

MÉTODOS DE APLICACIÓN E INSTALACIONES DE SECADO/CURADO PARA PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS

Carlos A. Giudice y Andrea M. Pereyra
CIDEPINT (CIC-CONICET), Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata
E-mail: cagiudice@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

El comportamiento en servicio de una pintura o de un sistema de pinturas depende esencialmente de las propiedades fisicoquímicas del o de los productos aplicados, de la compatibilidad entre las diferentes capas, de los espesores de película seca, de la naturaleza del sustrato y de las características del medio agresivo. Factores complementarios pero igualmente significativos son la preparación de la superficie, la forma de aplicación y las condiciones ambientales del secado/curado.

La aplicación de las pinturas se puede implementar por métodos diversos y en función de aquél seleccionado se define la calidad de la mano de obra, el control de las operaciones involucradas y la programación de las tareas. La formulación de las pinturas, particularmente en lo referente a la composición de la mezcla solvente, depende en muchos casos del método de aplicación.

La aplicación involucra un conjunto de operaciones que tiene por objetivo transformar la película de pintura del estado líquido a un sólido muy delgado, firmemente adherido al material de base.

SELECCIÓN DEL MÉTODO DE APLICACIÓN

Los factores a considerar en lo referente a los productos a aplicar, se pueden clasificar en externos e intrínsecos. Entre los primeros se deben contemplar el tipo de sustrato, el tamaño de la estructura, la ubicación y aspectos relacionados con el diseño. Por su parte, entre los intrínsecos resultan relevantes las propiedades de las pinturas y el sistema seleccionado.

Entre los materiales absorbentes pueden citarse la madera y derivados, hormigones, mampostería, etc.

* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas/Universidad Tecnológica Nacional

** Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires/Universidad Tecnológica Nacional

FACTORES EXTERNOS

Naturaleza del sustrato. En *superficies nuevas y absorbentes* resulta conveniente aplicar la primera capa con pincel (generalmente una imprimación) para permitir el acceso del producto en todas las irregularidades del sustrato y particularmente en los poros y facilitar así la eliminación del aire y humedad retenidos en el interior de los mismos. Las capas restantes del sistema de pinturas pueden aplicarse también con pincel o cualquier otro método.

En *superficies no absorbentes* la aplicación puede llevarse a cabo por métodos diversos; en el caso particular de superficies metálicas que presentan irregularidades por la acción del medio agresivo, también y por los motivos antes enunciados, resulta conveniente aplicar la primera capa con pincel. Ejemplos de materiales no absorbentes están dados por el hierro, el acero, el aluminio, la chapa galvanizada, el vidrio, etc.

Tamaño, diseño y ubicación de la estructura. La elección del método de aplicación debe contemplar, entre otros factores, el tamaño de la misma, la presencia de ángulos vivos, la existencia de soldaduras y la facilidad del acceso.

Las estructuras nuevas generalmente se construyen en forma modular y se trasladan a obra para su ensamblado. Las condiciones operativas en el taller pueden optimizarse adecuadamente desde un punto de vista técnico-económico; en obra, generalmente se reparan las zonas dañadas, para aplicar finalmente las capas de terminación.

En lo referente al repintado de las superficies en servicio, la elección del método de aplicación debe contemplar las variables arriba citadas.

FACTORES INTRÍNSECOS

En general, los productos comerciales para su empleo en escala industrial presentan la viscosidad adecuada para su aplicación por cualquiera de los métodos disponibles, particularmente cuando la adquisición se realiza a través de especificaciones especialmente redactadas.

En países en los que los cambios térmicos son muy marcados en las diferentes estaciones, resulta frecuente la modificación de la mezcla solvente para ajustar el comportamiento reológico del producto. En caso de requerirse un ajuste de viscosidad en el momento de la aplicación, se deben seleccionar diluyentes aconsejados por el fabricante para evitar los fenómenos indeseables que genera una vaporización más rápida del propio solvente

OPERACIONES PREVIAS AL PINTADO

Estas operaciones son realmente trascendentes para alcanzar en servicio la performance estimada en ensayos de laboratorio o esperada según experiencias previas. La adquisición de

las pinturas debe realizarse contemplando el lapso que transcurrirá antes de su aplicación con el fin de evitar un prolongado tiempo en el envase.

El almacenamiento en el depósito debe realizarse en condiciones adecuadas, particularmente considerando la temperatura.

En todos los casos, resulta conveniente escribir en los envases la fecha de elaboración y/o de recepción para ser empleadas dentro del lapso mencionado en la especificación respectiva.

Homogeneización. Las pinturas incorrectamente dispersadas o con pobre estabilidad de la dispersión generalmente muestran una significativa floculación de los pigmentos en el envase durante el almacenamiento. La consecuencia de la citada asociación de partículas es el fenómeno de sedimentación. La incorporación del sedimento constituye la operación denominada homogeneización.

Los sedimentos blandos o esponjosos generalmente se redispersan por agitación manual con una espátula de dimensiones adecuadas. En el caso de los sedimentos duros resulta conveniente realizar una homogeneización mecánica mediante un agitador eléctrico con motor blindado o neumático; este último es más conveniente particularmente desde un punto de vista de la seguridad cuando se trata de productos de base solvente orgánico.

En muchos casos, la incorporación del sedimento resulta conveniente cumplimentándose las siguientes etapas: separar parcialmente el líquido sobrenadante, agitar manual o mecánicamente hasta redispersar los flóculos, agregar en cantidades crecientes bajo agitación el líquido inicialmente trasvasado hasta lograr una completa homogeneización. Las pinturas con un sedimento no totalmente reincorporado deben ser rechazadas

Algunos casos muy puntuales están dados cuando el producto se presenta en dos envases: Uno de ellos es cuando se emplean pigmentos metálicos (por ejemplo, cinc esférico y/o laminar) que resultan muy reactivos ante la presencia de trazas de humedad y/o con el ligante de la pintura; el pigmento se incorpora inmediatamente antes de iniciar la operación de pintado, bajo agitación muy cuidadosa con el fin de obtener un producto totalmente homogéneo. Otro caso de interés está dado por las pinturas de dos componentes que forman una película sólida por secado y posterior curado por reacción química de la base y el convertidor; luego de homogeneizar la base se debe adicionar el convertidor (en la relación indicada por el fabricante), bajo agitación hasta lograr uniformidad y se debe preparar sólo la cantidad necesaria para el trabajo a realizar en la jornada ya que la estabilidad por reacción química está restringida generalmente hasta 4 ó 10 horas según el tipo de producto.

Ajuste de viscosidad. La operación siguiente a la homogeneización es el ajuste de viscosidad; el grado de dilución depende del método de aplicación. Resulta oportuno remarcar que el diluyente debe ser el apropiado para cada composición y que se debe incorporar sólo la cantidad imprescindible para mejorar las condiciones de aplicación; una dilución excesiva disminuye el contenido de sólidos con la consiguiente reducción del espesor de película por capa y la posibilidad de generar escurrimiento en superficies verticales.

Filtración. Finalizado el ajuste de viscosidad, resulta recomendable el filtrado mediante un tamiz o una tela de malla adecuada con el fin de separar todas aquellas partículas o impurezas generadoras de defectos en la capacidad protectora o decorativa de la película aplicada.

Otras operaciones complementarias previas al pintado. Las operaciones complementarias pueden involucrar la preparación de andamios (móviles o fijos), el armado de estructuras para regular las condiciones ambientales (particularmente temperatura y humedad relativa) y alistamiento de los equipos e instrumentos para el control de la aplicación.

Una tarea esencial consiste en la correcta coordinación entre la limpieza de la superficie y la aplicación de la primera capa del sistema protector.

APLICACIÓN Y SECADO/CURADO. MÉTODOS DE APLICACIÓN Y CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN

Los métodos de aplicación incluyen los manuales, los procesos en gran escala y más recientemente los automatizados.

Métodos manuales de aplicación. La pintura se deposita sobre la superficie por acción del dispositivo que opera en contacto con la misma. Estos métodos son muy importantes y requieren una elevada habilidad y experiencia.

La *aplicación con pincel* constituye el método más antiguo y su técnica es sólo sencilla desde un punto de vista aparente. La elección del pincel, en lo referente a la calidad y tamaño, debe considerar el tipo de estructura y la calidad del acabado deseado.

Las variables de calidad de un pincel son el tipo de cerda (animal, vegetal o sintética), la longitud, la forma del corte de la punta de la fibra individual y del conjunto, la densidad y las propiedades fisicomecánicas, particularmente la flexibilidad.

Los pinceles de buena calidad se pueden emplear directamente; sin embargo, en todos los casos resulta aconsejable una inmersión previa en aceite de lino crudo evitando una deformación de su extremo por acción gravitatoria. Posteriormente, se debe lavar con aguarrás mineral para eliminar el exceso de aceite; la absorción del ligante de la pintura se reduce de esta manera sensiblemente.

La selección adecuada del pincel permite cubrir con una capa, dependiendo del tipo de sustrato y su diseño, aproximadamente entre 8 y 15 metros cuadrado por hora.

Finalmente y luego de su uso, el pincel se debe limpiar con el disolvente de la pintura. Luego, se aconseja dejarlo en suspensión para evitar su deformación en el mismo solvente; el nivel no debe alcanzar la virola para no producir el ablandamiento del pegamento que fija las cerdas al mango.

La **aplicación con guante** se emplea para el pintado de superficies irregulares, tales como cañerías y ángulos agudos, o bien difícilmente accesibles requieren la elección de otro método más conveniente que el pincel. Así, por ejemplo, puede seleccionarse un guante aplicador cuyo empleo tiene una marcada similitud con un rodillo: se ubica pintura sobre él y se desplaza posteriormente sobre la superficie a pintar.

La **aplicación con rodillo**, es un método que se emplea para pintar sobre superficies de elevado tamaño, preferentemente no muy irregulares. La selección del rodillo en lo referente a su dimensión, al material y al largo de las fibras resulta esencial para realizar una correcta y eficiente aplicación.

Los rodillos convencionales se sumergen en bandejas inclinadas a 40/45° y se desplazan varias veces por el escurridor para distribuir homogéneamente la pintura. El rendimiento en superficies grandes y lisas o al menos no muy irregulares oscila entre 20 y 50 m² por hora para cada capa.

Generalmente se complementa con el pincel, aplicando la pintura con rodillo en las superficies lisas de grandes dimensiones y retocando con pincel los bordes, rincones, ángulos, etc. En otros casos, cuando las superficies presentan muchas irregularidades por prolongada acción del medio o bien nuevas pero con elevada rugosidad resulta aconsejable aplicar la primera capa con pincel y continuar con rodillo las restantes

Los rodillos son diseñados para su adaptación a diversos sustratos según su forma o geometría; así por ejemplo existen rodillos para alambrados, para el interior de cañerías y para tareas específicas alimentados con aire a presión y para elevada capacidad de nivelación (acabado brillante).

La **aplicación con espátula** se emplea para pinturas líquidas sin solvente (por ejemplo productos epoxídicos de doble envase); estos productos requieren de esta herramienta especial, de variadas dimensiones, para lograr el acceso particularmente al interior de tanques para almacenamiento de agua potable o envases de productos alimenticios.

Los criterios de aplicación de los cuatro métodos anteriormente desarrollados se resumen en la Tabla I.

La **cortina (pulverización plana)** es un método muy empleado en la industria del mueble (puertas, revestimientos para paredes, etc.) y también para metales, papeles y cartones con una superficie plana o sólo ligeramente curvada (Figuras 1 y 2). La pintura es generalmente aplicada sobre la pieza transportada en una cinta a través de una cortina (pulverización plana descendente) generada en un pico de ranura de ancho ajustable; el excedente de la pintura se

recoge en un recipiente colector dispuesto debajo de la pieza a pintar; la pintura es recirculada generalmente luego de un ajuste de viscosidad y un proceso de filtrado.

En muchos casos la pieza y/o la pintura se precalientan para facilitar la aplicación y regular el tiempo de secado/curado. El espesor de la película se regula modificando el ancho de la ranura de pulverización y la velocidad de desplazamiento de la pieza; el rango de espesores es muy elevado y en muchos casos oscila entre 10 y 500 μm según la naturaleza de la pintura y del sustrato.

Una película más uniforme generalmente puede lograrse con una reducción de la presión en el pico pulverizador.

Las pinturas aplicadas por este método generalmente se curan por radiación UV (un solo componente) y también por acción térmica (dos componentes, aplicados desde picos separados).

Entre las características más importantes se encuentran:

- La calidad de la superficie debe ser muy buena.
- El ancho de la pieza está limitado.
- La geometría está restringida a sustratos planos.
- La velocidad operativa es elevada.
- La emisión de solventes es reducida.
- La eficiencia de la aplicación es muy satisfactoria.

Los *rodillos rotativos* se emplean para el pintado de hojas metálicas, terciados, papel, cartón, etc. ya que el procedimiento resulta, de este modo, muy económico y rápido, (Figura 3).

Un rodillo cromado, que opera como alimentador de la pintura, transfiere a ésta sobre un segundo rodillo, de mayor diámetro que el anterior, revestido usualmente con un caucho y que hace las veces de aplicador; la distancia entre ambos rodillos (giran en sentido opuesto) permite regular la cantidad de pintura aplicada. El rodillo aplicador transfiere la pintura sobre la pieza dispuesta tangencialmente en el plano horizontal inferior.

Tiempo atrás, el sentido de giro del rodillo aplicador y el desplazamiento de la pieza a pintar eran coincidentes; la reducida eficiencia y la incompleta cobertura condujo a diseñar el sistema de rotación inverso. Este último permite aplicar espesores de película que oscilan de unos pocos a varias decenas de micrometros, con productos de viscosidad muy diferentes, generando superficies extremadamente uniformes y muy brillantes.

Los aspectos más relevantes de este método están dados por requerir una moderada a buena calidad de superficie, de forma plana y de ancho limitado. Este método exhibe una elevada velocidad operativa, una reducida eliminación de solventes y una significativa eficiencia de la aplicación.

La **inmersión y procesos relacionados** son métodos muy simples y se emplean para el pintado de pequeñas piezas de producción en serie.

La **inmersión convencional** consiste en introducir la pieza absolutamente limpia en la pintura y retirarla inmediatamente. Especial cuidado en la velocidad de la inmersión/remoción del sustrato, sumado a una correcta (tipo y cantidad) de agentes tensioactivos, debe contemplarse para evitar la formación de burbujas generadoras de discontinuidades en la película.

La técnica de inmersión requiere un exhaustivo control del contenido de sólidos debido a la continua vaporización de los solventes (agua o de naturaleza orgánica), una agitación constante para evitar la sedimentación de los pigmentos en productos de baja viscosidad y una regulación de la temperatura del baño para lograr una eficiente aplicación.

La inmersión convencional requiere sólo una superficie de calidad moderada pero de volumen limitado y sin ángulos o bordes agudos; la velocidad del proceso es elevada y con baja eliminación de solventes; las pérdidas de pintura son muy reducidas.

En general, la eficiencia de la aplicación es muy buena pero con espesores de película variables según la geometría de la pieza

Los procesos de pintado en **tambores cilíndricos y por centrifugado** se emplean para pequeñas piezas de producción en serie. La pintura generalmente de baja viscosidad es derramada gravitatoriamente o por pulverización sobre una gran cantidad de artículos fijados en el interior de tambores especialmente diseñados para cada pieza en particular.

Luego de finalizado el escurrimiento de la pintura depositada en exceso sobre la superficie del sustrato se abren diferentes alternativas: Las piezas se pueden remover del interior del tambor cilíndrico y permitir su secado/curado en forma natural o por acción térmica o bien centrifugarlas durante unos pocos minutos y luego calentarlas en el propio tambor para facilitar el pasaje del estado líquido al sólido.

Los métodos que emplean tambores cilíndricos, con o sin centrifugado posterior a la aplicación, requieren una calidad pobre o moderada de la superficie a pintar y un tamaño pequeño de la pieza; la eliminación de solvente es baja. En lo referente a la aplicación, la velocidad operativa y la eficiencia son elevadas.

En contraste con la inmersión convencional, las pinturas pueden ser aplicadas a través del método de **derrame** sobre las piezas dispuestas en un recipiente para permitir su recolección y posterior uso. En una variante de este método, en algunos casos el derrame se reemplaza por una pulverización de la pintura. Este proceso es especialmente adecuado para objetos voluminosos como radiadores, partes de maquinarias agrícolas, etc.

La aplicación por derrame requiere una moderada calidad de la superficie y es apta para piezas sin ángulos agudos y bordes pronunciados ya que este efecto puede ser significativo

ante la ausencia de una fuerza mecánica en el proceso. La eliminación de solventes es también reducida y la velocidad de aplicación es elevada con una eficiencia significativa.

El *pintado por vacío* es un particular método que involucra la aplicación, en una cabina cerrada con presión reducida, por medio de un potente sifón de aire que arrastra la pintura, la atomiza y la hace ingresar desde abajo. La pintura líquida se deposita sobre la pieza, la que frecuentemente es desplazada sobre una cinta que le otorga el carácter de método continuo.

Este método es adecuado para barras y perfiles de pequeña sección transversal para permitir su ingreso a través de pequeñas aberturas y evitar una fácil despresurización de la cabina. Se debe controlar la temperatura de las piezas para facilitar la condensación sobre la superficie; éstas, preferentemente, no deben presentar muchas irregularidades. La aplicación es rápida y técnico-económicamente aceptable.

El *pintado por electrodeposición* involucra un proceso de inmersión con el pasaje de corriente continua para coagular el ligante y consecuentemente depositar la película de pintura sobre la pieza eléctricamente conductora (Figura 4). La electrodeposición puede ser anódica o bien catódica, según la pieza se conecte al polo positivo o negativo de la FEM (fuerza electromotriz) externa.

La electrodeposición catódica reemplazó a la anódica por presentar significativas ventajas comparativas:

- Espesor de película más uniforme independientemente de la geometría de la pieza, debido a una satisfactoria y homogénea distribución de las líneas de campo eléctrico (“throwing power”).
- Mayor capacidad anticorrosiva derivada de la propiedad antes mencionada.
- Menor consumo de energía eléctrica.

Las piezas, previo a la aplicación de la pintura por electrodeposición, son generalmente pretratadas con fosfatizantes alcalinos; estos últimos generalmente se seleccionan de hierro en el caso anódico y de zinc para el posterior proceso catódico.

Los ligantes para formular pinturas susceptibles de ser aplicadas por electrodeposición dependen de la naturaleza de este proceso:

- Anódico: poliacrilatos, poliésteres, ésteres epoxídicos y polibutadienos.
- Catódico: aductos amino-epoxi y poliacrilatos.

La naturaleza de la modificación del ligante es de primordial importancia para permitir su solubilización en agua y su posterior deposición; contienen en todos los casos bajos niveles de solventes orgánicos.

En la **electrodeposición anódica**, generalmente se seleccionan ligantes con grupos carboxilo libres; la neutralización con aminas de bajo peso molecular conduce a la solubilización en agua formando partículas de ligante al estado coloidal con iones poliméricos cargados negativamente e iones derivados de la amina empleada eléctricamente positivos.

Las partículas coloidales poliméricas se desplazan en el medio electrolítico por un proceso difusional (la fuerza impulsora es un gradiente de concentración generado por la electrodeposición del ion en el ánodo) y por migración (el transporte se debe a la diferencia de potencial entre los electrodos, el anión se dirige al ánodo y el catión al cátodo).

El mecanismo fundamental por el cual el ion polimérico accede a la interfase es por agitación (convección forzada); en consecuencia, los términos electroforesis, anaforesis y cataforesis no son los más apropiados ya que el proceso migratorio de la especie activa no es significativo. Un electrolito soporte generalmente completa el transporte de las cargas eléctricas, mejorando la conductividad del baño; no participa de las reacciones electrónicas.

Los iones poliméricos no se descargan inmediatamente en la interfase anódica (pieza a pintar); las diferentes etapas involucradas incluyen una neutralización parcial por los protones producidos por la hidrólisis del agua (reacción secundaria):



que genera un depósito (sin formar una película compacta y adherente) del ion polimérico parcialmente insolubilizado y coagulado.

El material polimérico coagulado por desestabilización del coloide se deshidrata por electro-ósmosis. El coagulado presenta aún cargas negativas residuales que permiten su electrodeposición por oxidación (pérdida de electrones); la película formada comienza a incrementar su espesor.

La capa coagulada tiene una definida resistencia eléctrica, la cual se incrementa a medida que el proceso de formación de la película de pintura propiamente dicha evoluciona; la electrodeposición es más uniforme con una homogénea distribución de las líneas de campo eléctrico generada por similar resistencia eléctrica en toda la superficie. Para estructuras con un diseño muy irregular, el “throwing power” es mejorado con la introducción de electrodos secundarios.

La densidad de corriente (intensidad de corriente por unidad de área) es una medida electroquímica de la velocidad de la electrodeposición (masa por unidad de área y de tiempo); inicialmente es elevada (sustrato desnudo) y a medida que la película se forma (aumento de espesor) disminuye abruptamente. El espesor final de la película depositada no conductora se alcanza en 2 ó 3 minutos (aproximadamente 20 μm).

Las variables más significativas del proceso que influyen sobre la calidad de la película de pintura son la conductividad del baño, el pH, la concentración, la temperatura y la densidad de corriente aplicada (la fuerza electromotriz usualmente varía entre 100 y 500 voltios).

La cantidad teórica de energía requerida para el electrodepósito se define como la carga eléctrica necesaria por cada gramo de película obtenida. Se calcula integrando la intensidad de

corriente que circuló a través del tiempo de deposición dividido la masa de la película; valores típicos oscilan entre 50 y 150 Coulomb/gramo.

Concluida la electrodeposición, la pieza se remueve del baño y se enjuaga para eliminar el material no convertido en una película adherente y compacta. Posteriormente, la pieza es generalmente calentada entre 150 y 190°C durante unos minutos para obtener las propiedades finales.

En los últimos años, si bien la electrodeposición anódica es, como ya se mencionara, crecientemente reemplazada por la catódica, hay una tendencia a formular productos que requieren menor temperatura de horneado

En la *electrodeposición catódica*, los ligantes empleados para el proceso contienen grupos funcionales alcalinos (por ejemplo, amino); la neutralización con ácido le confiere la necesaria solubilidad por la formación de iones poliméricos del tipo $(R-NH_3)^+$. Los principales ácidos empleados son el fórmico y el acético y más raramente el láctico y el propiónico.

Las partículas poliméricas eléctricamente cargadas en forma positiva difunden y migran hacia el cátodo (pieza a pintar); luego, se neutralizan parcialmente en las cercanías de la interfase por medio de los iones hidroxilo generados por la hidrólisis del agua:



por remoción del ion H^+ del catión polimérico $(R-NH_3)^+$.

Se produce así la insolubilización y coagulación del material polimérico, el cual permanece aún cargado positivamente. Finalmente, tienen lugar la deshidratación y la electrodeposición por transferencia de carga. Las etapas posteriores que conducen a la formación final de la película son similares a las ya mencionadas para la electrodeposición anódica

Las reacciones secundarias más importantes están constituidas por el desprendimiento de gases por la hidrólisis del agua (oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo) y particularmente la oxidación del sustrato metálico en el ánodo generando iones ferroso y férrico. Estas reacciones disminuyen la eficiencia del proceso.

La generación de gases influye sobre la continuidad y adhesión de la película de pintura. La cinética de las reacciones principales y de las secundarias desempeñan un rol fundamental en la calidad de la película formada.

En el caso de la formación no deseada de iones ferroso y férrico a partir de la disolución anódica de la pieza a pintar, el principal inconveniente es que pueden ser depositados en el cátodo.

En el electropintado anódico, la reducción de los iones citados se lleva a cabo en el propio tanque que actúa como cátodo o bien en aquellos cátodos especialmente incorporados.

Por su parte, en el proceso catódico de electrodeposición se deben emplear ánodos de grafito o bien de acero inoxidable para prevenir la formación de iones de hierro que se depositarían simultáneamente con la pintura generando defectos en la película (coloración, etc.). Los tanques metálicos deben aislarse con revestimientos adecuados.

La **planta de electrodeposición** consiste en un tanque para la inmersión provisto de electrodos y una fuente externa de corriente continua; debe estar provisto de un sistema de agitación adecuado. Consta además de circuitos diseñados para mantener la concentración de los componentes activos, la pureza (generalmente por ultrafiltración) y la temperatura (por ejemplo entre 27 y 28 °C para el proceso catódico) ya que el baño puede calentarse por el pasaje de la corriente. Un sistema de enjuague de la pieza, luego de finalizada la electrodeposición, y un mecanismo de transporte complementan la ingeniería básica.

El baño para la electrodeposición puede ser provisto en forma *concentrada con todos los componentes* (solamente tiene que ser diluido con agua desmineralizada antes de su incorporación en la cuba) o bien en forma *separada* (el pigmento en pasta y el vehículo semiterminado). La ventaja de proveer los componentes en dos envases consiste en que facilita la regulación de la relación pigmento/ligante más fácilmente.

El mantenimiento de la composición y del nivel de los sólidos del baño que fueron consumidos durante la aplicación se realiza incorporando las cantidades requeridas del ligante y del pigmento concentrados, conjuntamente o por separado con el agente regulador del pH si resultase necesario.

Las *principales áreas de aplicación* son la industria automotriz (casi exclusivamente procesos catódicos), máquinas agrícolas, equipos y muebles metálicos de uso doméstico e industrial.

Este método requiere una baja calidad de la superficie a pintar; presenta, además, una elevada velocidad operativa y excelente eficiencia en la aplicación.

Teniendo en cuenta que los objetos de grandes dimensiones requieren, desde un punto de vista técnico-económico, métodos de aplicación con elevada velocidad operativa, la **pulverización con sopletes** permite una aplicación con alto rendimiento, tanto de pinturas que forman película por evaporación de la mezcla solvente (inclusive de secado rápido sin los inconvenientes que presentan el pincel y el rodillo) como de productos que lo hacen por reacción química.

La pulverización puede realizarse a través de sopletes de baja presión o sopletes sin aire comprimido (“airless spray”).

Los productos que se aplican con *sopletes de baja presión* requieren generalmente una dilución previa; permiten alcanzar espesores de película seca sólo de 10-15 mm por capa.

Las pinturas aplicables con *sistema "airless"* son especialmente formuladas; los espesores de película son sensiblemente mayores que los anteriores (valores usuales oscilan frecuentemente entre 80 y 150 mm por capa).

Los sopletes convencionales para pulverización a baja presión, también llamados aerográficos (Figura 5), emplean aire comprimido para pulverizar la pintura y transportarla además sobre la superficie del objeto. Este método es ampliamente usado ya que exhibe muchas ventajas:

- La atomización es muy fina y generalmente la calidad de la película es muy buena; ésta se forma por fusión de las pequeñas gotas ya depositadas sobre el sustrato.
- El espesor de película es uniforme y casi siempre libre de irregularidades provenientes de la aplicación.
- Excelente mojabilidad en sustratos porosos y en aquéllos diseñados con ángulos agudos, bordes, etc.

La excelente atomización tiene asociado diversas desventajas:

- Elevada pérdida de material ("overspray"), particularmente en objetos pequeños.
- Alta eliminación de solventes volátiles debido a la requerida dilución previa para lograr la atomización y el propio "overspray".
- Riesgos de defectos en la película debido a la niebla del "spray".
- Sólida experiencia en el empleo de estos pulverizadores por parte de los aplicadores.

El soplete atomizador produce el arrastre de la pintura por acción de una corriente de aire; en consecuencia, la relación cuantitativa entre la pintura y el aire es una variable significativa ya que influye sobre la calidad de la aplicación.

El caudal de pintura a pulverizar a través de la boquilla del soplete se regula con la viscosidad de la pintura medida a elevada velocidad de corte, con el diámetro del orificio de salida de la boquilla, con la presión de aire y con la posición de la aguja que controla la relación pintura/aire. El abanico de la mezcla pulverizada se ajusta por medio de un tornillo.

La pulverización de la pintura se puede producir por mezclado interno o externo del sistema pintura/aire, es decir en el propio cuerpo de la pistola o fuera de ella, respectivamente. En el primer caso, la presión de trabajo es menor y se aconseja su empleo para la aplicación de pinturas de secado no muy rápido a diferencia del segundo que usualmente se lo selecciona para productos con alta velocidad para el pasaje del estado líquido al sólido.

Los sistemas de alimentación de la pintura hasta la pistola son básicamente tres:

- Succión: el recipiente está dispuesto en la parte inferior
- Gravedad: el reservorio se ubica arriba del atomizador
- Presión: la pintura es forzada a transferirse desde el recipiente al cabezal de la pistola por la presión que ejerce el aire sobre la superficie libre de la pintura

En el sistema de *alimentación por succión*, el producto es arrastrado por el vacío que produce la corriente de aire, se mezcla y se atomiza. Este soplete se emplea para productos de baja viscosidad (100-120 cP medida a elevada velocidad de corte). Generalmente el fabricante adjunta una tabla con las variables a considerar par seleccionar adecuadamente la boquilla

La *alimentación por gravedad* (Figura 6) es, como su nombre lo indica, por acción gravitatoria; este tipo de pistola se selecciona para productos de viscosidad media y media/baja (aproximadamente hasta 300 cP determinada a elevada velocidad de cizallamiento). Las boquillas también se seleccionan de tablas provistas por el fabricante según las características operativas deseadas.

En la *alimentación por presión*, el aire comprimido actúa sobre la superficie libre de la pintura almacenada en un recipiente de gran capacidad ubicado a cierta distancia (Figura 7); la transferencia se realiza a través de una manguera hasta la pistola. La atomización tiene lugar por acción de una corriente de aire independiente en una boquilla de mezclado externo; se pueden aplicar productos de elevada viscosidad y es adecuado para grandes superficies. Las boquillas también se seleccionan de tablas provistas por el fabricante

En el proceso de *pintado a alta presión con soplete tipo "airless"* la atomización ocurre sin aire: la pintura es forzada a alta presión (usualmente entre 200 y 400 bar; en forma muy puntual puede llegar a las 600 bar) a pasar a través de un pico de pequeño diámetro (0,5 a 1,0 mm).

La elevada velocidad y la extrema turbulencia genera un chorro de pintura que es atomizado apenas abandona el pico de la pistola. La presión de impulsión de la pintura por la cañería se obtiene con una bomba neumática; generalmente todos sus componentes se fabrican de acero inoxidable, especialmente cuando se destinan para pinturas de base acuosa. La boquilla de pulverización se construye con carburo de tungsteno para resistir la fuerte abrasión producida por los pigmentos de la pintura.

Este tipo de atomización produce muchísimas pequeñas gotas de diámetro bastante homogéneo a partir de una pintura libre de aire. El sistema "airless" permite aplicar pinturas de alto contenido de sólidos y de elevada viscosidad inclusive a grandes velocidades de cizallamiento (genera películas de 80 hasta 150 μm por capa) que no resultan aptas para su atomización con una pistola a baja presión; igualmente resulta posible la aplicación de pinturas de espesor convencional (20-30 μm por capa).

Las principales ventajas del sistema "airless" son las siguientes:

- Apto para pulverizar productos tixotrópicos y de viscosidad convencional.
- Ausencia de niebla en el ambiente (la falta de aire proyectado a alta velocidad evita el rebote de las partículas de pintura sobre la superficie) y reducido "overspray" (secado de la pintura durante el recorrido desde la boquilla hasta el sustrato). En consecuencia, el rendimiento es alto (pérdidas reducidas).
- Elevada velocidad de aplicación (2 a 10 litros/minuto) con buena calidad de acabado; se emplea en grandes superficies en las que no hay exigentes requerimientos superficiales.

- Se requiere menor experiencia de los aplicadores en relación a las exigencias que plantean los sopletes con aire comprimido.

Las principales desventajas que igualmente deben ser consideradas en el momento de la elección del método de aplicación son las siguientes:

- Atomización inferior a un soplete convencional, con la consiguiente apariencia superficial errática.
- Las cantidades no pueden ser reguladas durante la aplicación.

- Elevado desgaste de las boquillas por abrasión.
- Limitada aplicabilidad a algunas pinturas al agua (el elevado esfuerzo de corte puede afectar la estabilidad de la emulsión).
- Extremadamente ruidoso y costoso.
- Solapados relativamente bien definidos.

TÉCNICAS DE APLICACIÓN

Las técnicas de aplicación influyen significativamente sobre las características finales de la película obtenida (Figuras 8 a 13) y en consecuencia sobre su comportamiento en servicio. Las reglas del arte se observan a continuación:

Pulverización en caliente. En el sopleteado convencional a temperatura ambiente, el ajuste de viscosidad se alcanza adelgazando el sistema con diluyentes adecuados; el menor contenido de sólidos en volumen reduce el espesor de película que se puede alcanzar por capa aplicada.

La disminución de viscosidad igualmente es posible por aumento de la temperatura de la pintura. Los valores máximos raramente exceden los 80 °C debido a la posible descomposición de los componentes. Además, el descenso de viscosidad en la mayoría de los sistemas no es muy apreciable por arriba del valor citado.

La atomización en caliente presenta además la ventaja de reducir el consumo de energía ya que requiere una menor corriente de aire por el volumen más bajo de solvente del sistema. La pulverización en caliente disminuye el tiempo de secado duro; mejora además la nivelación y en consecuencia el brillo de la película. La adhesión de la película está igualmente favorecida

Puede realizarse con un soplete convencional y también con aquéllos accionados a alta presión. La pintura pasa previamente por un calentador de serpentín (calentamiento directo) o por un intercambiador (método indirecto).

La mezcla solvente debe asegurar, a la temperatura de aplicación, una mayor velocidad de evaporación del diluyente que del disolvente. Los disolventes de punto de ebullición intermedio son los más usados (acetato de butilo, metil isobutil cetona, acetato de celosolve, xileno, etc.) tanto en formulaciones para aplicación en caliente como a temperatura ambiente.

Atomización electroestática. Este método (Figuras 14 y 15) se lo puede clasificar en electroestático puro, electroestático con aire y electroestático sin aire (“airless”).

La conductividad eléctrica de la pintura es de primordial importancia; ésta puede ser ajustada con los pigmentos y los aditivos de la formulación; los grupos polares aumentan la conductividad. Los pigmentos inorgánicos en general y los óxidos en particular son neutros para el balance de conductividad mientras que los orgánicos y los metálicos usualmente influyen en forma marcada.

Por su parte, los materiales formadores de película pueden ser muy polares (resinas vinílicas de polivinil butiral) y no polares (caucho ciclizado), con otras de características intermedias.

La mezcla solvente (disolventes y diluyentes) constituye el principal componente para otorgarle a una pintura convencional la propiedad de ser apta para su aplicación por pulverización electroestática. Generalmente el “disolvente electroestático” se incorpora previo a la aplicación, es decir en la etapa de ajuste de la viscosidad.

Los disolventes polares más comunes son la acetona, el acetato de butilo normal, el acetato de etilo, el acetato de isobutilo, la metil etil cetona, el alcohol metílico, el alcohol etílico y el alcohol butílico normal. Entre los no polares se pueden citar el tolueno, el xileno y el aguarrás mineral

Pulverización electroestática pura. La pintura ingresa a la pistola en cuyo interior gira a alta velocidad un disco accionado por aire comprimido. Las partículas se atomizan y atraviesan por un hueco de ionización donde se cargan eléctricamente (la diferencia de potencial oscila generalmente entre 50 y 150 kvoltios); éstas, al salir del recipiente de ionización, se mezclan con el aire que se proyecta por una abertura circular (tiene por único objeto dirigir el chorro de pintura hacia la superficie a cubrir). La estructura se conecta a tierra.

Las principales ventajas son las siguientes:

- Muy buen rendimiento (aproximadamente 100 % de eficiencia).
- Reducida emisión de solventes (VOC, volatile organic compounds).
- Alto poder de cobertura (“throwing power”).
- Pérdidas nulas en los bordes (las líneas del campo eléctrico concatenan el chorro de partículas sobre la superficie).

Las desventajas más importantes son las siguientes:

- Baja velocidad operativa.
- Insuficiente pintura en las cavidades.
- Riesgo de pintado en exceso en los bordes y consecuentemente vulnerabilidad en esas zonas por deterioro mecánico.

Pulverización electroestática con aire. Este método combina la atomización electroestática con la convencional. La pintura ingresa a la pistola por presión; ésta dispone en

su interior una cámara de ionización; el aire atomiza la pintura en una boquilla de mezclado externo y la proyecta sobre la superficie a cubrir. Las partículas de pintura alcanzan una velocidad elevada lo cual permite su ingreso en las irregularidades de la superficie. Sin embargo, esto conduce a un mayor rebote de la pintura (formación de niebla) y en consecuencia a un mayor consumo.

Pulverización electrostática a alta presión. En este método la pintura accede a la boquilla de la pintura impulsada por una bomba neumática. Allí, la elevada presión produce la atomización de la pintura y además la carga eléctrica de las partículas. Una correcta condición operativa permite, por regulación de la velocidad de la proyección y la diferencia de potencial aplicado, una adecuada cobertura de la superficie incluso en la parte posterior de la misma.

Pulverización de pinturas de dos componentes. La investigación tecnológica sobre pinturas basadas en materiales formadores de película que curan por reacción química ha conducido al desarrollo de métodos de aplicación específicos para estos productos (Figura 16); estas pinturas se comercializan en dos envases (la base, pigmentada o no y el catalizador).

En estos casos el mezclado de los componentes, en la relación indicada por el fabricante, puede realizarse en forma hidráulica o mecánica. El pulverizador dispone de un dosificador de ambos componentes y de un sistema para calefaccionarlos con el fin de reducir la viscosidad del sistema.

El mezclado hidráulico consiste en impulsar el pasaje de ambos componentes a través de un pequeño orificio, El aumento de la velocidad de flujo genera la turbulencia para alcanzar el correcto mezclado, ya sea en el interior de la pistola o en la boquilla.

El método mecánico de mezclado se basa en la acción de una turbina o un agitador impulsado por aire comprimido; la velocidad final puede alcanzar las 20.000 rpm.

En ambos métodos de mezclado la base y el convertidor generalmente ingresan a la pistola separadamente, por ambos laterales de la misma.

La dosificación de ambos componentes puede llegar a la pistola por:

- Presión.
- Bomba neumática.
- Bomba por engranajes.

Presión: cada componente es forzado a circular desde un tanque a la manguera de alimentación, previo paso por un caudalímetro regulable.

Bomba neumática: el caudal se regula con la carrera o diámetro del pistón; es el método más seguro.

Bomba de engranajes: tiene bajo costo y tamaño reducido; funciona eléctricamente; la velocidad de giro permite regular el caudal. Los productos viscosos no resultan aptos para ser impulsados por este método.

Aplicación de pinturas en polvo. Por razones ecológicas (controlar la emisión de solventes volátiles a la atmósfera), se desarrollaron pinturas constituidas en su totalidad por sólidos, es decir sin disolventes y diluyentes en su composición.

Este tipo de pinturas está formulado con resinas termoplásticas y termoendurecibles. Las primeras están basadas en polietileno, prolipropileno, etc., generalmente sin pigmentar; el tamaño de partícula del material polimérico limita el método de aplicación a lecho fluidizado. Se obtienen espesores de hasta 250 μm de película seca y se pueden aplicar como anticorrosivas (protección por efecto barrera).

Los materiales termoendurecibles empleados son frecuentemente resinas epoxídicas, acrílicas, alquídicas modificadas, poliésteres, etc. El más difundido es de base epoxídica: se lo obtiene en forma de partículas pequeñas y por lo tanto se puede aplicar por el método electrostático.

El pigmento se incorpora a la resina fundida y luego en frío se adiciona el agente de curado no reactivo a temperatura ambiente. El curado se alcanza por horneado a 130 °C durante 30 minutos o 180 °C durante 5 minutos. Los espesores de película seca oscilan generalmente entre 40 y 80 μm .

Generalmente las pinturas en polvo se aplican por: **a) lecho fluidizado, b) lecho electrofluidizado y c) electrostáticamente.**

a) Lecho fluidizado: Los materiales termoplásticos se aplican por este método; el tamaño de partícula debe oscilar entre 0,1 y 0,2 mm. Se dispone en el interior de un tanque con fondo perforado, lugar por el cual ingresa aire a una presión que permite mantener el polvo en suspensión.

El objeto a pintar, calentado a una temperatura ligeramente superior a la de fusión del material termoplástico (10 ó 20 °C), se introduce en el lecho fluidizado durante un lapso muy pequeño (pocos segundos). Los espesores de películas son elevados (aproximadamente 300 μm).

b) Lecho electrofluidizado: El sistema mantiene una marcada similitud con el lecho fluidizado; la diferencia fundamental es que incorpora un electrodo (fondo perforado), que junto al objeto a pintar que se conecta a tierra, genera un campo eléctrico de alto potencial. Las líneas del campo eléctrico depositan la pintura en espesores de película generalmente inferiores a los alcanzados en el lecho fluidizado ya que la misma actúa como aislante. Las partículas de polvo son inferiores en tamaño a las empleadas en el lecho fluidizado para lograr un adecuado acabado superficial.

Cuando se emplean resinas termoendurecibles, se requiere un posterior horneado

c) Método electrostático: En este método, el aire y el polvo son impulsados por presión al interior de la pistola donde se mezclan (Figura 17). En la boquilla se encuentra la cámara de ionización en las que se cargan las partículas eléctricamente; luego son pulverizadas con adicional soporte de aire.

El método presenta las siguientes ventajas:

- Reducidas pérdidas ya que las líneas de campo eléctrico transportan eficientemente las partículas cargadas sobre el objeto. Además, aquellas que no llegan se depositan en el interior del recipiente en el que se ubica el objeto y se recuperan.
- La pintura cubre prácticamente todo el objeto, inclusive la contracara.
- La película formada es homogénea, es decir libre de poros y cubre las irregularidades superficiales.

Las principales desventajas son las emergentes del elevado costo de la instalación y de las condiciones operativas, el regular acabado superficial y el desgaste excesivo por abrasión de la boquilla de la pistola.

INSTALACIONES DE SECADO/CURADO

La transformación de la película líquida o en forma de polvo, aplicada sobre una superficie, en un estado sólido de adecuadas propiedades fisicomecánicas puede involucrar un secado físico (evaporación de solventes) y/o reacciones químicas de curado. Los procesos industriales son generalmente acelerados por la acción de la energía térmica.

Considerando la naturaleza y las dimensiones del sustrato y la ubicación física del mismo por un lado y las características de las pinturas a aplicar (particularmente del material formador de película) por el otro, la transformación del estado líquido al sólido se puede clasificar en:

- Secado a temperatura ambiente, también llamado secado al aire.
- Secado acelerado o forzado (la temperatura se incrementa hasta aproximadamente 80 °C).
- Horneado a temperaturas generalmente entre 100 y 200 °C.
- Curado por radiación (infrarrojo, UV, etc.).
- Procesos eléctricos.

Secado/curado por circulación de aire caliente. Este método se emplea generalmente en pinturas que requieren un curado químico por acción térmica, libres o con solventes orgánicos en su composición; el tiempo se extiende entre 5 y 60 minutos y no tiene limitaciones en lo referente al espesor de la película aplicada.

El sustrato a pintar no debe ser sensible a la temperatura involucrada; no pueden emplearse para plásticos y maderas en general. La geometría, es decir el diseño de la pieza, puede ser muy variado.

Las instalaciones requieren grandes espacios porque los tiempos de curado usualmente son prolongados. El consumo de energía es generalmente elevado, particularmente debido a la insuficiente aislación térmica, pérdidas por la entrada / salida del objeto, etc. Este método generalmente permite su automatización.

El combustible para la calefacción del aire es muy variado (gas, fuel oil, electricidad, etc.). El calentamiento del aire puede realizarse en forma directa o indirecta. El primer método es más eficiente pero resulta riesgoso por el hecho de que los contaminantes emergentes de la combustión pueden afectar la calidad de la película; el indirecto, por su parte, involucra el empleo de intercambiadores de calor (agua, aceites, etc.).

Estas instalaciones permiten adicionalmente ser empleadas para remover agua residual sobre la superficie luego de su limpieza y precalentar el objeto a pintar.

No ofrece riesgos de sobrecalentamiento, particularmente cuando el sustrato transportado por el interior de la cabina (procesos continuos) se detiene temporalmente. Las cabinas combinadas para el precalentamiento, aplicación y secado/curado están muy difundidas industrialmente. Los hornos son muy variados en cuanto a forma de calefaccionarlos y a sus dimensiones.

La calidad de la película curada térmicamente depende significativamente de la energía entregada; si ésta resulta insuficiente (“under stoving”), las propiedades mecánicas y de resistencia química se encuentran reducidas mientras que si es excesiva (“overstoving”) la película puede amarillear o hacerse quebradiza. Además, una cinética de calentamiento elevada puede generar poros o bien retener los solventes en el interior de la película los cuales pueden ser los responsables de un posterior ampollamiento o arrugado.

El diseño del horno y la geometría de la pieza influyen sobre la temperatura superficial de esta última y por ende sobre las propiedades finales de la película. Muchas composiciones de pintura tienen la ventaja de curar en un amplio rango de temperaturas.

Secado/curado por radiación infrarroja. En este método, la pieza pintada es calentada por la radiación infrarroja (IR) absorbida; en consecuencia, la transformación de la película del estado líquido al sólido no involucra directamente la radiación IR. La energía o intensidad de la radiación depende del rango de longitud de onda del emisor. La radiación electromagnética involucrada en esta forma de calentamiento tiene longitudes de onda superiores a los 780 nanómetros (0,78 μm) y puede llegar hasta los 1000 nanómetros (1 μm).

Los radiadores o emisores de IR, en función de la longitud de onda (y en consecuencia de la temperatura de la superficie), exhiben tiempos diferentes de calentamiento. La radiación infrarroja puede obtenerse de materiales cerámicos (alta longitud de onda), calentados con un intercambiador de calor a temperaturas entre 200 y 700 °C durante aproximadamente 120 seg.

Otros emisores son generalmente tubos de cuarzo y dependiendo de las características de los mismos pueden irradiar a media y baja longitud de onda, a temperaturas de 750 a 1500 y

de 1500 a 2700 °C, respectivamente; los tiempos de calefacción son muy bajos (por ejemplo, 1 seg), empleándose radiadores eléctricos ya que permiten un rápido y preciso control de la temperatura. La absorción de la radiación IR por parte del sustrato pintado es importante ya que determina el tiempo requerido de irradiación para alcanzar una temperatura final dada.

Las variables que influyen sobre la capacidad de absorción son la uniformidad de la superficie pintada, el color y el brillo de la película y por supuesto la composición química de la pintura (los componentes absorben diferente radiación).

Los solventes se eliminan desde la película por evaporación debido a la acción térmica de idéntica manera que cuando el secado se produce por circulación de aire caliente. En consecuencia, los solventes deben ser removidos por aire fresco.

Las ventajas del secado por radiación IR son las siguientes:

- Las piezas pintadas se calientan más rápidamente que con circulación de aire ya que más energía térmica es posible transferirla en un lapso más reducido.
- La etapa de enfriamiento es también más breve ya que el calor no penetra profundamente en el sustrato durante el corto tiempo de exposición a la radiación IR.
- Menor consumo de energía ya que el calor es generado sólo en el lugar requerido
- Mínima o nula tensión térmica residual en el sustrato.
- Relativamente bajos costos de inversión y un reducido número de equipos.
- Satisfactorio control de la temperatura del objeto a través de la potencia de la radiación y el tiempo de aplicación.
- La película seca desde el interior debido a la absorción de energía por parte de los componentes.

Entre los aspectos del uso:

- Se debe respetar la distancia entre el objeto y el radiador para evitar sobrecurado.
- Los sustratos metálicos incrementan las pérdidas de energía por reflexión pero sin embargo aquéllos transparentes también requieren mayor poder radiante.
- Las longitudes de onda más cortas implican mayores temperaturas del radiador.
- El tiempo de secado/curado es más extenso en los huecos e intersticios ya que la radiación no accede directamente.

Otros procesos de curado. Radiación UV, de electrones métodos eléctricos: Estos procesos no calientan el objeto pintado sino que catalizan la reacción química de curado de pinturas especialmente formuladas para ello. Los ligantes usuales son poliésteres insaturados, epoxis, éteres vinílicos y acrilatos. Elevados niveles de energía conducen a procesos de curado muy rápidos.

La *radiación UV* (longitud de onda entre 0,32 y 0,40 mm) requiere fotoiniciadores de la reacción (polimerización por radicales libres); la duración de la aplicación se extiende sólo por unos pocos segundos.

Los barnices se pueden curar con UV inclusive con altos espesores de película, pero los sistemas pigmentados presentan algunas dificultades (particularmente con altos espesores de

filme) debido a la absorción de UV por parte de muchos pigmentos. En general generan una película de adecuado aspecto superficial.

En lo referente al sustrato, este método es aplicable a superficies con acceso directo a la radiación (particularmente áreas planas).

Este método está ampliamente difundido para papeles y cartones para embalaje; tiene limitada significación para metales. La madera y los plásticos pueden conducir a un ligero amarillamiento de la película.

Este método tiene muchas ventajas relativas; entre ellas pueden mencionarse el reducido espacio requerido, la baja inversión, el poco consumo de energía, la mínima emisión de solventes volátiles (VOC) y particularmente el rápido y completo curado de la película.

Este método tiene muchas ventajas relativas; entre ellas pueden mencionarse el reducido espacio requerido, la baja inversión, el poco consumo de energía, la mínima emisión de solventes volátiles (VOC) y particularmente el rápido y completo curado de la película.

Las principales desventajas están dadas por los mayores costos de algunas materias primas en relación con las pinturas convencionales y las precauciones y medidas de seguridad que se requieren aplicar.

La *radiación de electrones* es producida por un cátodo incandescente de 150-400 kV y conduce al curado del ligante por el mecanismo de radicales libres, no requiriendo fotoiniciadores de reacción. Tienen un elevado poder de penetración y consecuentemente no hay restricciones en términos del espesor de la película y de la pigmentación.

Este método está ampliamente difundido para papel, madera, cartón, etc.; en todos los sustratos hay riesgos de fragilización de la película y de oscurecimiento por un ligero exceso de radiación. Tiene limitada importancia en pinturas para metales.

Entre las ventajas se pueden citar el reducido requerimiento de espacio, el bajo consumo de energía, la posibilidad concreta de automatización, la mínima emisión de solventes y la velocidad del proceso.

Las principales desventajas son las siguientes: se aplica sólo a grandes superficies planas y requiere extremas medidas de seguridad.

Estos métodos se aplican sólo a sustratos muy especiales tales como alambres, arrollamientos y transformadores, luego de depositada la pintura sobre la superficie. Las películas secan y curan por la acción térmica generada por la *circulación de corriente* a través del objeto que se comporta como un conductor de una determinada resistencia eléctrica.

En lo referente al *curado eléctrico*, otras técnicas menos desarrolladas consisten en el *curado inductivo* (desarrollo de energía térmica por corriente alterna inducida sobre un

sustrato ferromagnético) y *curado por microondas* (calentamiento de una película con componentes polares sobre un sustrato no metálico).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), a la CIC (Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires) y a la UTN – FRLP (Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata).

BIBLIOGRAFÍA

- Appleman, Bernard.- The Inspection of Coatings and Linings. The society for protective coatings, Estados Unidos de América, 1997.
- Paint flow and pigment dispersion. T.C. Patton. Ed. J. Wiley & Sons, 1979.
- Defectos superficiales en películas de pinturas. C. Vignolo, F. Varela López, A. Calvo. Pinturas y Acabados Industriales, 52-58, 1998.
- Surface dynamics of defect formation in paint films. G.P. Bierwagen. Progress in Organic Coatings, 3, 101-106, 1975.
- Film formation in waterborne coatings. A.G. Gilianski, C.R. Hegedus. Ed. American Chemical Society Symposium Series, (648), 286-300, 1996.
- Paint Testing Manual. G.M. Grosman. Ed. G. G. Sward, ASTM STP 500, 1972.
- Film formation from waterborne polymer dispersion. S. Zohrevand. 5th Proc. Eur. Conf. Adv. Mater. Processes Applied, Vol. 2, 43-46, 1997.
- Influence of fine particle size extenders on the optical properties of latex paints. L.Cuthrone. J. of Coatings Technology, 58 (736), 83-88, 1986.

Tabla I. Criterio de aplicación

Método	Calidad de la superficie	Restricciones		Rendimiento
		Tamaño	Forma	
Pincel	Moderada a buena	Áreas pequeñas	-----	Muy bajo
Rodillo	Buena	-----	-----	Moderada
Espátula	-----	Áreas pequeñas	Acceso	Bajo
Guante	Pobre	Áreas grandes (cañerías)	-----	Bajo

Nota: En todos los casos, la eliminación de solventes es baja



Figura 1. Pulverización plana

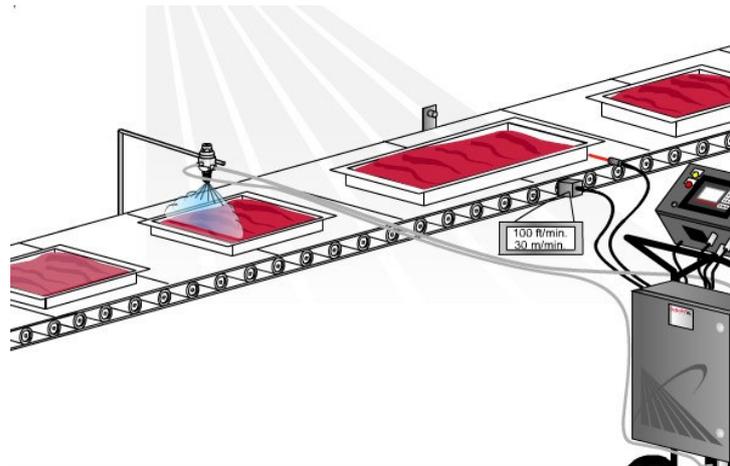


Figura 2. Pulverización plana

Giro inverso

Giro directo

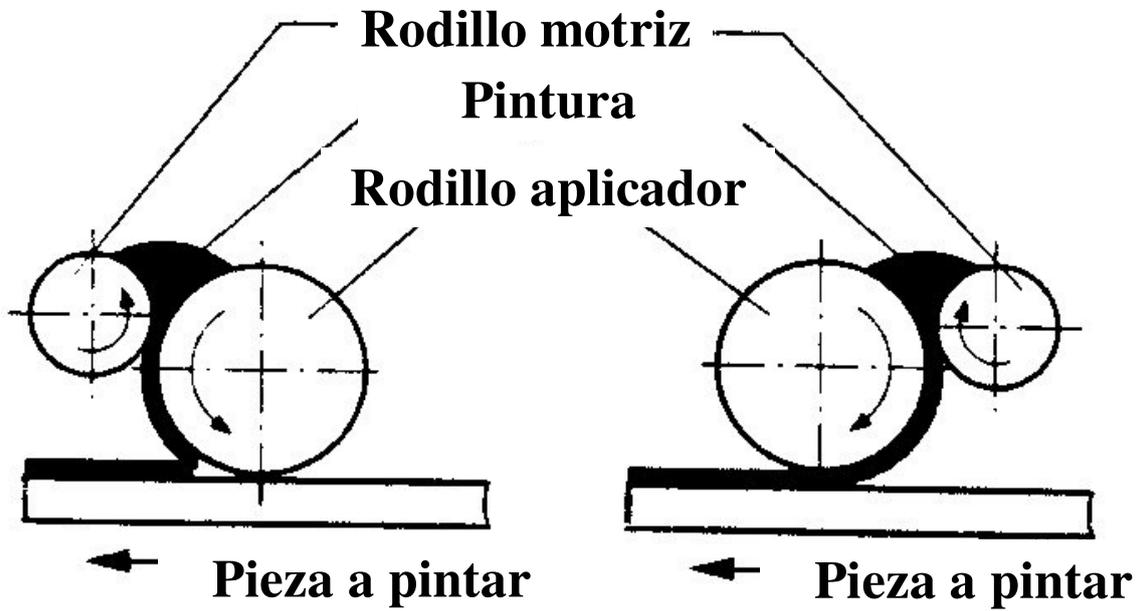


Figura 3. Cilindros rotativos

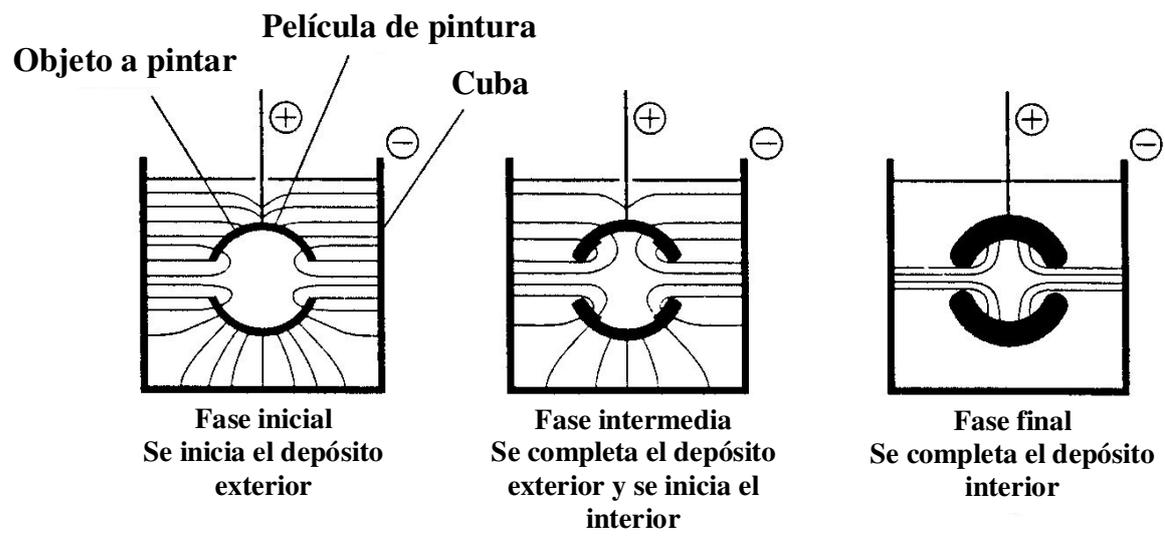


Figura 4. Etapas de una electrodeposición



Figura 5. Pulverización a baja presión. Alimentación por succión

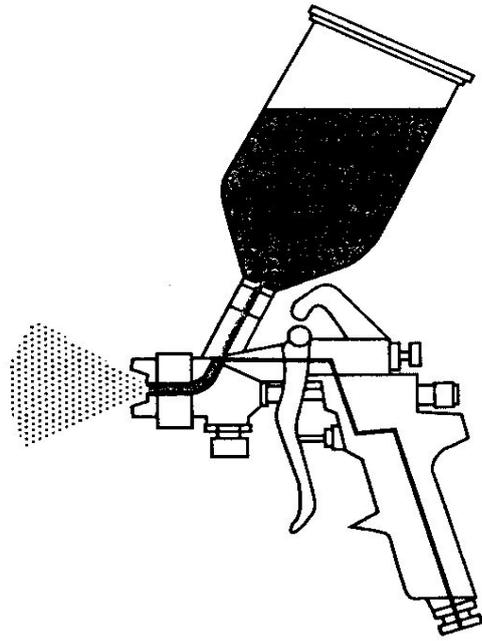


Figura 6. Pulverización a baja presión. Alimentación por gravedad

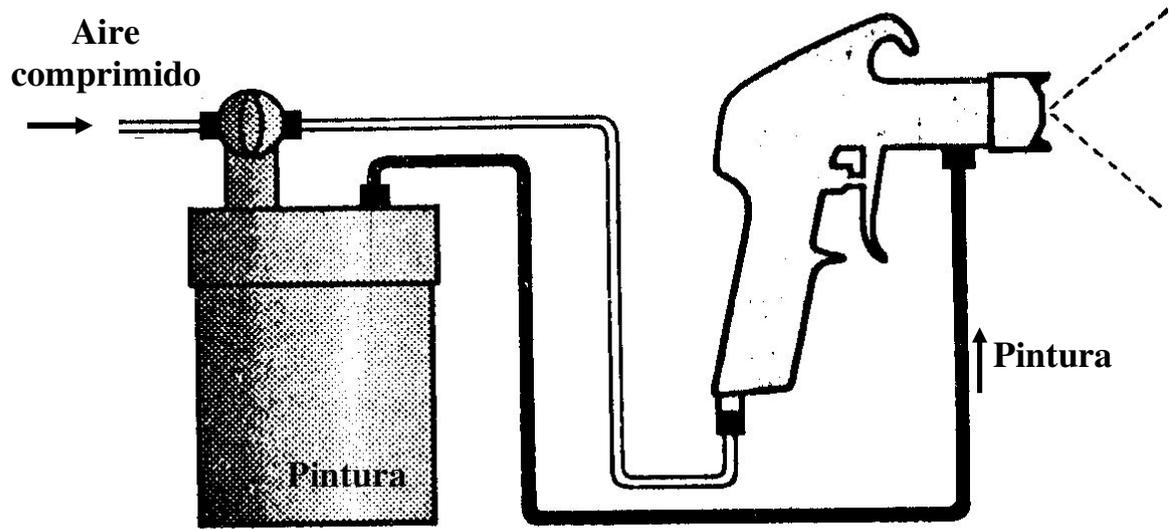
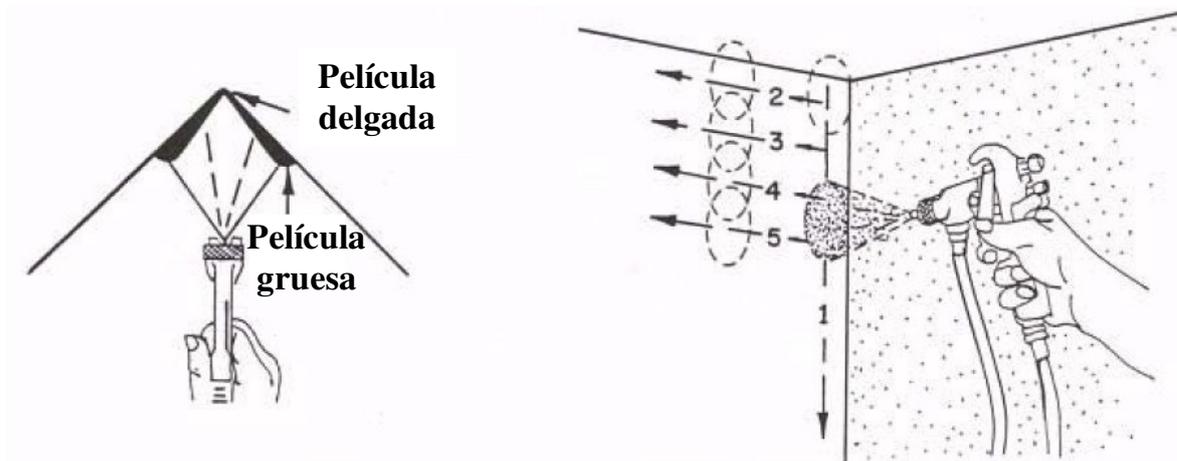


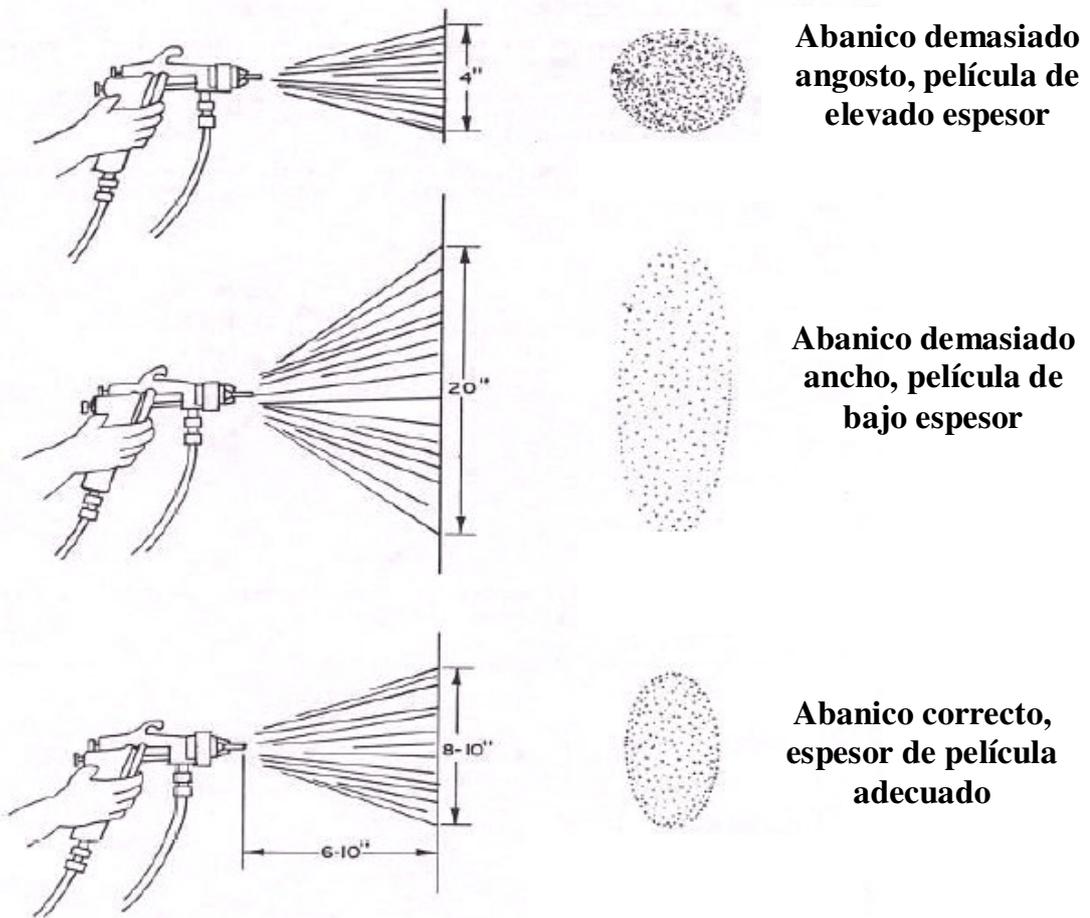
Figura 7. Pulverización a baja presión. Alimentación por presión



Pintado incorrecto de ángulos interiores (ambas caras simultáneamente)

Pintado correcto de ángulos interiores (cada cara separadamente)

Figura 8. Técnicas de aplicación

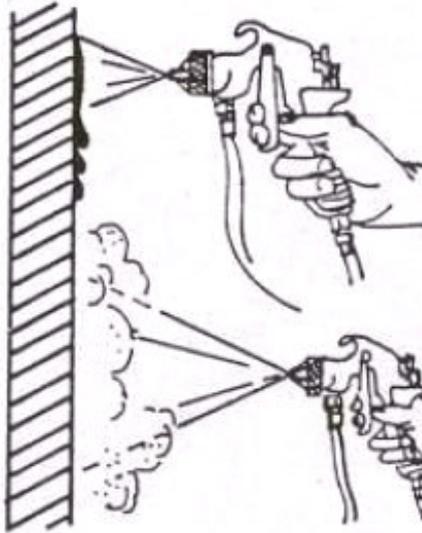


Abanico demasiado angosto, película de elevado espesor

Abanico demasiado ancho, película de bajo espesor

Abanico correcto, espesor de película adecuado

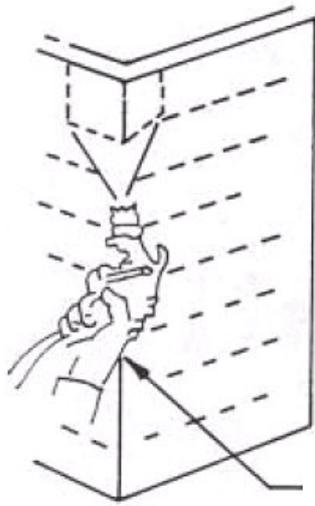
Figura 9. Técnicas de aplicación (continuación)



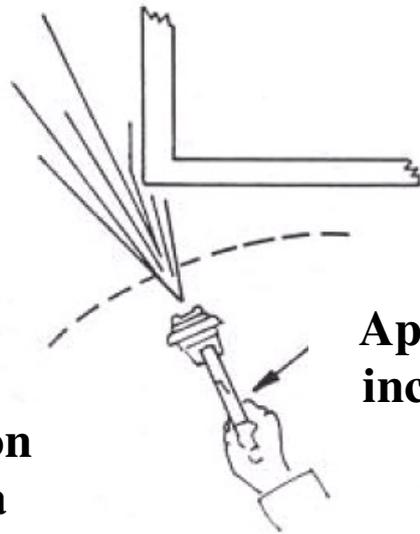
**Soplete demasiado cercano,
película de alto espesor con
posible escurrimiento**

**Soplete muy lejano, película
débilmente adherida en
forma de polvo**

Figura 10. Técnicas de aplicación (continuación)



**Aplicación
correcta**



**Aplicación
incorrecta**

Figura 11. Técnicas de aplicación (continuación)

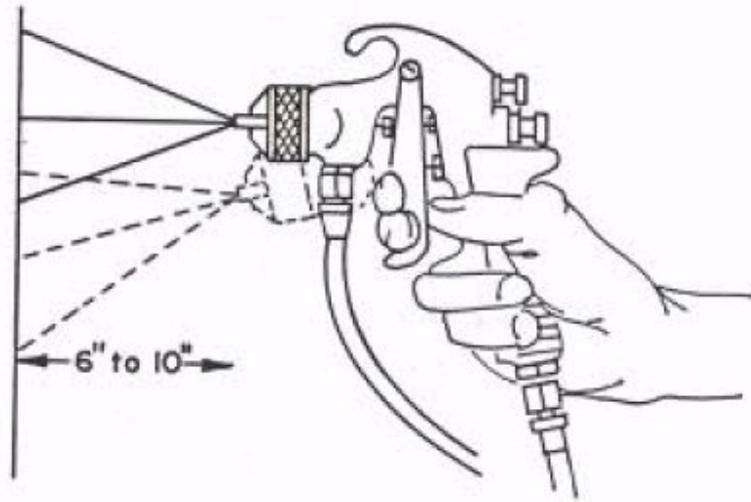


Figura 12. Técnicas de aplicación. Aplicación perpendicular al sustrato

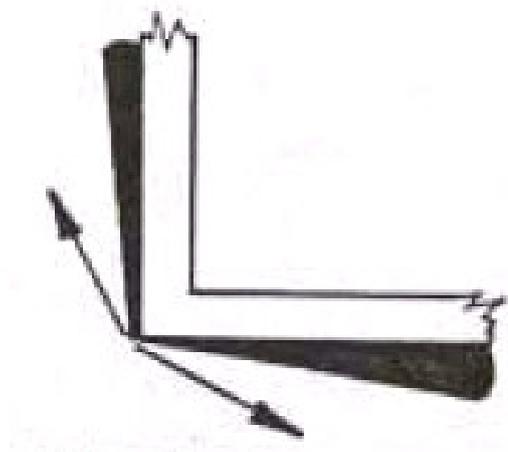


Figura 13. Pinturas de elevada tensión superficial, detalle del espesor de película no uniforme en los bordes

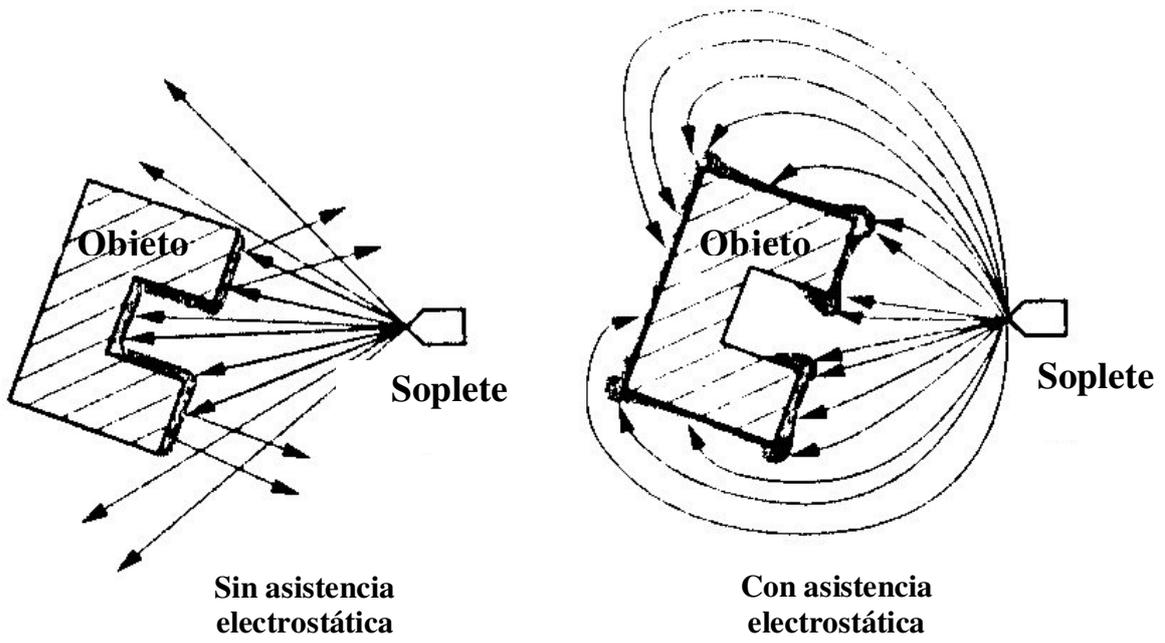


Figura 14. Aplicación electrostática



Figura 15. Aplicación electrostática

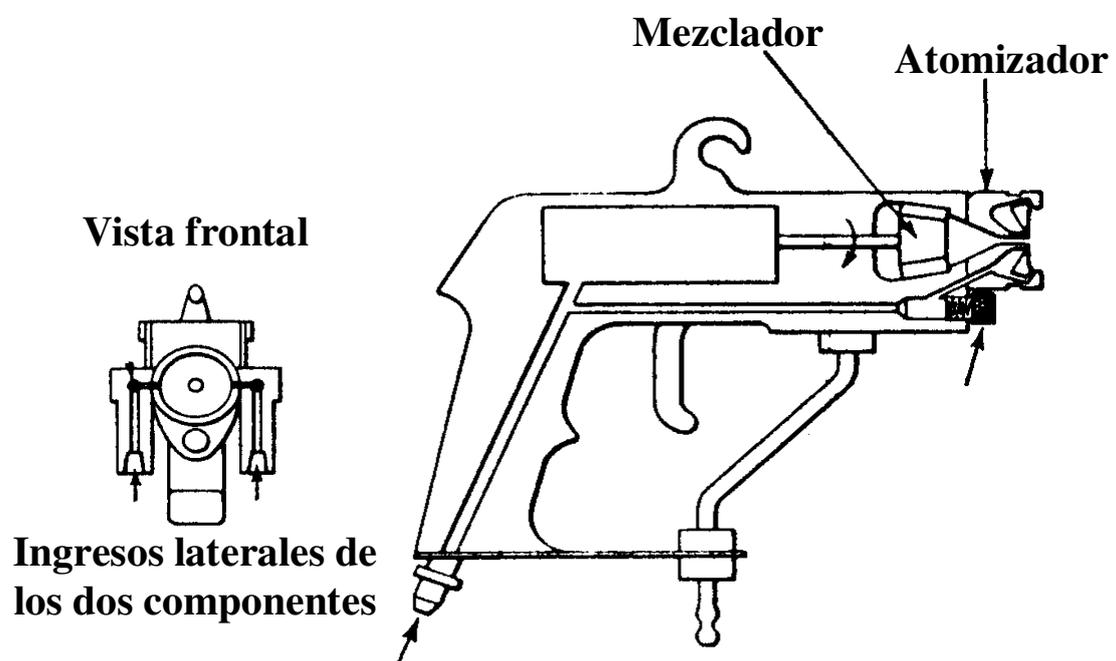


Figura 16. Aplicación de pinturas de dos componentes

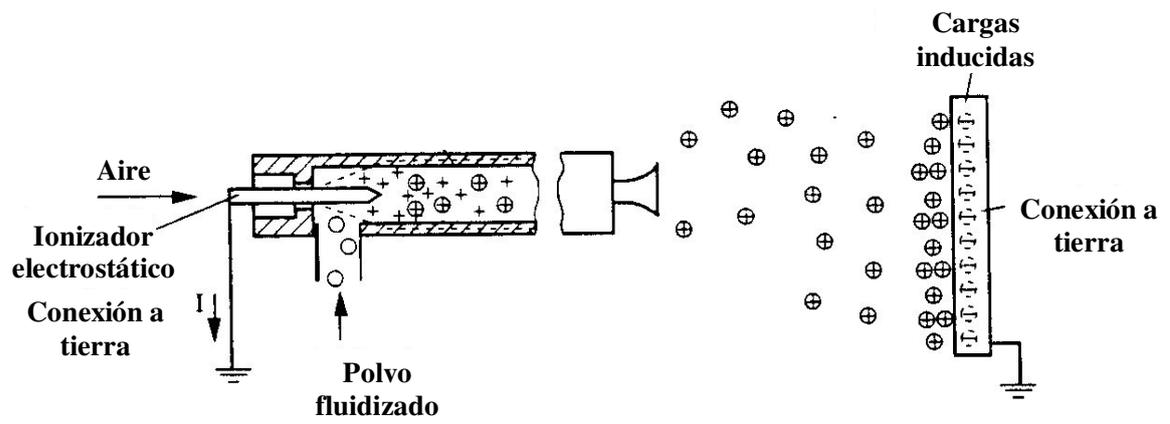


Figura 17. Aplicación electrostática