humos, polvo, ruido y calor.

- **Afino en reactor.** El metal fundido se introduce en un reactor al que se añaden chatarra de base fría y lingotes de níquel, seguidos de cal y sílice. También se añaden materiales aleantes como manganeso, niobio o titanio, para producir una aleación de la composición deseada. Pueden producirse exposiciones a humos, polvo, ruido y calor.
- **Colada en lingotes.** Este proceso consiste en colar en lingotes el metal fundido del horno o el reactor de afinado. El metal se vierte en moldes y se deja enfriar. Después, se extraen los lingotes de los moldes. Pueden producirse exposiciones al calor y a humos metálicos.

Las exposiciones y medidas de control correspondientes a las operaciones de recuperación de níquel se relacionan en la Tabla 82.14.

#### Recuperación de metales preciosos

Las materias primas para la industria de los metales preciosos consisten en chatarra vieja y nueva. La chatarra vieja comprende componentes electrónicos procedentes de equipos civiles y militares inservibles y chatarra de la industria dental. La chatarra nueva se genera durante la producción y fabricación de productos de metales preciosos. Los productos obtenidos son los metales elementales, tales como oro, plata, platino y paladio. El procesado de metales preciosos consta de los siguientes pasos:

- **Clasificación manual y desmenuzado.** La chatarra que contiene metales preciosos se clasifica a mano y se tritura y desmenuza en un molino de martillos. Este tipo de molinos son ruidosos.

Tabla 82.15 • Controles técnicos y administrativos para los metales preciosos, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Clasificación manual y desmenuzado	El molino de martillos entraña riesgo de ruido	Material de control de ruido; equipo de protección personal — protección auditiva
Incineración	Materiales orgánicos, gases de combustión y polvo	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas
Fundición en horno de cuba	Polvo, ruido	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal — protección auditiva y respiratoria
Afinado electrolítico	Nebllinas ácidas	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Afinado químico	Acido	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — ropa resistente a los ácidos, gafas de seguridad resistentes a los productos químicos y pantalla facial

Tabla 82.16 • Controles técnicos y administrativos para el cadmio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Desengrasado de la chatarra	Disolventes y polvo de cadmio	Extracción local y sustitución de disolventes
Fundición y afino de aleaciones	Productos de la combustión de aceite y gas, vapores de zinc, polvo y vapores de cadmio	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas; equipo de protección personal—protección respiratoria
Destilación en retorta	Vapores de cadmio	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal—protección respiratoria
Fusión /descincado	Vapores y polvo de cadmio, vapores y polvo de zinc, cloruro de zinc, cloro, cloruro de hidrógeno, estrés por calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos; equipo de protección personal—protección respiratoria
Colada	Polvo y vapores de cadmio, calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos; equipo de protección personal—protección respiratoria

- *Proceso de incineración.* La chatarra clasificada se incinera para eliminar el papel, el plástico y los contaminantes orgánicos líquidos. Pueden producirse exposiciones a productos químicos orgánicos, gases de combustión y polvo.
- *Fundición en horno de cuba.* La chatarra tratada se carga en un horno de cuba junto con coque, fundente y óxidos metálicos de escoria reciclada. La carga se funde y desescoria, obteniéndose cobre negro que contiene los metales preciosos. La escoria dura formada contiene la mayor parte de las impurezas de la escoria. Puede generarse polvo y ruido.
- *Fundición en convertidor.* Este proceso está destinado a purificar aún más el cobre negro inyectando aire a través del caldo en un convertidor. Los contaminantes metálicos que contienen escoria son eliminados y se reciclan al horno de cuba. El caldo de cobre que contiene los metales preciosos se cuela en moldes.
- *Afinado electrolítico.* El cobre así obtenido se utiliza como ánodo de una célula electrolítica. De ese modo, el cobre puro se deposita en el cátodo mientras que los metales preciosos caen al fondo de la célula y se recogen en forma de lodos. Como electrolito se utiliza sulfato de cobre. Puede haber exposiciones a neblinas ácidas.
- *Afinado químico.* El lodo de metales preciosos obtenido en el proceso de afino electrolítico se trata químicamente para recuperar los distintos metales. Se utilizan procesos a base de cianuro para recuperar el oro y la plata, que también pueden recuperarse disolviéndolos en una disolución de *agua regia* y/o ácido nítrico, seguida de precipitación con sulfato de hierro o

cloruro sódico para recuperar el oro y la plata respectivamente. Los metales del grupo del platino pueden recuperarse disolviéndolos en plomo fundido, el cual se trata después con ácido nítrico y deja un residuo del que pueden separarse selectivamente dichos metales por precipitación. A continuación, los precipitados de metales preciosos se funden o incineran para recoger el oro y la plata, que forman granos, y los metales que contienen platino, en forma de esponja. Pueden darse exposiciones al ácido.

Las exposiciones y controles figuran relacionados, por operaciones, en la Tabla 82.15 (véase también “Fundición y afino del oro” en este capítulo).

#### Recuperación de cadmio

La chatarra vieja que contiene cadmio se compone de piezas cadmiadas procedentes del desguace de vehículos y embarcaciones, electrodomésticos, herrajes y elementos de fijación, baterías de cadmio, contactos de cadmio de interruptores y relés, y otras piezas usadas de aleaciones de cadmio. La chatarra nueva consiste normalmente en piezas rechazadas que contienen vapores de cadmio y en subproductos contaminados procedentes de industrias del metal. Los procesos de recuperación son los siguientes:

- *Tratamiento previo.* El tratamiento previo de la chatarra implica el desengrasado al vapor de las piezas de aleación que la componen. Los vapores de disolvente generados calentando

Tabla 82.17 • Controles técnicos y administrativos para el selenio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Tratamiento previo de la chatarra	Polvo	Extracción local
Fundición en retorta	Gases y polvo de combustión, ruido	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas; equipo de protección personal—protección auditiva; control del ruido de los quemadores
Afino	SO <sub>2</sub> , neblina ácida	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal—gafas de seguridad resistentes a los productos químicos
Destilación	Polvo y productos de la combustión	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Temple	Polvo metálico	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Colada	Vapores de selenio	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas

Tabla 82.18 • Controles técnicos y administrativos para el cobalto, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Clasificación manual	Polvo	Baldeo con agua
Desengrasado	Disolventes	Recuperación de disolventes, extracción local y sustitución de disolventes
Limpieza por chorro abrasivo	Polvo — toxicidad dependiente del abrasivo utilizado	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal contra riesgos físicos y protección respiratoria dependiendo del abrasivo utilizado
Baño ácido y proceso de tratamiento químico	Neblinas ácidas	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas; equipo de protección personal — protección respiratoria
Fundición al vacío	Metales pesados	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Colada	Calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos

disolventes reciclados se hacen circular por un recipiente que contiene las piezas de distintas aleaciones que componen la chatarra. A continuación, se condensan y separan el disolvente y la grasa desprendida y se recicla el disolvente. Puede producirse exposición a polvo de cadmio y disolventes.

- *Fundición y afino.* En la operación de fundición y afino, se procesa chatarra de aleación pretratada o chatarra de cadmio elemental para eliminar cualquier impureza y producir cadmio elemental o aleado. Puede haber exposiciones a productos de la combustión de gas y fuel-oil, y a polvo de zinc y cadmio.
- *Destilación en retorta.* La chatarra de aleación desengrasada se carga en una retorta y se calienta para producir vapores de cadmio que a continuación se recogen en un condensador. El metal fundido queda así preparado para la colada. Hay posibilidad de exposición a polvo de cadmio.
- *Fundición/descincado.* El cadmio se carga en un crisol y se calienta hasta que alcanza el estado de fusión. Si el metal contiene zinc, se añaden fundentes y clorantes para eliminarlo. Hay potencial de exposición a humos y polvo de cadmio, humos y polvo de zinc, cloruro de zinc, cloro, cloruro de hidrógeno y calor, entre otros.
- *Colada.* En la operación de colada se forma la línea de productos deseada a partir del cadmio aleado o metálico purificados producidos en el paso anterior. La colada puede producir polvo y humos de cadmio y calor.

Las exposiciones que pueden producirse durante los procesos de recuperación de cadmio y las correspondientes medidas de control, se resumen en la Tabla 82.16.

### Recuperación de selenio

Las materias primas para este segmento son cilindros de xerografía usados y chatarra generada durante la fabricación de rectificadores de selenio. Puede formarse polvo de selenio durante todo el proceso. La destilación y la fundición en retorta pueden producir gases de combustión y polvo. La fundición en retorta es ruidosa. En el afino se forma una neblina de dióxido de azufre y una neblina ácida. En las operaciones de colada puede producirse polvo metálico (véase la Tabla 82.17). Los procesos de recuperación son los siguientes:

- *Tratamiento previo de la chatarra.* En este proceso se separa el selenio por procedimientos mecánicos, tales como el molino de martillos o el tratamiento con chorro de granalla.
- *Fundición en retorta.* En este proceso, la chatarra pretratada se purifica y concentra mediante una operación de destilación en retorta en la que se funde la chatarra y se separa el selenio de las impurezas por destilación.
- *Afino.* Este proceso purifica la chatarra de selenio mediante lixiviación con un disolvente adecuado, como una disolución

acuosa de sulfito de sodio. Las impurezas insolubles se eliminan por filtración y después se trata el filtrado para precipitar el selenio.

- *Destilación.* Este proceso produce vapores de selenio de alta pureza. El selenio se funde y destila, y los vapores de selenio se condensan y transfieren como selenio fundido a una operación de formación de productos.
- *Temple.* Este proceso se utiliza para producir granalla y polvo de selenio purificado. La granalla se obtiene a partir del caldo de selenio y después se seca. Los pasos necesarios para producir el polvo son los mismos, pero en este caso lo que se templan son los vapores de selenio en lugar del selenio fundido.
- *Colada.* Este proceso se emplea para producir lingotes o productos de otras formas a partir del caldo de selenio. Dichos productos se obtienen colando el selenio fundido en moldes de tamaño y forma adecuados, y enfriando y solidificando el caldo.

### Recuperación de cobalto

Las fuentes de chatarra de cobalto son partículas de esmerilado y virutas de torno de super aleaciones, así como álabes de turbina y piezas de motor anticuados o desgastados. Los procesos de recuperación son los siguientes:

- *Clasificación manual.* La chatarra sin tratar se clasifica a mano para identificar y separar los componentes de base cobalto, los de base níquel y los no procesables. En esta operación se produce polvo.
- *Desengrasado.* La chatarra sucia clasificada se carga en una unidad de desengrasado por la que circulan vapores de percloroetileno. Este disolvente elimina la grasa y el aceite de la chatarra. Después se condensa la mezcla de vapores de disolvente, aceite y grasa y se recupera el disolvente. Hay riesgo de exposiciones al disolvente.
- *Limpieza por chorro abrasivo.* La chatarra desengrasada se limpia con chorro abrasivo para eliminar la suciedad, los óxidos y la corrosión. Puede producirse polvo dependiendo del abrasivo que se utilice.
- *Proceso de limpieza en baño ácido y tratamiento químico.* La chatarra sometida a limpieza con chorro abrasivo se trata con ácidos para eliminar los residuos contaminantes de óxido y corrosión. Existe riesgo de exposición a neblinas ácidas.
- *Fundición al vacío.* La chatarra limpia se carga en un horno de vacío y se funde por arco eléctrico o inducción. Puede producirse exposición a metales pesados.
- *Colada.* La aleación fundida se cuela en lingotes. Hay riesgo de estrés por calor.

La Tabla 82.18 ofrece un resumen de las exposiciones asociadas con la recuperación de cobalto y de las correspondientes medidas de control.

### Recuperación de estaño

Las principales fuentes de materias primas son recortes de acero estañado, rechazos de empresas fabricantes de envases de hojalata, bobinas de estañado rechazadas procedentes de la industria del acero, impurezas y lodos de estaño, impurezas y lodos de soldadura, piezas de bronce usadas o rechazadas y chatarra de estaño. En muchos de los procesos se forma polvo de estaño y neblinas ácidas.

- **Desaluminización.** En este proceso se utiliza hidróxido sódico caliente para lixiviar el aluminio contenido en la chatarra de hojalata poniéndola en contacto con el hidróxido sódico, separando la disolución de aluminato sódico de la chatarra residual, bombeando el aluminato de sodio a una operación de afino para recuperar el estaño soluble y recuperando la chatarra de estaño desaluminizada para utilizarla como carga en posteriores procesos.
- **Mezcla de cargas.** Este proceso es una operación mecánica en la que se prepara un lote adecuado para su carga en el horno de fundición, mezclando lodos e impurezas con un contenido sustancial de estaño.
- **Desestañado químico.** Este proceso extrae el estaño de la chatarra. Se añade una disolución caliente de hidróxido sódico y nitrato o nitrato de sodio a la chatarra desaluminizada o sin tratar. Una vez completada la reacción de desestañado, la disolución se drena y se bombea a un proceso de afino y colada, después de lo cual la chatarra desestañada se somete a un lavado.
- **Fundición de impurezas.** Este proceso se emplea para purificar parcialmente las impurezas y producir metal en bruto en el horno fundiendo la carga, colando el metal sin afinar y evacuando las matas y escorias.
- **Lixiviación y filtración de polvo.** En este proceso se extraen el zinc y el cloro del polvo del conducto de humos por lixiviación con ácido sulfúrico, filtrando la mezcla resultante para separar el ácido y el zinc y el cloro disueltos del polvo lixiviado, secando el polvo en un secador y llevando de nuevo el polvo rico en estaño y plomo al proceso de mezcla de cargas.
- **Decantación y filtración en filtro de hojas.** Este proceso purifica la disolución de estannato sódico producida en el proceso de desestañado químico. Las impurezas, tales como plata, mercurio, cobre, cadmio, algo de hierro, cobalto y níquel, se precipitan como sulfuros.
- **Evapocentrifugado.** El estannato sódico se concentra a partir de la solución purificada mediante evaporación y cristalización, y se recupera por centrifugado.
- **Afinado electrolítico.** En este proceso se produce estaño catódico puro a partir de la disolución purificada de estannato sódico, haciendo pasar dicha solución por células electrolíticas, extrayendo los cátodos una vez depositado el estaño y separando éste de los cátodos.
- **Acidificación y filtración.** Este proceso produce un óxido de estaño hidratado a partir de la disolución de estannato sódico purificada. El óxido obtenido puede procesarse para producir el óxido anhídrico o fundirse para obtener estaño elemental. El óxido hidratado se neutraliza con ácido sulfúrico para formar el óxido de estaño hidratado y se filtra para separar el hidrato como torta de filtro.

Tabla 82.19 • Controles técnicos y administrativos para el estaño, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Desaluminización	Hidróxido sódico	Extracción local; equipo de protección personal—gafas de seguridad resistentes a los productos químicos y/o pantalla facial
Mezcla de cargas	Polvo	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas
Desestañado químico	Sustancias cáusticas	Ventilación por extracción local; equipo de protección personal—gafas de seguridad resistentes a los productos químicos y/o pantalla facial
Fundición de impurezas	Polvo y calor	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, líquidos
Lixiviación y filtración de polvo	Polvo	Ventilación por extracción local, ventilación general de zonas
Decantación y filtración en filtro de hojas	No se ha determinado ninguna	No se ha determinado ninguno
Evapocentrifugado	No se ha determinado ninguna	No se ha determinado ninguno
Afinado electrolítico	Neblina ácida	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas; equipo de protección personal—gafas de seguridad resistentes a los productos químicos y/o pantalla facial
Acidificación y filtración	Neblinas ácidas	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas; equipo de protección personal—gafas de seguridad resistentes a los productos químicos y/o pantalla facial
Afinado a fuego	Calor	Régimen de trabajo/descanso, equipo de protección personal
Fundición	Gases de combustión, vapores y polvo, calor	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, equipo de protección personal
Calcinación	Polvo, vapores, calor	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, equipo de protección personal
Afinado en caldera	Polvo, vapores, calor	Ventilación por extracción local y ventilación general de zonas, régimen de trabajo/descanso, equipo de protección personal

Tabla 82.20 • Controles técnicos y administrativos para el titanio, por operaciones.

Equipo de proceso	Exposiciones	Controles técnicos y administrativos
Desengrasado con disolvente	Disolvente	Extracción local y recuperación de disolvente
Limpieza en baño ácido	Acidos	Pantallas faciales, mandiles, mangas largas, gafas o lentes de seguridad
Electroafinado	No se conoce ninguno	No se conoce ninguno
Fundición	Metales volátiles, ruido	Ventilación por extracción local y control del ruido de los quemadores; equipo de protección personal—protección auditiva
Colada	Calor	Equipo de protección personal

- *Afinado a fuego.* Este proceso produce estaño purificado a partir del estaño catódico fundiendo la carga, eliminando las impurezas, como escoria y espuma, vertiendo el metal fundido y colando el estaño metálico.
- *Fundición.* Este proceso se emplea para producir estaño cuando no es posible el afinado electrolítico. El proceso consiste en reducir el óxido de estaño hidratado con un reductor, fundir el estaño metálico formado, despumar las impurezas, y verter y colar el estaño fundido.
- *Calcinación.* Este proceso convierte los óxidos de estaño hidratados en óxido estánnico anhidro calcinando el hidrato y extrayendo y empaquetando los óxidos estánnicos.
- *Afinado en caldera.* Este proceso se emplea para purificar el metal en bruto del horno cargando con él una caldera precalentada, secando la espuma para eliminar las impurezas como escoria y mata, utilizando azufre como fundente para separar el cobre como mata, empleando aluminio como fundente para eliminar el antimonio, y colando el metal fundido en moldes de las formas deseadas.

La Tabla 82.19 ofrece un resumen de las exposiciones asociadas con la recuperación de estaño y de las correspondientes medidas de control.

### Recuperación de titanio

Las dos fuentes principales de chatarra de titanio son los consumidores domésticos y los de titanio. La chatarra doméstica que se genera con el mecanizado y la fabricación de productos de titanio comprende chapas cortadas, planchas, recortes, virutas de torno y virutas de taladrado. La chatarra de consumo se compone de productos de titanio reciclados. Las recuperación se efectúa mediante las siguientes operaciones:

- *Desengrasado.* En este proceso la chatarra, clasificada por tamaños, se trata con disolvente orgánico vaporizado (por ej., tricloroetileno). La grasa y el aceite contaminantes se separan de la chatarra por la acción del vapor de disolvente. El disolvente se recicla hasta que pierde totalmente su capacidad desengrasante. Una vez agotado, puede regenerarse. La chatarra también puede desengrasarse con vapor y detergente.
- *Limpieza en baño.* El proceso de limpieza en baño ácido elimina la cascarilla de óxido que queda tras la operación de desengrasado, mediante lixiviación con una disolución de ácido

clorhídrico y fluorhídrico. Después del tratamiento con ácido la chatarra se lava con agua y se seca.

- *Electroafinado.* El electroafinado es un proceso de tratamiento previo de la chatarra de titanio por inmersión en una sal fundida.
- *Fundición.* La chatarra de titanio pretratada se funde con aleantes en un horno de arco eléctrico al vacío para formar una aleación de titanio. Los materiales utilizados son chatarra de titanio pretratada y aleantes como aluminio, vanadio, molibdeno, estaño, circonio, paladio, niobio y cromo.
- *Colada.* El titanio fundido se cuela en moldes y al solidificarse se convierte en una barra denominada lingote.

Las medidas de control de las exposiciones que se producen en los procesos de recuperación de titanio se relacionan en la Tabla 82.20.

## CUESTIONES AMBIENTALES EN EL ACABADO DE SUPERFICIES METÁLICAS Y LOS RECUBRIMIENTOS INDUSTRIALES

Stewart Forbes

### Acabado de superficies metálicas

El tratamiento de la superficie de los metales aumenta su duración y mejora su aspecto. Un mismo producto puede recibir más de un tratamiento de este tipo—por ejemplo, un panel de la carrocería de un automóvil puede fosfatarse, imprimirse y pintarse. Este artículo versa sobre los procesos utilizados para el tratamiento de la superficie de los metales y sobre los métodos empleados para reducir su impacto ambiental.

Las operaciones de una empresa de acabados de superficies metálicas requieren la cooperación entre la dirección de la empresa, los trabajadores, el gobierno y la comunidad para reducir al mínimo eficazmente sus efectos sobre el medio ambiente. A la sociedad le preocupan la magnitud y los efectos a largo plazo de la contaminación del medio ambiente atmosférico, acuático y terrestre. La *Gestión ambiental efectiva* se basa en un profundo conocimiento de todos los elementos, sustancias químicas, metales y procesos utilizados, y de los productos y elementos generados.

La *planificación de la prevención de la contaminación* desplaza la filosofía de la gestión ambiental de la reacción ante los problemas a la previsión de soluciones mediante la sustitución de productos químicos, la modificación de procesos y el reciclado interno, de acuerdo con la siguiente secuencia:

1. Aplicar la prevención de la contaminación a todos los aspectos de la empresa.
2. Determinar las corrientes de residuos.
3. Establecer prioridades de actuación.
4. Determinar el origen de los residuos.
5. Definir y ejecutar modificaciones que reduzcan o eliminen los residuos.
6. Medir los resultados.

Estableciendo nuevas prioridades de actuación y repitiendo la secuencia de actuaciones, se consiguen continuas mejoras.

La documentación detallada de los procesos permitirá determinar las corrientes de residuos y establecer prioridades para su reducción. Las decisiones documentadas sobre posibles modificaciones favorecen:

- la introducción de mejoras fácilmente viables en las operaciones
- las modificaciones de procesos con la participación de clientes y suministradores
- los cambios a actividades menos perjudiciales siempre que sea posible
- la reutilización y el reciclaje cuando no sea posible efectuar cambios
- el uso de vertederos para la evacuación de residuos peligrosos solo como último recurso.

**Principales procesos y procedimientos normalizados**

La *Limpieza* es necesaria porque todos los procesos de acabado de superficies metálicas requieren que las piezas que van a recibir el acabado estén libres de suciedad orgánica e inorgánica, como aceites, óxido y productos pulimentadores. Los tres tipos básicos de limpiadores utilizados son los disolventes, los vapores desengrasantes y los detergentes alcalinos.

Los métodos de limpieza a base de disolventes y de vapores desengrasantes han sido sustituidos casi totalmente por el uso de materiales alcalinos cuando los procesos subsiguientes se realizan en fase húmeda. Siguen utilizándose disolventes y vapores desengrasantes cuando es necesario que las piezas queden limpias y secas sin ningún proceso posterior en fase húmeda. En algunos casos los disolventes volátiles están siendo sustituidos por otros, como los terpenos. En el desengrasado al vapor, algunos materiales peligrosos se han sustituido por otros menos tóxicos, como el 1,1,1-tricloroetano (aunque este disolvente está siendo abandonado gradualmente por su potencial destructor de ozono).

Los ciclos de limpieza alcalinos suelen incluir una operación de inmersión seguida de electrolimpieza anódica y de inmersión en una disolución débilmente ácida. Para limpiar aluminio se emplean por lo general productos exentos de silicatos que no lo atacan químicamente. Los ácidos más utilizados son el sulfúrico, el clorhídrico y el nítrico.

En el *anodizado*, un proceso electroquímico destinado a aumentar el espesor de la película de óxido depositada sobre la superficie del metal (frecuentemente se aplica al aluminio), las piezas se tratan con disoluciones diluidas de ácido crómico o sulfúrico.

El *recubrimiento por conversión* se utiliza para proporcionar a la superficie una base para su pintura posterior o con el fin de pasivarla para protegerla de la oxidación. En el cromado, las piezas se sumergen en una disolución de cromo hexavalente con agentes orgánicos activos e inactivos. Para el fosfatado, las piezas se sumergen en ácido fosfórico diluido con otros agentes. La pasivación se efectúa por inmersión en ácido nítrico solo o con dicromato sódico.

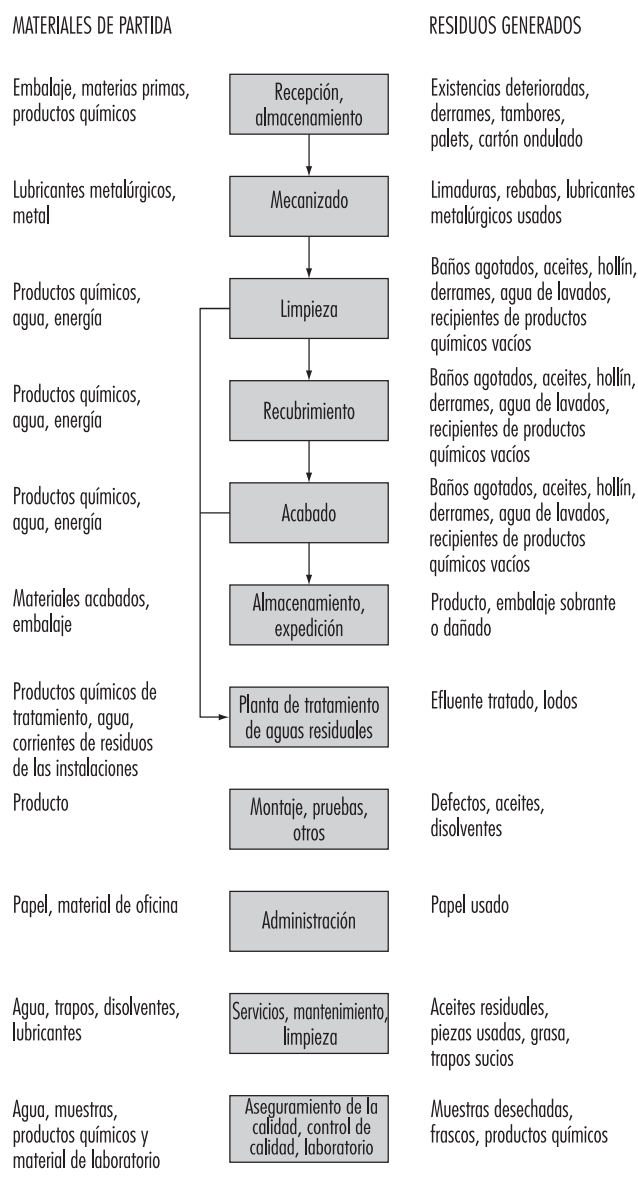
El *recubrimiento no electrolítico* consiste en la deposición de metal sin utilizar electricidad. En la fabricación de placas de circuitos impresos se utiliza el cobreado o niquelado no electrolítico.

El *recubrimiento electrolítico* consiste en depositar una delgada capa metálica (de zinc, níquel, cobre, cromo, cadmio, estaño, latón, bronce, plomo, estaño y plomo, oro, plata y otros metales, como platino) sobre un sustrato (férreo o no). Los baños de proceso incluyen metales en disolución en fórmulas ácidas, alcalinas neutras y de cianuro alcalino (véase la Figura 82.7).

El *fresado químico y el mordentado* son procesos de inmersión en disoluciones controladas utilizando reactivos y mordientes químicos. El aluminio se ataca normalmente con sosa cáustica antes del anodizado o el abrillantado químico en una disolución que puede contener ácido nítrico, fosfórico y sulfúrico.

Los *recubrimientos por inmersión en caliente* consisten en la aplicación de un recubrimiento metálico a la superficie de una pieza por inmersión en metal fundido (zincado o estañado de acero).

Figura 82.7 • Materias de partida y residuos generados en una cadena típica de recubrimiento electrolítico.



**Buenas prácticas de gestión**

Pueden conseguirse importantes mejoras en lo tocante a seguridad, salud y medio ambiente introduciendo en los procesos mejoras como las siguientes:

- utilizando lavados a contracorriente y controles de conductividad.
- aumentando el tiempo de drenaje
- empleando más o mejores tensoactivos
- utilizando temperaturas de proceso lo más altas posible para reducir la viscosidad y así aumentar la recuperación de escurriduras (recuperación de la solución que ha quedado adherida al metal)
- recurriendo a la agitación con aire en el lavado para aumentar su eficacia
- usando bolas de plástico en los tanques de recubrimiento para reducir la formación de neblinas

- utilizando mejores sistemas de filtración en los tanques de recubrimiento para reducir la frecuencia del tratamiento de purificación
- colocando un bordillo alrededor de todas las zonas de proceso para contener los derrames
- empleando tratamientos separados para los metales recuperables, tales como el níquel
- instalando sistemas de recuperación, por ejemplo de intercambio iónico, evaporación atmosférica, evaporación al vacío, recuperación electrolítica, ósmosis inversa y electrodiálisis
- complementando los sistemas de recuperación de escurriduras con reducciones de la adherencia de contaminantes y mejores sistemas de limpieza
- utilizando modernos sistemas de control de existencias para reducir los residuos y los riesgos de los lugares de trabajo
- aplicando procedimientos estándar (es decir, procedimientos por escrito, revisiones periódicas de las operaciones y registros cronológicos rigurosos de las mismas) que sirvan de base a una sólida estructura de gestión ambiental.

### Planificación ambiental para residuos específicos

Ciertas corrientes de residuos, normalmente disoluciones de recubrimiento agotadas, pueden reducirse por los siguientes métodos:

- *Filtración.* Pueden utilizarse filtros de cartuchos o de tierra de diatomeas para eliminar los sólidos acumulados que reducen la eficacia del proceso.
- Mediante *tratamiento con carbono* pueden eliminarse los contaminantes orgánicos (aplicados sobre todo en el níquelado, en el cobreado electrolítico y en el zincado y cadmiado).
- *Agua purificada.* Los contaminantes naturales del agua de relleno y de lavado (por ej., calcio, hierro, magnesio, manganeso, cloro y carbonatos) pueden eliminarse mediante desionización, destilación u ósmosis inversa. Mejorando la eficacia del agua de lavado se reduce el volumen de lodos de los baños que requieren tratamiento.
- *Congelación de los carbonatos de los baños de cianuro.* Reduciendo la temperatura del baño a  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  cristalizan los carbonatos formados en el baño de cianuro por descomposición del cianuro, densidades excesivas de corriente anódica y adsorción de dióxido de carbono del aire, y se facilita su eliminación.
- *Precipitación.* Los contaminantes metálicos que entran en el baño como impurezas de los ánodos, pueden eliminarse por precipitación con cianuro de bario, hidróxido de bario, hidróxido cálcico, sulfato cálcico o cianuro cálcico.
- *Alternativas al cromo hexavalente.* El cromo hexavalente puede sustituirse por disoluciones de recubrimiento de cromo trivalente para cromados decorativos. En ocasiones, los recubrimientos de conversión de cromo para tratamientos previos a la pintura se pueden sustituir por recubrimientos de conversión sin cromo o químicas de cromo sin lavado.
- *Químicas de proceso no queladas.* En lugar de añadir queladores a los baños de proceso para controlar la concentración de iones libres en la disolución, pueden utilizarse químicas de proceso no queladas para que no sea necesario mantener los metales en disolución. Se puede dejar que estos metales precipiten y extraerlos por filtración continua.
- *Productos químicos de proceso sin cianuro.* Las corrientes de residuos que contienen cianuro libre se tratan normalmente con hipoclorito o con cloro para producir la oxidación, y en el caso de los cianuros complejos se utiliza por lo general sulfato de hierro para provocar su precipitación. El uso de químicas de proceso sin cianuro elimina un paso de tratamiento y reduce el volumen de lodos.
- *Desengrasado con disolventes.* En lugar de usar disolventes para desengrasar las piezas antes del proceso, pueden utilizarse

baños de limpieza alcalinos calientes. Se puede aumentar la eficacia de los limpiadores alcalinos aplicando corrientes eléctricas o ultrasonidos. Las ventajas que supone evitar los vapores y lodos de disolvente suelen compensar cualquier coste operativo adicional.

- *Limpiadores alcalinos.* Puede evitarse el tener que desechar los limpiadores alcalinos cuando la acumulación de aceite, grasa y suciedad producida por el uso alcanza un nivel que reduce la eficacia del baño, utilizando dispositivos de despumación para eliminar los aceites que flotan libremente, dispositivos de decantación o filtros de cartucho para eliminar partículas y agentes de coalescencia de aceite y agua, y utilizando microfiltración o ultrafiltración para eliminar los aceites emulsificados.
- *Reducción de las escurriduras.* Reduciendo el volumen de disolución que queda adherida a las piezas en los baños de proceso disminuye la cantidad de productos químicos valiosos que contaminan el agua de lavado, lo que a su vez reduce la cantidad de lodos generados en un proceso de tratamiento convencional de precipitación de metales.

Hay varios métodos para reducir las escurriduras, entre ellos los siguientes:

- *Concentración operativa del baño de proceso.* La concentración química deberá ser lo más baja posible con el fin de reducir al mínimo la viscosidad (para un drenaje más rápido) y la cantidad de productos químicos (en la película).
- *Temperatura operativa del baño de proceso.* La viscosidad de la disolución de proceso puede reducirse elevando la temperatura del baño.
- *Tensoactivos.* Se puede reducir la tensión superficial de la solución añadiendo tensoactivos al baño de proceso.
- *Colocación de la pieza.* La pieza deberá colocarse sobre el soporte de manera que la película adherente escurra libremente y no quede retenida en huecos o ranuras.
- *Tiempo de extracción o de drenaje.* Cuanto antes se extrae una pieza del baño de proceso, más gruesa es la película adherida a la superficie de la pieza.
- *Chorros de aire.* Se pueden mejorar el drenaje y el secado proyectando un chorro de aire sobre la pieza mientras el soporte de ésta se eleva por encima del tanque de proceso.
- *Lavados por aspersión.* Pueden utilizarse por encima de los baños calientes para igualar el caudal de lavado con la velocidad de evaporación del tanque.
- *Baños de recubrimiento.* Se deben eliminar los carbonatos y los contaminantes orgánicos para evitar que se acumule la contaminación, ya que ésta aumenta la viscosidad del baño.
- *Tablas de drenaje.* Los huecos entre tanques de proceso deben cubrirse con tablas de drenaje para capturar las disoluciones de proceso y devolverlas al baño de proceso.
- *Tanques de escurrido.* Las piezas deben colocarse en tanques de escurrido (tanques de "lavado estático") antes de la operación de lavado estándar.

Para la recuperación de las escurriduras de productos químicos se utilizan diversas tecnologías, a saber:

- *Evaporación.* Los evaporadores más comunes son los atmosféricos, pero los evaporadores al vacío permiten ahorrar energía.
- El *intercambio iónico* se utiliza para la recuperación química del agua de lavado.
- *Extracción electrolítica.* Se trata de un proceso electrolítico por el que se reducen los metales disueltos en la disolución y se depositan en el cátodo.
- *Electrodiálisis.* Se realiza utilizando membranas permeables a los iones y aplicando corriente para separar especies iónicas de la disolución.

- *Osmosis inversa*. Consiste en el empleo de una membrana semi-permeable para producir agua purificada y una disolución iónica concentrada. El agua es obligada a atravesar la membrana aplicando una elevada presión y la mayor parte de las sales disueltas son retenidas por la membrana.

### Agua de lavado

La mayor parte de los residuos peligrosos producidos en las instalaciones de acabado de superficies metálicas proceden de las aguas residuales producidas por las operaciones de lavado que siguen a la limpieza y el recubrimiento metálico. Aumentando la eficacia de lavado de las instalaciones se puede reducir considerablemente el caudal de aguas residuales.

Hay dos estrategias básicas que mejoran la eficacia de lavado. La primera es la turbulencia entre la pieza y el agua de lavado, que puede generarse mediante lavados por aspersión y agitación del agua de lavado moviendo el soporte de la pieza o utilizando corrientes forzadas de agua o aire. La segunda consiste en aumentar el tiempo de contacto entre la pieza y el agua de lavado. Utilizando varios tanques de lavado a contracorriente dispuestos en serie, se reduce la cantidad de agua de lavado utilizada.

### Recubrimientos industriales

El término *recubrimientos* engloba pinturas, barnices, lacas, esmaltes y gomas lacas, masillas, sellantes y tapaporos, decapantes para pinturas y barnices, limpiadores de brochas de pintura y otros productos de pintura análogos. Los recubrimientos líquidos contienen pigmentos y aditivos dispersos en una mezcla de aglutinante líquido y disolvente. Los pigmentos son compuestos inorgánicos u orgánicos que dan color y opacidad al recubrimiento y afectan a su fluidez y durabilidad. Normalmente contienen metales pesados tales como cadmio, plomo, zinc, cromo y cobalto. El ligante refuerza la adhesividad, cohesividad y consistencia del recubrimiento, y es el principal componente que queda en la superficie cuando la operación de recubrimiento está completa. Como ligantes se utilizan diversos aceites, resinas, gomas y polímeros. Se pueden incorporar a los recubrimientos aditivos tales como cargas de relleno y diluyentes para reducir los costes de fabricación y aumentar la durabilidad del recubrimiento.

Entre los distintos tipos de disolventes orgánicos utilizados en los recubrimientos hay hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, ésteres, cetonas, éteres de glicol y alcoholes. Los disolventes dispersan o disuelven los ligantes y reducen la viscosidad y espesor del recubrimiento. Los disolventes utilizados en las fórmulas de los recubrimientos son peligrosos porque muchos de ellos son cancerígenos para el hombre e inflamables o explosivos. La mayoría de los disolventes contenidos en un recubrimiento se evaporan al endurecer éste, con lo que se generan emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Las emisiones de COV están siendo objeto de reglamentos cada vez más estrictos, debido a sus efectos negativos para la salud humana y el medio ambiente. La preocupación que suscitan los ingredientes, tecnologías de aplicación y residuos de los recubrimientos convencionales por sus efectos para el medio ambiente, están impulsando el desarrollo de alternativas para prevenir la contaminación.

La mayoría de los recubrimientos se utilizan en productos arquitectónicos, industriales o especiales. Los recubrimientos arquitectónicos se emplean en edificios y en productos para los mismos, así como con fines decorativos y de protección, como en el caso de los barnices destinados a proteger la madera. Las instalaciones industriales incorporan operaciones de recubrimiento en diversos procesos de producción. Las industrias

automovilística, de envases metálicos, maquinaria agrícola, recubrimiento de bobinas, muebles y accesorios de madera y metal, y electrodomésticos, son los principales consumidores industriales de recubrimientos.

El diseño de una fórmula de recubrimiento depende de la finalidad de su aplicación. Los recubrimientos proporcionan atractivo estético, previenen la corrosión y protegen las superficies. Su composición viene determinada por factores tales como el coste, función, seguridad del producto, seguridad ambiental, eficiencia del transporte y velocidad de secado y endurecimiento.

### Procesos de recubrimiento

La mayoría de los procesos de recubrimiento comprenden cinco operaciones: manipulación y preparación de las materias primas, preparación de la superficie, recubrimiento, limpieza del equipo y gestión de los residuos.

#### Manipulación y preparación de las materias primas

Esta fase comprende el almacenamiento de existencias, las operaciones de mezcla, la dilución y ajuste de los recubrimientos y la distribución de las materias primas por las instalaciones. Se requieren prácticas y procedimientos de control y manutención para producir la menor cantidad posible de residuos por deterioro de material, productos fuera de especificación y preparación inadecuada a causa de una dilución excesiva, con el consiguiente desperdicio. La distribución, tanto si se efectúa manualmente como por medio de un sistema de tuberías, debe planificarse para evitar desperdicios.

#### Preparación de la superficie

El tipo de técnica utilizado para preparar la superficie depende de la superficie que se recubre—preparación previa, cantidad de suciedad, presencia de grasa, tipo de recubrimiento a aplicar y acabado requerido de la superficie. Las operaciones de preparación más comunes son el desengrasado, la imprimación o fosfatado y el decapado. En cuanto al acabado de superficies metálicas, el desengrasado comprende el restregado con disolventes, la limpieza en frío o el desengrasado al vapor con disolventes halogenados, la limpieza en disolución acuosa alcalina o en disolución semiacuosa, o la limpieza con hidrocarburos alifáticos para eliminar la suciedad orgánica, tierra, aceite y grasa. La cascarilla de laminación y el óxido se eliminan mediante baños ácidos, limpieza abrasiva o limpieza a la llama.

Aparte de la limpieza, la preparación más común de las superficies metálicas es la fosfatación, que se utiliza para favorecer la adhesión de los recubrimientos orgánicos a las superficies metálicas y retrasar la corrosión. Los recubrimientos con fosfato se aplican por inmersión o rociado de las superficies metálicas con una disolución de fosfato de zinc, hierro o manganeso. La fosfatación es un proceso de acabado de superficies similar al recubrimiento electrolítico; consiste en una serie de baños de productos químicos de proceso y de baños de lavado en los que se sumergen las piezas para dar a la superficie la preparación deseada. Véase el artículo “Metales, tratamiento de superficie” en este capítulo.

Las superficies que requieren reparación, inspección o la renovación del recubrimiento, se someten a un decapado químico o mecánico. El método químico de eliminación de recubrimientos utilizado con más frecuencia es el decapado con disolvente. Estas disoluciones contienen por lo general fenol, cloruro de metileno y un ácido orgánico para disolver el recubrimiento de la superficie. El lavado final con agua para eliminar los productos químicos puede generar grandes cantidades de aguas residuales. El proceso mecánico usual es la limpieza con chorro abrasivo, una operación en seco en la que se utiliza aire



comprimido para proyectar un medio abrasivo contra la superficie con objeto de eliminar el recubrimiento.

Las operaciones de preparación de la superficie influyen en la cantidad de residuos que genera el proceso de preparación específico. Si la preparación de la superficie es inadecuada y a causa de ello el recubrimiento es deficiente, su eliminación y el nuevo recubrimiento generarán más residuos.

### Recubrimiento

La operación de recubrimiento comprende la transferencia del recubrimiento a la superficie y su endurecimiento sobre ésta. La mayoría de las tecnologías de recubrimiento pertenecen a una de estas cinco clases básicas: recubrimiento por inmersión, recubrimiento con rodillo, recubrimiento por chorro, recubrimiento por aspersión y la técnica más común, el recubrimiento a pistola con productos de base disolvente utilizando aire comprimido.

Los recubrimientos a pistola atomizados con aire comprimido se aplican por lo general en un ambiente controlado para contener las emisiones de disolvente y el exceso de producto aplicado. Los dispositivos utilizados con este último fin son filtros de material textil o cortinas de agua, lo que genera filtros usados o aguas residuales procedentes de los sistemas de depuración de aire.

El endurecimiento se lleva a cabo para convertir el ligante del recubrimiento en una superficie dura, resistente y adherente. Los mecanismos empleados para ello son el secado, natural o en estufa, o la exposición a un haz de electrones o de luz infrarroja o ultravioleta. El endurecimiento genera considerables cantidades de COV cuando los recubrimientos son de base disolvente y entraña riesgo de explosión si las concentraciones de disolvente aumentan por encima del límite inferior de concentración explosiva. Por consiguiente, las instalaciones de endurecimiento están equipadas con dispositivos de control de la contaminación atmosférica para prevenir las emisiones de COV y como control de seguridad contra explosiones.

La preocupación por el medio ambiente y la salud, el endurecimiento de las normativas que afectan a los recubrimientos de composición convencional y el elevado coste de los disolventes y de la evacuación de los residuos peligrosos han creado una demanda de recubrimientos de composiciones alternativas que contengan menos constituyentes peligrosos y cuya aplicación genere menos residuos. Entre los recubrimientos de composición alternativa se encuentran los siguientes:

- *Recubrimientos de alto contenido sólido*, con doble cantidad de pigmento y resina en el mismo volumen de disolvente que los recubrimientos convencionales. Su aplicación reduce las emisiones de COV entre un 62 y un 85 % en comparación con los recubrimientos convencionales de base disolvente y bajo contenido sólido, al ser menor el contenido de disolvente.

- *Recubrimientos de base acuosa* en los que se utiliza como vehículo una mezcla de agua y un disolvente orgánico, y como base agua. Los recubrimientos de base acuosa generan entre un 80 y un 95 % menos de emisiones de COV y disolventes agotados que los recubrimientos convencionales de base disolvente y bajo contenido sólido.
- *Recubrimientos en polvo* que no contienen ningún disolvente orgánico, sino que están formados por partículas de pigmento y resina finamente pulverizadas. Estos polvos son o bien termoplásticos (es decir, con resina de alto peso molecular para conseguir recubrimientos gruesos) o termoestables (compuestos de bajo peso molecular que forman una capa delgada antes de la reticulación química).

### Limpieza del equipo

En los procesos de recubrimiento, la limpieza del equipo es una operación necesaria de mantenimiento de rutina que crea considerables cantidades de residuos peligrosos, sobre todo si se utilizan disolventes halogenados para la limpieza. Normalmente, la limpieza del equipo empleado para los recubrimientos de base disolvente se realiza a mano, utilizando disolventes orgánicos para eliminar los recubrimientos del equipo de proceso. Las tuberías requieren una serie de lavados interiores con disolvente hasta que quedan limpias. El equipo de recubrimiento debe limpiarse entre cambios de producto y después de las paradas del proceso. Las prácticas y procedimientos utilizados determinan el nivel de residuos producido por estas actividades.

### Gestión de residuos

Los procesos de recubrimiento generan diversas corrientes de residuos. Los residuos sólidos comprenden recipientes vacíos de productos de recubrimiento, lodos formados por el recubrimiento aplicado en exceso y la limpieza del equipo, filtros y materiales abrasivos agotados, recubrimiento seco y trapos de limpieza.

Los residuos líquidos están formados por agua residual procedente de la preparación de superficies, el control de sobreaplicaciones o la limpieza del equipo, recubrimientos o materiales de preparación de superficies aplicados en exceso o fuera de especificación, sobreaplicaciones por pulverización, derrames y disoluciones de limpieza agotadas. A medida que aumentan los costes de evacuación, van teniendo mayor aceptación los sistemas de reciclaje interno de disolventes en circuito cerrado. Normalmente, los líquidos de base acuosa se tratan en las instalaciones antes de su vertido en sistemas de tratamiento públicos.

Todos los procesos convencionales en los que se utilizan recubrimientos de base disolvente generan emisiones de COV que requieren el empleo de dispositivos de control, tales como unidades de adsorción de carbon, condensadores u oxidantes catalíticos térmicos.

### Referencias

Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). 1984. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Vol. 34. Lyon: IARC.

Buonicore, AJ, T Davis (dirs.). 1992. *Air Pollution Engineering Manual*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold/Air and Waste Management Association.

Environmental Protection Agency (EPA). 1995. *Profile of the Nonferrous Metals Industry*. EPA/310-R-95-010. Washington, DC: EPA.

Johnson A, CY Moira, L MacLean, E Atkins, A Dybunio, F Cheng, D Enarson. 1985. Respiratory abnormalities amongst workers in iron and steel industry. *Brit J Ind Med* 42:94-100.

Kronenberg RS, JC Levin, RF Dodson, JGN Garcia, DE Griffith. 1991. Asbestos-related disease in employees of a steel mill and a glass bottle manufacturing plant. *Ann NY Acad Sci* 643:397-403.

Landrigan, PJ, MG Chermiack, FA Lewis, LR Catlett, RW Hornung. 1986. Silicosis in a grey iron foundry. The persistence of an ancient disease. *Scand J Work Environ Health* 12:32-39.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1996. *Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposures to Metalworking Fluids*. Cincinnati, Ohio: NIOSH.

Palheta, D, A Taylor. 1995. Mercury in environmental and biological samples from a gold mining area in the Amazon Region of Brazil. *Science of the Total Environment* 168:63-69.

Thomas, PR, D Clarke. 1992. Vibration white finger and Dupuytren's contracture: Are they related? *Occup Med* 42(3):155-158.

### Otras lecturas recomendadas

American National Standards Institute (ANSI). 1976. *Safety Requirements for the Construction, Care, and Use of Lathes*. ANSI B11.6-1976. Nueva York: ANSI.

—. 1988a. *The Use, Care, and Protection of Abrasive Wheels*. ANSI B7.1-1988. Nueva York: ANSI.

—. 1988b. *Safety in Welding and Cutting*. ANSI Z49.1-1988. Nueva York: ANSI.

American Petroleum Institute (API). 1971. *Chemistry and Petroleum for Classroom Use in Chemistry Courses*. Washington, DC: API.

- . 1980. *Facts about Oil*. Manual 4200. Washington, DC: API.
- . 1984. *Safe Operation of Inland Bulk Plants*. Publication 2008. Washington, DC: API.
- Antoni, H. 1978. Massnahmen zu höherer Sicherheit beim Spannen mit Backenfüttern [Medidas para aumentar la seguridad en la sujeción con herramientas de mordaza]. *Zeitschrift für industrielle Fertigung* 10:611–615.
- Burgess, WA. 1995. *Recognition of Health Hazards in Industry*, 2<sup>o</sup> edition. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH) Committee on Industrial Ventilation. 1992. *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice*, 22 ed. Cincinnati, Ohio: ACGIH.
- Exxon Company. 1987. *Encyclopedia for the User of Petroleum Products*. Houston, Texas: Exxon Company, USA, Marketing Technical Services.
- Goldsmith, AH, KW Vorpahl, KA French, PT Jordan, NB Jurinski. 1976. Health hazards from oil, soot and metals at a hot forging operation. *Am Ind Hyg Assoc J* 37:217–226.
- Gulf Publishing Company. 1964. *Petroleum Marketing and Transportation, 1964*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Harten, GA. 1976. Een nieuwe, ergonomisch verbeterde draaibank [Un torno nuevo y con mejoras ergonómicas]. *Tijdschrift voor sociale geneeskunde (Amstelveen)* 54(17):575–578.
- Kusiak, RA, J Springer, AC Ritchie, J Muller. 1991. Carcinoma of the lung in Ontario gold miners: Possible aetiological factors. *Brit J Ind Med* 48(12):808–817.
- Mobil Oil Corporation. 1990. *Handling, Storing and Dispensing Industrial Lubricants*. Mobil Technical Bulletin. Fairfax, Virginia: Mobil Oil Corporation.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 1975. *Ventilation Requirements for Grinding, Buffing and Polishing Operations*. NIOSH Publ. N° 75-105. Cincinnati, Ohio: NIOSH.
- National Safety Council. 1995. *Petroleum Section Safety and Health Fact Sheets, 1988-95*. Itasca, Illinois: National Safety Council.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). 1979. *Prudent Practices for Controlling Lead Exposure in the Secondary Lead Smelting Industry: A Guide for Employers and Employees*. Washington, DC: OSHA.
- . 1982. *Cooperative Assessment Program Manual for the Secondary Lead Smelting Industry*. Washington, DC: OSHA.
- . 1984. *Cooperative Assessment Program Manual for the Battery Manufacturing Industry*. Washington, DC: OSHA.
- Ontario Metal Finishing Industry Pollution Prevention Project. 1995. *Metal Finishing Pollution Prevention Guide*. Ottawa: Environment Canada, Water Technology International, Sheridan Environmental Technology Institute.
- Simonato, L, JJ Moulin, B Javeland, G Ferro, P Wild, R Winkelmann, R Saracci. 1994. A retrospective mortality study of workers exposed to arsenic in a gold mine and refinery in France. *Am J Ind Med* 25:652-633.