

# **E. FALLAS DE LA PELÍCULA Y CONTROL DE CALIDAD**

## **Capítulo XII. Fallas en películas de pintura**

## CAPÍTULO XII. FALLAS EN PELÍCULAS DE PINTURA

### XII.1 INTRODUCCIÓN

Las pinturas, desde un punto de vista técnico-económico, constituyen el método más adecuado para la protección de los materiales empleados en la construcción de edificios, catedrales, museos, entre otros.

Las pinturas, incluyendo los productos más desarrollados tecnológicamente, son sistemas multicomponentes: resinas naturales o sintéticas, plastificantes, agentes de curado, aditivos reológicos, dispersantes, humectantes, pigmentos, extendedores, fungicidas y bactericidas, solventes y diluyentes están en relaciones cuantitativas optimizadas para alcanzar las deseadas propiedades fisicoquímicas de la pintura líquida y de la película seca.

La pintura como sistema disperso, aplicada en forma de capa delgada, se transforma por secado y/o curado (evaporación de la mezcla solvente y/o reacciones químicas, respectivamente) en una cubierta sólida firmemente adherida al sustrato.

Las fallas de la película de pintura tiene lugar por causas diferentes debido a la gran cantidad de variables involucradas; el tiempo para que las fallas se produzcan es la variable crítica de este fenómeno:

**Incorrecta selección de la pintura.** Frecuentemente, un producto diseñado para superficies de acero se aplica por extensión, en función del satisfactorio comportamiento en servicio, a otros materiales tales como concreto o madera: se observa generalmente una rápida falla, lo cual indica que la selección conveniente de una pintura para un propósito específico es extremadamente importante.

**Inadecuada formulación del producto.** Muchas fallas ocurren generalmente por causas inherentes a la composición porcentual de la pintura y a las materias primas seleccionadas para su elaboración. El tizado, cuarteado, agrietado, arrugado, erosión, decoloración, etc. de la película son algunas de las fallas más frecuentes.

**Reducida adhesión del sistema protector.** Las fallas atribuibles a la adhesión de la pintura son numerosas y pueden conducir a serios deterioros del material base por la discontinuidad de la película. El ampollado, el pelamiento, la escamación, la delaminación entre capas y la corrosión en la interfase sustrato metálico/pintura constituyen ejemplos de películas con baja adhesión superficial.

**Fallas relacionadas con el tipo de sustrato.** La pintura puede resultar incompatible con el material base debido a las características intrínsecas de este último: ausencia de adhesión física por falta de un

perfil de rugosidad adecuado, composición heterogénea, reactividad química, diferente estabilidad dimensional en áreas adyacentes, alcalinidad superficial, etc. El tipo de sustrato conduce a fallas particulares y por lo tanto requiere medidas preventivas específicas.

**Fallas vinculadas a la aplicación.** Diferentes aspectos involucrados en esta etapa pueden influir significativamente en el comportamiento del sistema de pinturas en servicio y conducir a rápidas fallas: heterogeneidad de la pintura en el momento de la aplicación, diluyente inadecuado, condición atmosférica desfavorable, espesor de película no uniforme, sobrepintado, escurrimiento, etc.

**Fallas atribuibles al diseño de la estructura.** Este aspecto es frecuentemente el responsable de severas fallas en áreas bien definidas del sustrato; la presencia de bordes agudos, áreas discontinuas, soldaduras y ángulos interiores de difícil acceso incrementan la relación costo/eficiencia del sistema protector/decorativo.

**Agresividad del medio externo.** Las películas pueden fallar por acción del medio externo; la presencia de agentes químicos, fenómenos de erosión y abrasión, radiación solar, etc. generalmente conducen, a sistemas de pinturas no adecuadamente seleccionados, a su solubilización, degradación y pérdida de propiedades mecánicas.

## **XII.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PINTURAS**

La primera etapa consiste en determinar el material formador de película (resina plastificada) que presente un buen comportamiento al medio externo o de exposición del sustrato pintado.

Muchos tipos de pintura han sido desarrollados para especiales condiciones de servicio y métodos de aplicación diversos.

La selección de la pintura más conveniente, entre aquéllas que en principio resultan aptas para el sustrato/medio ambiente, debe realizarse considerando los siguientes factores:

- Reconocida eficiencia en similares aplicaciones
- Composición química y propiedades físicas
- Resultados de exposición en ensayos acelerados

La mejor alternativa para la elección de un sistema de pinturas es el comportamiento previo evidenciado en sustratos de iguales características expuestos en medios agresivos similares. Se debe constatar que la composición porcentual, las materias primas empleadas y la tecnología de elaboración no han sido modificadas.

Si no hay información y resultados confiables de comportamientos previos en aplicaciones similares, el conocimiento de la composición química y particularmente de las propiedades físicas y químicas de la pintura resulta muy valioso.

Esta información, antes de tomar la decisión final, debe complementarse con ensayos acelerados de laboratorio, implementados en forma comparativa entre los diferentes sistemas posibles. Sin embargo, en general no hay una correlación bien definida entre los ensayos acelerados y la performance en servicio, a pesar de las numerosas investigaciones realizadas.

La selección de una pintura sobre la base del precio solamente o por la información brindada por el fabricante puede resultar extremadamente costosa.

Las pinturas que conforman un sistema completo deben ser provistas por el mismo fabricante: la compatibilidad de las diferentes capas es significativamente importante para alcanzar una satisfactoria vida útil en servicio. El empleo de pinturas de diferente origen, sin el conocimiento básico de los resultados de ensayos de laboratorio, es una garantía de falla.

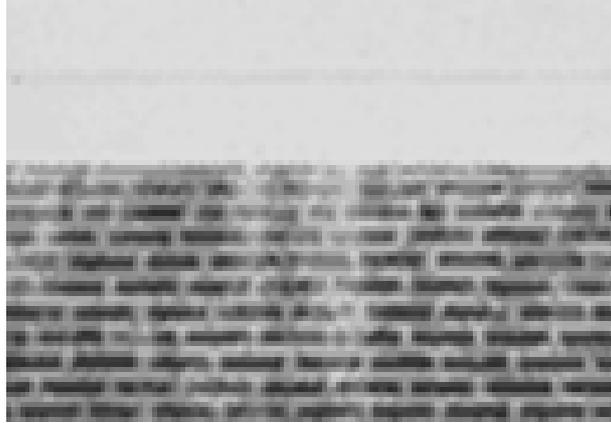
### **XII.3 FALLAS DE FORMULACIÓN DE PINTURAS ORGÁNICAS**

**Tizado.** Este fenómeno es producido fundamentalmente por la acción de la radiación UV de la luz solar: el ligante orgánico se degrada gradualmente sobre la superficie liberando los pigmentos y extendedores en forma de polvo, Figura XII.1. El tizado es estrictamente superficial y conduce a una reducción del espesor de la película.

El uso de resinas adecuadas (las acrílicas puras y modificadas constituyen un buen ejemplo), combinadas con pigmentos resistentes al tizado (los de forma laminar como el óxido de hierro micáceo o bien el aluminio de alta flotabilidad controlan el acceso de la radiación solar al interior de la película), permite formular pinturas libre de tizado luego de varios años en servicio. La incorporación de aditivos absorbentes de rayos UV mejora el comportamiento a la intemperie.

El tizado no es una falla grave, ya que por simple remoción del polvo suelto sobre la película genera una superficie apta para la aplicación de pinturas de mantenimiento.

**Erosión.** Ese tipo de falla corresponde al desgaste del recubrimiento hasta quedar expuesto el sustrato y se produce como consecuencia del tizado con remoción por acción del medio ambiente (lluvia, viento, etc.) y/o abrasión (viento con polvos o arena en suspensión), Figura XII.2.



**Figura XII.1. Falla por tizado de un látex**

La erosión es frecuentemente observada en pinturas aplicadas con pincel y pobre comportamiento reológico (falta de nivelación): la parte más elevada del perfil sinuoso está más expuesta al fenómeno erosivo.

Las medidas preventivas consisten en seleccionar una pintura resistente al tizado, no quebradiza, con buenas propiedades de flujo para formar una película lisa y uniforme en espesor (adecuada viscosidad a reducidas velocidades de corte).

**Cuarteado.** Esta falla está vinculada al envejecimiento de la película; la observación visual o por medio de un microscopio permite determinar la presencia de esta falla a través de ligeras grietas que no penetran en la superficie subyacente, Figura XII.3.

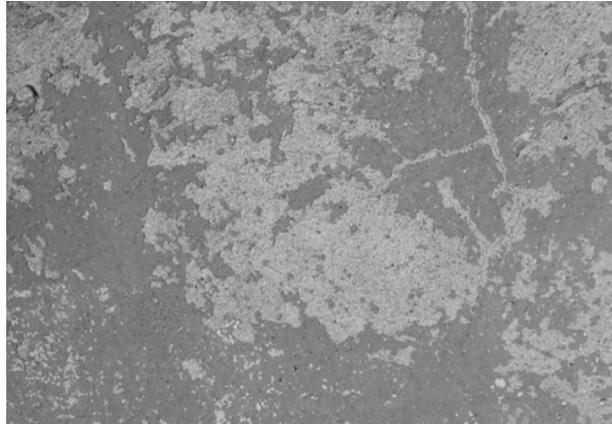
Existen causas diversas que conducen al cuarteado, pero generalmente el motivo es la contracción en la superficie de la película producida por envejecimiento y prolongada polimerización y oxidación.

El rápido secado (evaporación del solvente) luego de la aplicación puede conducir también a una más rápida contracción en la superficie que en el seno de la película generando las grietas que caracterizan esta falla.

Los ciclos de secado/humidificación y calentamiento/enfriamiento contribuyen al cuarteado de la película.

Una inspección periódica permite definir el momento adecuado para las tareas de mantenimiento, con el fin de evitar la penetración de la grieta hasta el sustrato (agrietado); en esta última etapa resulta indispensable

especificar la remoción total de sistema de pinturas (el sustrato está expuesto al medio externo) con el consiguiente incremento de los costos.



**Figura XII.2. Falla por erosión**

El cuarteado se puede prevenir seleccionando la pintura adecuada: la resina debe ser resistente a la intemperie y los pigmentos deben ser inertes o bien con mínima reactividad química y alta estabilidad dimensional para reducir las tensiones superficiales; otro componente importante que puede conducir al fenómeno de cuarteado es el plastificante de la resina: éste debe ser estable e insoluble en el medio para evitar la lixiviación desde la película hacia la superficie durante la exposición en servicio.

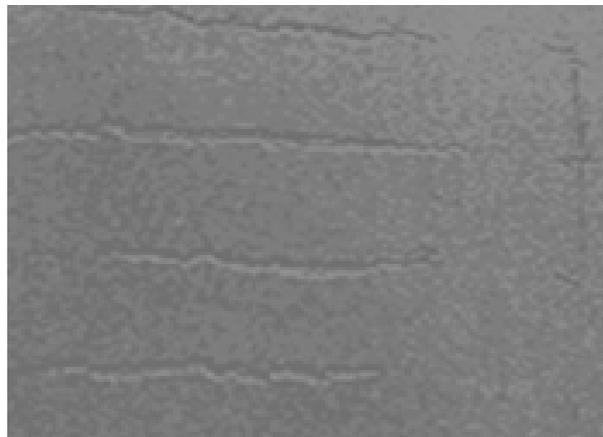
**Agrietado.** En este caso las grietas se extienden, como ya se mencionara, hasta el sustrato; esta falla es más deteriorante de la película que el cuarteado. Las grietas pueden ocurrir en forma irregular o bien linealmente. Espesores de película excesivos pueden causar agrietado debido al elevado gradiente de tensión en función de la profundidad que se genera durante el secado y/o curado, Figura XII.4.

Las causas que conducen al agrietado son idénticas a las que generan el cuarteado; consecuentemente, las medidas preventivas en lo referente a las variables de formulación son también similares. Sin embargo, y en casos de agrietamiento intenso, es frecuente el empleo de pigmentos de refuerzo de forma acicular o fibrosa para disminuir el citado gradiente de tensión en la película.

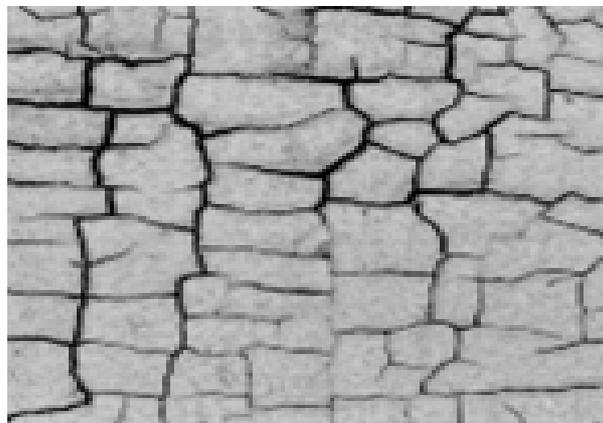
**Piel de cocodrilo.** Esta falla puede considerarse un macro-cuarteado generalizado que presenta un dibujo de grietas cruzadas, Figura XII.5.

Las causas son similares a las citadas para el cuarteado y el agrietado: tensión superficial elevada debido a una rápida polimerización u oxidación de la resina en el área expuesta al medio y/o una elevada velocidad de evaporación de la mezcla solvente y/o lixiviación o volatilización del plastificante. La piel de cocodrilo también puede generarse cuando se emplean pinturas de terminación “duras” sobre pinturas base más “blandas”.

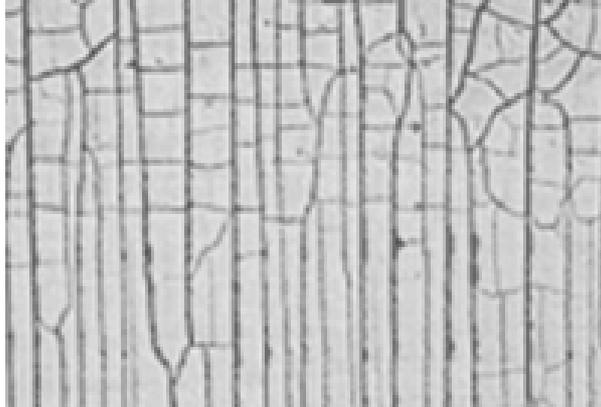
La solución consiste en seleccionar formulaciones adecuadas y aplicarlas en forma de capas finas, permitiendo transcurrir un tiempo de secado adecuado entre ellas. También se debe considerar la elasticidad de las diferentes películas del sistema.



**Figura XII.3. Falla por cuarteado**



**Figura XII.4. Falla por agrietado**



**Figura XII.5. Piel de cocodrilo**

**Macro-agrietado.** Puede considerarse un agrietado generalizado, con arrollamiento de la película en el límite de las grietas y pérdidas de adhesión. Dado que la profundidad alcanza hasta el sustrato, resulta más peligrosa que el macro-cuardeado, Figura XII.6, Figura XII.7 y Figura XII.8.

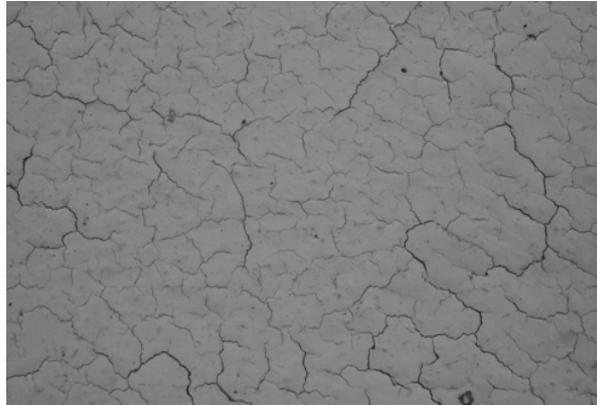
Esta falla es muy común en pinturas orgánicas de base solvente; puede producirse por un rápido secado, particularmente en productos con alto nivel de cargas. El macro-agrietado es frecuente en pinturas tipo emulsión o látex, en las que la coalescencia no es adecuada bajo condiciones de alta velocidad de evaporación del agua. Para controlarla se deben emplear pinturas con alta tensión de adhesión y seleccionar adecuadas condiciones de secado; además, se debe evitar escurrimientos y áreas con excesivo espesor de película.

**Arrugado.** Consiste en la formación de arrugas en la superficie de la película, ya sea en forma lineal o totalmente irregular, Figura XII.9; las arrugas pueden ser tenues o gruesas. La causa generadora de esta falla es que en la superficie de la película se produce una expansión más rápida durante el secado que en el cuerpo de la misma. La magnitud de la falla es proporcional al espesor de la película.

En la formulación de pinturas alquídicas se incluyen agentes secantes de superficie e internos para catalizar las reacciones de adición de oxígeno en las dobles ligaduras que presenta la resina, de tal manera que la velocidad de secado sea similar en la superficie que en el cuerpo de la película.

Sin embargo, un exceso de agente secante de superficie genera una rápida expansión volumétrica responsable del arrugado.

Para prevenir esta falla se deben seleccionar pinturas con adecuadas características de secado (en el caso de productos alquídicos debe estar balanceado adecuadamente el nivel de los agentes secantes y además se debe realizar una aplicación uniforme evitando excesivos espesores de película.



**Figura XII.6. Macroagrietado de película sobre mampostería**

**Fallas por acción de microorganismos.** Las bacterias y los hongos, particularmente en pinturas de base acuosa, producen ablandamiento de la película y formación de puntos oscuros que generan una pobre apariencia, Figura XII.10 y Figura X.11. Los microorganismos atacan los componentes biodegradables incluidos en la formulación, los cuales se comportan como nutrientes para sus funciones vitales.

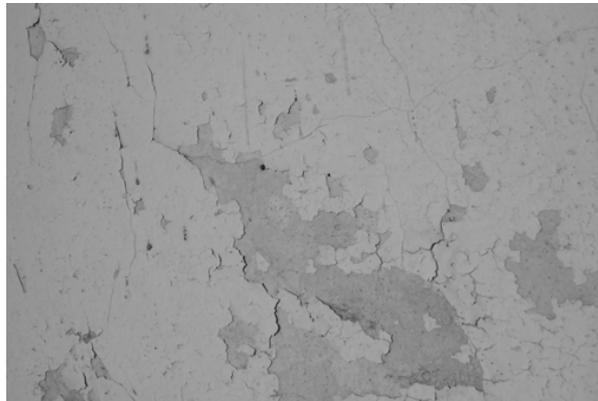


**Figura XII.7. Macroagrietado con corrosión metálica del sustrato**

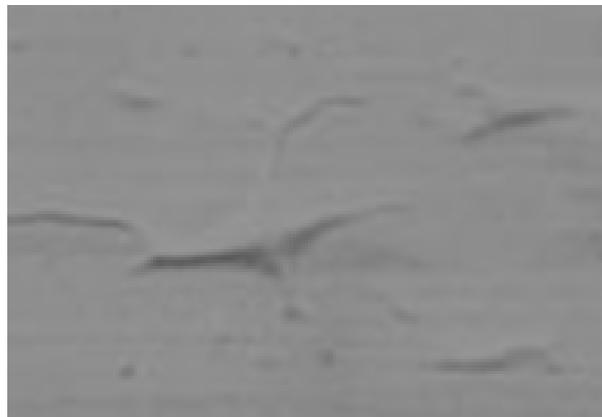
Esta falla es reducida o completamente eliminada incluyendo bactericidas y fungicidas estables, en niveles porcentuales adecuados.

**Decoloración.** Este tipo de falla se origina en una gran variedad de causas y afecta fundamentalmente el aspecto decorativo, Figura XII.12 y Figura XII.13.

Muchas resinas empleadas en la industria de la pintura contienen grupos insaturados, que por exposición a la luz solar cambian de color (generalmente se observa un amarillamiento o oscurecimiento de la película). En algunos casos, los pigmentos orgánicos también modifican su color debido al envejecimiento por acción del medio y/o por reacción química.



**Figura XII.8. Macroagrietado con desprendimiento de película**



**Figura XII.9. Arrugado de una película**

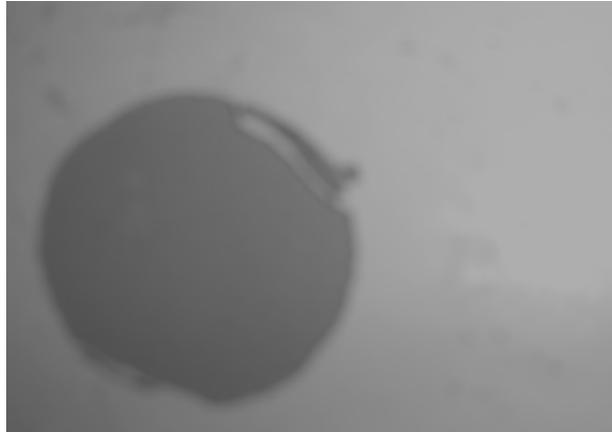


**Figura XII.10. Falla de película por la acción de hongos sobre mampostería**



**Figura XII.11. Falla de película por la acción de hongos sobre chapa de fibrocemento, formulada con y sin fungicidas eficientes (izquierda y derecha, respectivamente)**

El método para prevenir la decoloración consiste en seleccionar los diferentes componentes de la pintura con colores estables. Así, por ejemplo, resinas de siliconas, acrílicas y poliuretánicas alifáticas reducen cualquier cambio de color a un mínimo; en lo referente a la pigmentación, aquéllos de naturaleza inorgánica deben ser seleccionados para severas condiciones de exposición a la intemperie.



**Figura XII.12. Fallas por decoloración, observación microscópica**



**Figura XII.13. Fallas por decoloración en la parte inferior del panel (parte superior enmascarada)**

#### **XII.4 FALLAS DE FORMULACIÓN DE PINTURAS INORGÁNICAS**

Las pinturas ricas en cinc presentan también fallas inherentes a la formulación; están basadas en vehículos de silicatos y cinc metálico de diferente forma y tamaño de partícula.

**Cuarteado.** El aspecto de la falla es similar a la mencionada para pinturas orgánicas; sin embargo, la causa fundamental en este caso es generalmente la excesiva cantidad de polvo de cinc metálico y de otros

pigmentos en la composición. La elevada relación pigmento/ligante, bajo rápidas condiciones de secado, puede generar grietas superficiales características de esta falla.

Muchas formulaciones contienen pigmentos fibrosos y mezclas solvente de velocidad de evaporación adecuada para prevenir el agrietado. La película se debe aplicar en el espesor recomendado (generalmente oscila en 80  $\mu\text{m}$  aproximadamente) y se debe permitir secar en condiciones favorables.

Finalmente, resulta oportuno señalar que en este tipo de pinturas la formación de grietas no constituye una falla grave, ya que éstas gradualmente expuestas a la atmósfera se obturan con los voluminosos productos de corrosión del cinc (al igual que los poros presentes por el bajo contenido de ligante); así, se mantiene la eficiencia del sistema protector (elevado efecto barrera).

**Macro-agrietado.** El motivo de este tipo de falla es similar al mencionado para el cuarteado: alto contenido de pigmento, excesivo espesor de película y rápida evaporación del solvente que genera una contracción superficial; en algunos casos, una elevada viscosidad de aplicación también origina esta falla.

En el caso de pinturas basadas en silicato de etilo, la falta de humedad para producir el curado conduce a la formación de grietas en la superficie de la película.

**Resistencia química.** La presencia de agentes químicos deteriora las pinturas ricas en cinc, atacando el metal base en forma de corrosión localizada o bien continua. Los ácidos disuelven el cinc incluido en la película mientras que los álcalis a pH superiores a 10 pueden reaccionar con los silicatos formadores de película y también con el cinc.

La medida preventiva consiste en aplicar pinturas de terminación (bajo condiciones estrictamente controladas) de alta resistencia a los agentes químicos.

**Oxidación.** Al final de la vida útil (agotamiento de las partículas de cinc o bien ausencia de adecuado contacto eléctrico entre el polvo metálico y el sustrato) se observan puntos de oxidación aislados al principio y casi continuos a medida que transcurre el tiempo de exposición.

Las medidas preventivas están basadas en aplicar una capa de pintura de mantenimiento al primer indicio de oxidación; esta etapa requiere la previa eliminación de las sales de cinc por lijado manual o arenado suave para lograr una satisfactoria adhesión de la capa de mantenimiento.

## XII.5 FALLAS DE ADHESIÓN

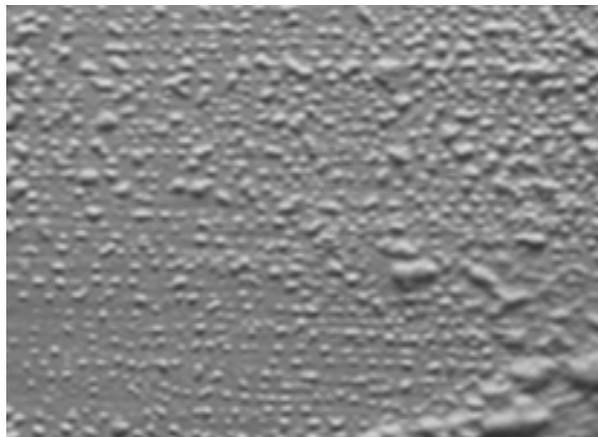
**Ampollamiento.** El aspecto de esta falla involucra proyecciones en forma de burbujas semiesféricas que contienen gas o líquido en su interior; el ampollamiento puede ocurrir en áreas de alta humedad, con continua o bien intermitente condensación sobre la superficie, Figura XII.14.

El ampollamiento es causado por gases o líquidos debajo o en el interior de la película que ejercen una presión más elevada que la tensión de adhesión al sustrato o que las fuerzas de cohesión internas.

La ampolla generalmente incrementa su tamaño hasta que tensión de la película alcance la presión interna; si ésta se incrementa, la ampolla estalla y el sustrato es rápidamente atacado por el medio externo.

Las causas están vinculadas a la pérdida de adhesión por inadecuada preparación de la superficie, sales dispuestas sobre el sustrato antes de la aplicación de la pintura y componentes solubles del producto aplicado que generan el fenómeno osmótico (ingreso de agua o vapor de agua a través de la película que se comporta como una membrana semipermeable), presencia de gases absorbidos en el interior del metal, solventes retenidos, etc.

La solución es básicamente seleccionar pinturas con adecuada adhesión y permeabilidad al vapor de agua; la aplicación se debe implementar sobre superficies limpias y con buen perfil de rugosidad.



**Figura XII.14. Ampollamiento de una película de pintura**

**Desprendimiento.** El aspecto de la falla se corresponde con láminas eliminadas espontáneamente de una película a consecuencia de la

pérdida de adhesión, frecuentemente producida por una condición húmeda, Figura XII.15.

La causa fundamental es que la adhesión de la película al sustrato es menor que la resistencia a la tracción de la misma; tiene lugar también cuando la pintura reacciona con el sustrato y pierde adhesión y además cuando la película es muy flexible (elevado grado de plastificación).

La disminución o eliminación del pelamamiento se alcanza adoptando las precauciones mencionadas para controlar el ampollamiento.



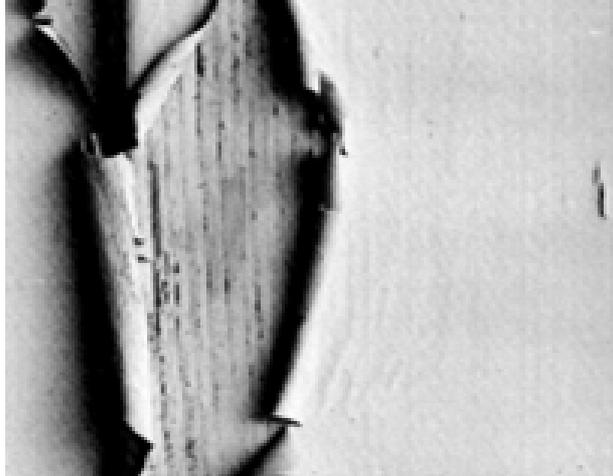
**Figura XII.15. Desprendimiento de una película de pintura**

**Escamación.** Se observa el desprendimiento de trozos de película, ya sea desde el sustrato o desde una capa base. Se origina en la pérdida de adhesión por tensiones internas; generalmente está precedida de cuarteado y agrietado de la película. Las medidas preventivas son las citadas para evitar el ampollamiento, Figura XII.16.

**Delaminación entre capas.** La pintura de terminación se desprende de la capa inferior debido a la formación de ampollas, pelamamiento y/o escamación, Figura XII.17. Generalmente se produce porque la pintura final del esquema protector no es compatible con la de la base o intermedia.

También puede atribuirse a una contaminación superficial o bien al curado completo de productos de dos componentes de la capa anterior; en el primer caso se desarrolla el fenómeno osmótico, mientras que en el segundo la reacción completa de curado genera una superficie dura y muy brillante con inadecuado perfil de rugosidad para un correcto anclaje de la película final.

Para evitar la delaminación entre capas usualmente se especifica seleccionar pinturas compatibles y con buena adhesión entre capas, limpiar la película de base antes del pintado y no exponer al medio en forma prolongada cubiertas no resistentes antes de aplicar la pintura de terminación.



**Figura XII.16. Escamación de una película de pintura**

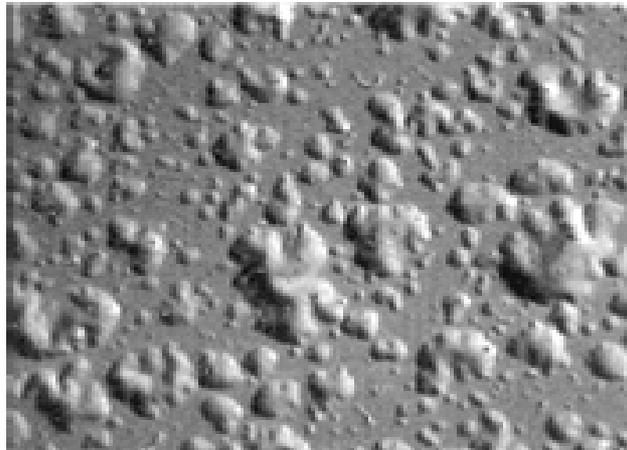


**Figura XII.17. Delaminación entre capas**

**Corrosión debajo de la película.** El aspecto indica corrosión en la interfase sustrato/película, particularmente en poros, bordes, discontinuidades, etc., Figura XII.18.

La contaminación superficial del sustrato o una rugosidad insuficiente del mismo, sumando a pobres características de la pintura (viscosidad y tensión superficial no adecuadas), resultan las causas fundamentales de este tipo de falla.

En función de lo citado anteriormente, se deben seleccionar pinturas con alta tensión de adhesión y además preparar y limpiar las superficies convenientemente. El empleo de pinturas ricas en cinc sobre sustratos ferrosos reduce la corrosión debajo de la película.



**Figura XII.18. Corrosión debajo la película**

## **XII.6 FALLAS RELACIONADAS CON EL SUSTRATO**

El sustrato no se considera frecuentemente como un factor decisivo en las fallas que presentan las películas de pintura; sin embargo, es absolutamente importante.

Las superficies que merecen ser consideradas son el acero, el aluminio, el cinc, el cobre, el concreto y la madera. Una pintura puede ser eficiente sobre una superficie y presentar un comportamiento pobre sobre otro sustrato.

**Acero.** Las fallas usuales que presenta el acero pintado en servicio son la presencia de ampollas, la oxidación y la pérdida de adhesión en áreas expuestas a medios de alta agresividad.

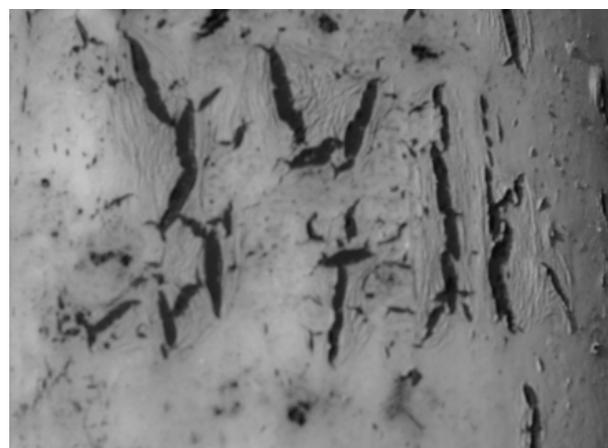
La Figura XII.19 muestra la corrosión generalizada de un sustrato metálico, la Figura XII.20 la corrosión intergranular y la Figura XII.21 la oxidación por desprendimiento de la película debido a impactos.

Las causas frecuentes están vinculadas a la retención de pequeñas cantidades de productos de corrosión o contaminantes aún en superficies arenadas o granalladas.

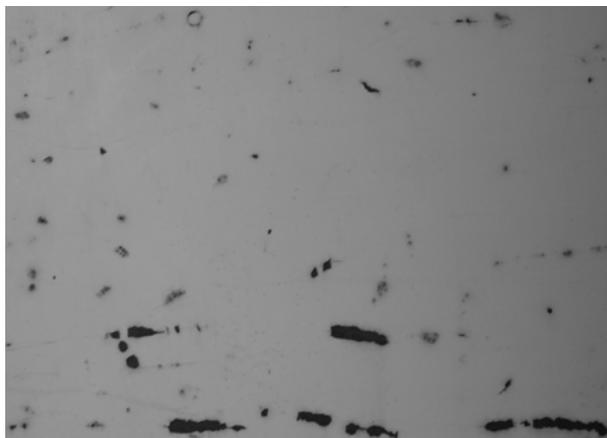
Para disminuir el número de fallas y la intensidad de las mismas se debe inicialmente lavar la superficie con una solución alcalina como desengrasante, luego arenar o granallar, eliminar con aire a presión el polvo remanente y aplicar rápidamente una imprimación con adecuada adhesión. La temperatura y el punto de rocío son dos variables que deben ser cuidadosamente controladas.



**Figura XII.19. Corrosión generalizada de un sustrato metálico**



**Figura XII.20. Corrosión intergranular de un sustrato metálico**



**Figura XII.21. Oxidación por desprendimiento de la película debido a impactos**

**Sustratos ferrosos con pinturas ricas en cinc.** El aspecto de la falla es la presencia de productos blancos de corrosión del cinc formados por la actividad galvánica, debajo de la película de la pintura de terminación o a través de las discontinuidades de la misma. Las sales voluminosas de cinc cortan la película y aparecen en la superficie.

La medida preventiva tendiente a prolongar la vida útil del sistema protector consiste en limpiar mecánicamente la superficie y aplicar un primer adherente y finalmente una pintura de terminación.

**Aluminio.** Este metal tiene generalmente óxidos superficiales densos que conforman una superficie lisa, la cual es apta para la aplicación de algunas pinturas; sin embargo, la falta de un perfil de rugosidad adecuado en el óxido de aluminio conduce a pérdidas de adhesión de la mayoría de las pinturas.

En este último caso, el aspecto de la falla es la aparición de productos blancos de corrosión del aluminio y la formación de ampollas.

La superficie de aluminio, antes de pintar, se debe limpiar mecánicamente y aplicar sobre la superficie seca un primer adherente.

**Cobre.** Este metal forma una película densa de óxidos de cobre; la mayoría de las pinturas comerciales tiene una pobre adhesión sobre esta superficie, presentando luego de la exposición en servicio una coloración gris-verdosa debido a la corrosión del sustrato y en muchos casos un ampollamiento intenso. Para mejorar la adhesión física, la superficie se debe limpiar mecánicamente antes de pintar y luego aplicar un producto adherente.

En sustratos de cobre de pequeñas dimensiones, al igual que en el caso del aluminio, se pueden aplicar tratamientos químicos diversos que presentan una elevada eficiencia para mejorar el perfil de rugosidad y consecuentemente la adhesión de la película.

**Concreto.** Este material es químicamente activo, heterogéneo y con elevada porosidad; los poros usualmente están llenos de agua y aire, ellos convierten a este sustrato en dificultoso para proteger adecuadamente con una película de pintura continua y uniforme.

La medida preventiva consiste básicamente en limpiar la superficie y realizar previo al pintado neutralización con una solución ácida, ya que en concretos nuevos el pH superficial puede alcanzar el valor 13.

Luego del secado, se debe usar una imprimación resistente a los álcalis (por ejemplo un epoxi líquido o bien un primer basado en caucho clorado), con propiedades tixotrópicas para llenar las imperfecciones de las superficies.

**Madera.** Este material muy usado en la construcción desde la antigüedad, tiene propiedades intrínsecas que son generadoras de fallas en las películas de pintura: dilatación y contracción debido a los cambios de temperatura y humedad (alto coeficiente de absorción de agua con la posterior evaporación de aquella) y diferente estabilidad dimensional de los granos porosos duros y blandos, Figura XII.22.

Generalmente el tipo de falla es la rotura de la película de pintura: cuarteado, agrietado y también ampollamiento, debido a la baja permeabilidad al vapor de agua de la misma.

La solución está basada en limpiar inicialmente la superficie y aplicar un producto altamente penetrante que posea además una elevada elasticidad para acompañar el movimiento del sustrato. La película debe ser permeable al vapor de agua.

## **XII.7 FALLAS RELACIONADAS CON LA APLICACIÓN**

Este tipo de fallas conforma la mayoría de las dificultades encontradas en servicio con pinturas tanto protectoras como decorativas y de diferente naturaleza química.

La falta de conocimiento y de experiencia constituye generalmente un factor decisivo, seguido de la ausencia de especificaciones y de una inspección adecuada.

**Heterogeneidad de la pintura.** Luego de un tiempo de estacionamiento determinado en el envase, el pigmento y los extendedores sedimentan

por la acción gravitatoria: la incorporación no uniforme antes de pintar modifica la relación pigmento / ligante óptima de la formulación.

Consecuentemente este producto heterogéneo en su composición presenta una disminución sensible de sus propiedades, generando áreas con pobre adhesión, color diferente, agrietado y/o cuarteado, etc.

Se debe especificar explícitamente la forma de agitar previamente la pintura (preferentemente en forma mecánica) hasta alcanzar homogeneidad de color, distribución uniforme del pigmento y de los extendedores, etc.



**Figura XII.22. Falla de película en sustrato de madera**

**Diluyente inadecuado.** El diluyente no es un verdadero solvente del material formador de película; puede resultar incompatible con el sistema disperso y además presentar una menor velocidad de evaporación que el solvente, conduciendo a películas con pobre adhesión, con aspecto jaspeado debido a la diferente flotabilidad de los pigmentos, con la separación del pigmento y el vehículo inmediatamente después de la aplicación, con formación de cráteres, con comportamiento reológico inadecuado, etc., Figura XII.23.

Por otro lado, si el diluyente se elimina rápidamente de la película conduce a un enfriamiento de la superficie por absorción del calor latente de vaporización y consecuentemente genera una condensación de humedad sobre la película líquida con la consiguiente turbidez en el aspecto final de la misma.

**Condición atmosférica desfavorable.** Con una humedad relativa elevada se puede producir condensación sobre la superficie del sustrato

previo al pintado, generando películas pobremente adheridas y con presencia de ampollas.

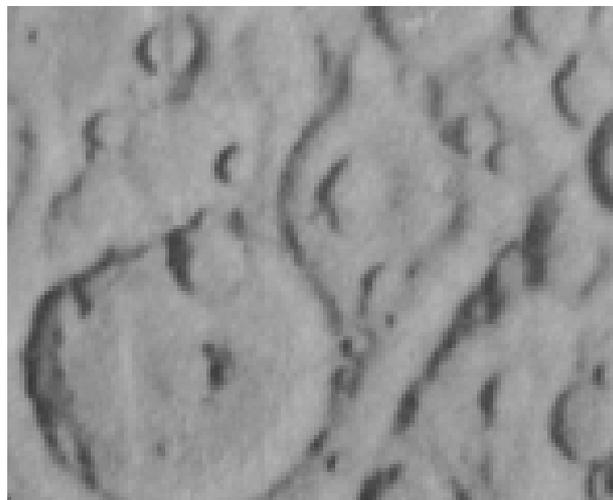
Por su parte, si la temperatura ambiente es elevada el rápido secado conduce a películas con polvo superficial, mientras que a temperaturas bajas durante la aplicación la película permanece blanda por curado incompleto.

Las medidas que se deben especificar incluyen que la humedad relativa sea inferior al 80% o mejor aún que la temperatura supere al menos en 3°C el punto de rocío.

Para la mayoría de los casos, se debe realizar la aplicación con temperaturas superiores a los 5°C excepto para las pinturas reactivas que requieren 20 ó 25°C como mínimo.

**Espesor de película no uniforme.** En áreas con espesores inferiores a los especificados pueden resultar insuficiente y conducir a procesos de corrosión localizados, mientras que un excesivo número de capas (generalmente en superficies con acceso dificultoso) genera cuarteado, agrietado, escamado, etc.

La aplicación se debe realizar cuidadosamente y con capas sucesivas cruzadas; en el caso de las pulverizaciones, se debe solapar cada capa un 50 sobre la anterior.



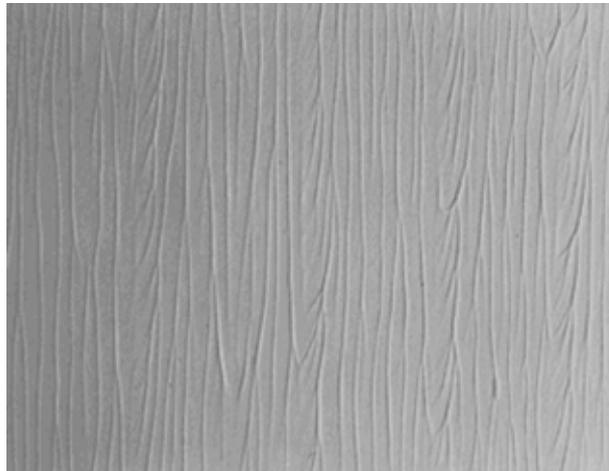
**Figura XII.23. Observación microscópica; falla por selección de diluyente inadecuado**

**Sobrepintado.** Esta falla conduce a la adhesión de partículas semisecas sobre la superficie debido a una incorrecta técnica de aplicación o un ajuste inadecuado del equipo de pulverización (muy baja presión del “spray” y elevada presión de aire), Figura XII.24.

El resultado es que las partículas semisecas o secas por falta de un flujo suficiente no pueden fusionarse para conformar una película uniforme y continua.

La aplicación con equipos sin aire comprimido puede conducir a un sobrepintado cuando se ha seleccionado un orificio de salida de la pistola demasiado pequeño o bien cuando la pulverización es muy ancha. Para evitar el sobrepintado, la aplicación debe realizarse cuidadosamente en forma regular; se debe lijar antes de aplicar la pintura de terminación.

**Salpicado y discontinuidad de película.** El aspecto corresponde a áreas con reducido espesor de película o directamente sin protección. La falla se debe a una inadecuada pulverización, generalmente sin solapar convenientemente; se produce en lugares con acceso dificultoso para la aplicación de la pintura. La solución consiste en aplicar cuidadosamente la pintura, solapando el 50% y emplear la técnica de capas cruzadas.



**Figura XII.24. Falla de una película por sobrepintado**

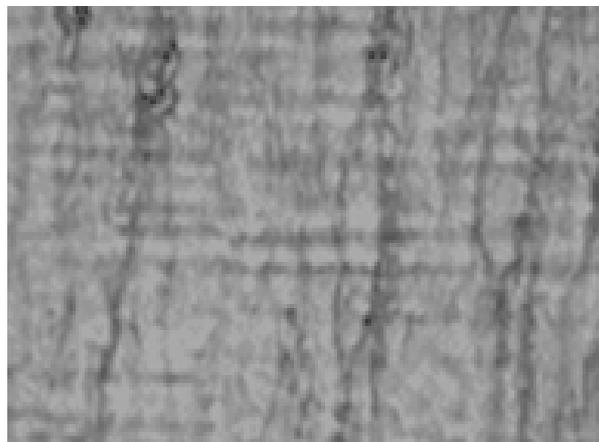
**Sangrado.** La característica de esta falla es la presencia de manchas coloreadas en la superficie de la pintura de terminación, debido a que algunos componentes de la imprimación o pintura base (resinas, pigmentos solubles o aditivos) difunden hacia la superficie libre pintada, Figura XII.25 y Figura XII.26; esa falla se intensifica generalmente con

la exposición del sustrato pintado a la acción de la luz y en medios con temperatura elevada. El control de esta falla se alcanza sellando la imprimación o película base con una pintura intermedia compatible formulada con pigmentos laminares para controlar los procesos difusionales.



**Figura XII.25. Sangrado o manchado de la película**

**Levantamiento de la película.** La aplicación de una pintura de terminación inadecuada sobre una película base puede producir el arrugado, hinchamiento y/o ampollado por la acción solvente de la misma. Luego de producida la falla y antes de realizar las tareas de aplicación de nuevas capas de pintura, se debe remover el esquema protector en las áreas afectadas.



**Figura XII.26. Sangrado o manchado de la película**

**Chorreado.** Un comportamiento reológico no satisfactorio, producido generalmente por un excesivo adelgazamiento previo al pintado (reducida viscosidad a las bajas velocidades de corte o cizallamiento a que está sometida la película húmeda), conduce a un descuelgue o traslado de pintura por efecto gravitatorio luego de la aplicación en superficies verticales. El elevado espesor de película húmeda (superior al crítico) es otro factor generador del chorreado, Figura XII.27.

Para controlar este fenómeno que incide significativamente en el aspecto decorativo, se deben aplicar películas de menor espesor, controlar la temperatura de la superficie y seleccionar pinturas con mayor coeficiente de viscosidad a bajas velocidades de corte.

Se debe controlar el tipo y cantidad de mezcla solvente empleada para el ajuste de viscosidad.

**Piel de naranja.** La imposibilidad de una película húmeda a fluir para alcanzar un aspecto uniforme debido a las características rápidas del secado genera superficies lisas caracterizadas por una irregular ondulación de la película, similar a la textura de la piel de la naranja.

Se debe aplicar un espesor adecuado de película húmeda y adicionar un solvente de menor velocidad de evaporación.



**Figura XII.27. Descuelgue o chorreado de una película de pintura aplicada en un sustrato vertical**

**Formación de cráteres y agujeros.** La inadecuada técnica de pulverización: pistola ubicada demasiado cerca de la superficie que introduce burbujas de aire en la película, presión del “spray” demasiado alta y presión de aire que atomiza la pintura muy baja son los factores fundamentales para generar pequeños pero visibles agujeros y cráteres en la película.

Generalmente aquéllos aparecen en concentraciones con una distribución al azar y pueden alcanzar en ciertos casos algunos mm de diámetro, normalmente con un residuo sólido en el centro rodeado por un espacio hueco.

Para evitar esta falla se debe pulverizar a la distancia óptima y presiones de pulverización y atomización adecuadas; si los cráteres y agujeros persisten, se debe arenar o lijar el área con fallas y aplicar una capa con pincel.

**Fallas de nivelación.** El comportamiento reológico de la pintura húmeda, particularmente la viscosidad a bajas velocidades de corte, definen la capacidad de nivelación.

Una elevada velocidad secado, un producto con características pseudoplásticas o bien un trixotrópico pero con elevada cinética de recuperación de viscosidad conducen a película con marcas superficiales. Se debe ajustar el tipo y contenido de mezcla solvente en el momento de la aplicación, en función de las condiciones ambientales. Esta falla no interfiere en la performance protectora pero en cambio sí afecta el aspecto decorativo.

**Enturbiamiento.** Se observa turbidez en una película homogéneamente clara, es decir en forma de capa blancuzca en la superficie. Cuando el solvente se evapora, el filme traslúcido presenta escasa resistencia a la tracción, muy quebradizo y generalmente mate.

Esta falla se debe a la condensación de humedad sobre la película debido a la rápida evaporación del solvente (enfriamiento). La solución está basada en aplicar en mejores condiciones de humedad relativa y en reducir la presión de aire de la pistola de aplicación.

# **E. FALLAS DE LA PELÍCULA Y CONTROL DE CALIDAD**

## **Capítulo XIII. Control de calidad**

## **CAPÍTULO XIII. CONTROL DE CALIDAD**

### **XIII.1 INTRODUCCIÓN**

Los componentes de una pintura y la influencia que ellos ejercen sobre las propiedades fisicoquímicas del producto al estado líquido y en forma de película fueron estudiados anteriormente. En el presente trabajo se desarrolla cómo se efectúa el control de calidad de películas de pinturas de diferente naturaleza.

Los organismos específicos elaboran normas con requisitos a cumplimentar por cada tipo de producto en particular (IRAM, Argentina; ASTM, Estados Unidos de América; BS, Inglaterra; DIN, Alemania, etc.). Estas normas son el resultado de numerosos estudios e investigaciones sobre las propiedades de cada material y definen las condiciones mínimas de calidad de las pinturas y de las películas en particular.

Las *especificaciones* de productos (pinturas, diluyentes, etc.) y de operaciones involucradas (preparación de superficies, aplicación de pinturas, mantenimiento preventivo y tareas de inspección) definen el sistema de pinturas y el esquema de pintado para una estructura dada inserta en un determinado medio agresivo. La redacción debe estar a cargo de instituciones reconocidas o bien de especialistas en pinturas con sólida experiencia en la temática.

Luego de finalizado el proceso de formación de la película, se deben realizar ensayos tendientes a determinar su performance.

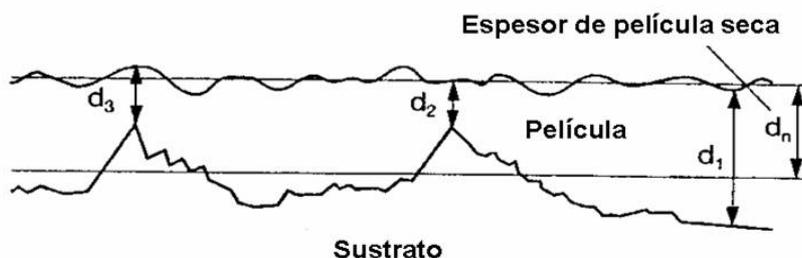
En el presente capítulo se incluyen el espesor, algunas propiedades fisicomecánicas tales como adhesión, dureza y elasticidad, así como también las características decorativas más usuales y la resistencia en diferentes condiciones de exposición.

### **XIII.2 ESPESOR DE PELÍCULA**

La naturaleza del sustrato y las características del medio agresivo definen un espesor óptimo para cada sistema de pinturas. Altos espesores aseguran buenas propiedades de flujo, satisfactorio poder cubriente y reducida permeabilidad al vapor de agua, gases, etc. Sin embargo, espesores elevados generalmente conducen al deterioro de las propiedades fisicomecánicas y consecuentemente a un desempeño en servicio menos eficiente.

La distribución del espesor de película y el valor medio óptimo son variables a controlar con el fin de asegurar la calidad del sistema.

Generalmente la rugosidad del sustrato constituye una importante dificultad para su determinación; el espesor de película resulta un valor medio y depende, además de la rugosidad, del método de medida, Figura XIII.1 y Figura XIII.2. Este debe ser previamente seleccionado y exactamente definido.



**Figura XIII.1. Rugosidad del sustrato**



**Figura XIII.2. Medidor de rugosidad**

Para evaluar la capacidad protectora de una película de pintura se deben adicionar otros criterios; esencialmente la definición de la rugosidad del sustrato como así también los espacios vacíos e irregularidades de la capa producidos durante la aplicación.

Para ensayos de laboratorio resulta usual el empleo de extendedores para obtener espesores de película aceptablemente homogéneos, Figura XIII.3.



**Figura XIII.3. Extendedor para obtener películas de pintura de espesor uniforme**

La mayoría de los métodos determina el espesor de la película aplicada y curada. Sin embargo, en muchos casos resulta de interés evaluar el espesor húmedo con el fin de realizar la corrección durante la aplicación para alcanzar un definido valor de película seca; para ello, el contenido de sólidos en volumen del producto es fundamental.

En consecuencia, los métodos de medida se clasifican para cuantificar el espesor de la película al estado húmedo y seco. Algunos de ellos se pueden emplear para ambos casos.

Si la película se encuentra al estado húmedo, los métodos más sencillos son el peine y la rueda; se obtienen valores de mayor precisión con fluorescencia de rayos X y ultrasonido.

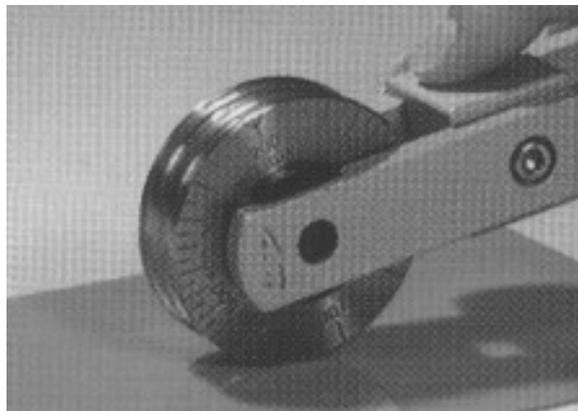
Para la película seca, los métodos se clasifican en destructivos y no destructivos; en el primer grupo se encuentran la cuchilla de corte y la aguja deflectora y en el segundo, los dispositivos basados en la fuerza adhesiva magnética y la inducción magnética; otros métodos se fundamentan en ultrasonido, efectos fototérmicos, etc.

En lo referente al *peine*, este posee dientes o agujas de diferente longitud; se lo presiona sobre la película fresca en ángulo recto hasta alcanzar el contacto con la superficie de base. La aguja de mayor longitud que no entró en contacto con la pintura indica el espesor de película húmeda.

El método de la *rueda* está basado en el mismo principio que el peine, Figura XIII.4. Posee tres superficies paralelas: dos de ellas (las externas) están centradas y permiten su desplazamiento de rotación

mientras que la restante está ubicada entre las dos primeras, tiene menos diámetro y está dispuesta en forma excéntrica.

La rueda es presionada sobre la pintura húmeda; la superficie central presenta distancias variables hasta el sustrato, dependiendo de la posición. Por rotación se determina el lugar en el cual la superficie excéntrica central está exactamente humectada por la pintura; esta última se corresponde con el espesor de película húmeda.



**Figura XIII.4. Determinación del espesor de película húmeda a través de la rueda**

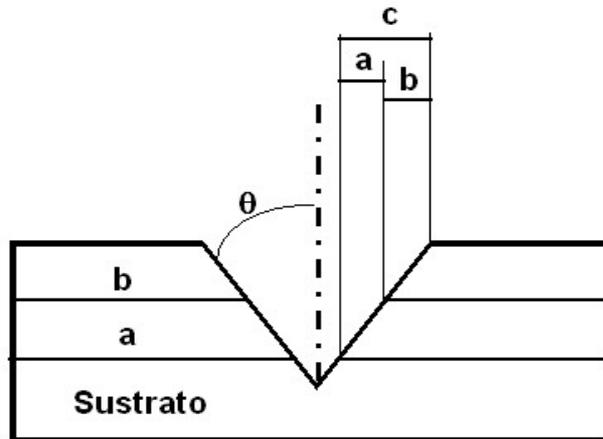
La *cuchilla de corte* involucra el corte de una película o de sistemas multicapa hasta el sustrato generando una discontinuidad en V con un ángulo de inclinación definido (generalmente  $45^\circ$ ), Figura XIII.5.

Se determina microscópicamente la distancia en un plano paralelo al sustrato sobre una cara inclinada de la película cortada; la lectura en el dispositivo corrige esa distancia según el ángulo y determina el espesor total y el de las diferentes capas del sistema. Se emplea para sustratos metálicos, maderas, plásticos, etc.

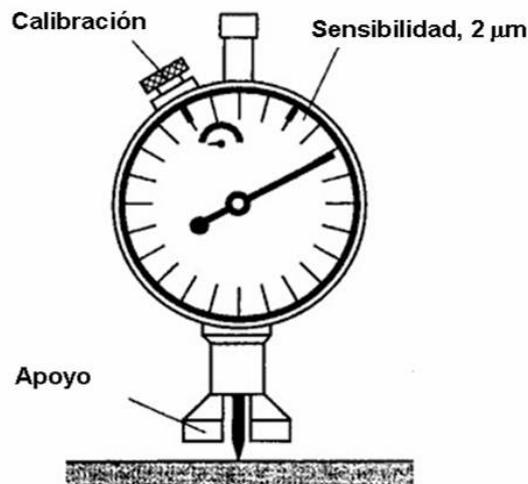
La *aguja deflectora* determina solo el espesor total; tiene dos apoyos que se fijan sobre el sustrato pintado y una punta central conectada a un sistema de transmisión que permite deflecionar una aguja sobre una escala circular graduada, en proporción al espesor de la película seca, Figura XIII.6. Se emplea sobre superficies metálicas y no metálicas.

Dentro del conjunto de *ensayos no destructivos*, uno de ellos está basado en la medida que involucra una *fuerza de adhesión magnética* de un magneto permanente y la influencia de un flujo magnético ejercido por inductancia sobre un sustrato electromagnético.

Interpreta la dependencia de la fuerza de atracción ejercida por el magneto permanente en función del espesor de la capa de pintura. La fuerza máxima para despegar el dispositivo de la superficie es una medida del espesor de la película.



**Figura XIII.5. Determinación del espesor de película seca.  
Ensayo destructivo: cuchilla de corte**



**Figura XIII.6. Medidor de espesor de película seca.  
Ensayo destructivo: aguja deflectora**

Los espesores de películas también pueden cuantificarse por *efecto inductivo-magnético*.

El dispositivo está basado en la influencia inductiva de un sustrato magnético sobre un campo alternativamente electromagnético; son los más usados por su elevada sensibilidad y precisión de los resultados, Figura XIII.7.

El dispositivo inductivo-magnético genera por el pasaje de la corriente un flujo magnético en el arrollamiento primario de un electromagneto y este a su vez genera un voltaje inducido por aquel.

En la medida del espesor, la película influye sobre la magnitud del flujo magnético y en consecuencia en el valor del voltaje inducido. Este es directamente proporcional al espesor de la película.



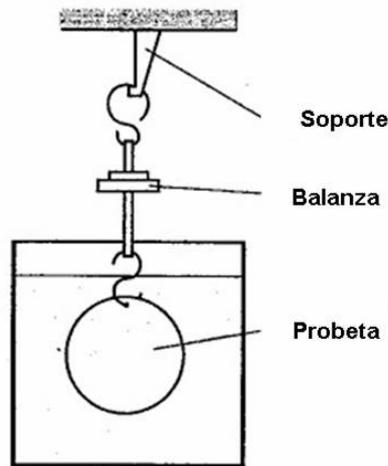
**Figura XIII.7. Medidor de espesor de película seca.  
Ensayo no destructivo: efecto magnético-inductivo**

### **XIII.3 DENSIDAD DE LA PELÍCULA SECA**

La evaluación del volumen de un sólido que permita calcular la densidad del mismo a partir de la masa no resulta una tarea sencilla, Figura XIII.8.

Una forma de medir el volumen de sólidos no particulados es por inmersión en mercurio y evaluar el volumen desplazado de este último.

También, si se dispone de la formulación de la pintura, resulta posible por cálculo estimar la densidad de los sólidos (película seca). Otra forma consiste en aplicar la norma DIN 53219.



**Figura XIII.8. Densidad de la película seca**

La norma citada indica que la pintura debe aplicarse sobre un panel de masa conocida y de volumen  $V_1$  estimado por cálculo a través de la siguiente ecuación  $V_1 = (m_1 - m_2) / \rho_1$ . Luego, el panel se pinta y se determina el volumen  $V_2$  con la expresión  $V_2 = (m_3 - m_4) / \rho_1$ , donde:

- $m_1$  = masa del panel en el aire
- $m_2$  = masa del panel en agua
- $m_3$  = masa del panel pintado en el aire
- $m_4$  = masa del panel pintado en agua
- $\rho_1$  = densidad del agua.

El volumen de la película seca  $V_3$  es la diferencia entre  $V_2$  y  $V_1$  mientras que la masa de la misma está dada por  $m_3 - m_1$ .

Finalmente se calcula la densidad de la película seca  $\rho$ , que está dada por la ecuación:

$$\rho = (m_3 - m_1) / (V_2 - V_1)$$

### **XIII.4 CONTINUIDAD DE LA PELÍCULA**

La protección de sustratos metálicos depende, entre otras variables, del espesor de película seca y particularmente de la continuidad de la misma.

Las características reológicas de la pintura, el método de aplicación y las condiciones ambientales influyen sobre la posible inclusión de finas o extremadamente finas burbujas de aire o bien la generación de áreas no adecuadamente humectadas.

En lo referente a los espacios vacíos, estos pueden distribuirse aisladamente cuando están presentes en un número reducido o bien en contacto entre sí generando capilares continuos desde el sustrato hasta la superficie libre (si su presencia es abundante en cantidad y son significativos en tamaño).

Los citados espacios libres o vacíos deterioran la calidad de la protección ya que ellos facilitan el acceso del agua y otros electrolitos al interior de la película y hasta el propio sustrato en caso de ser absorbente.

Los sistemas multicapa resultan recomendables para disminuir la significación de esta falla. La determinación cuantitativa de los espacios constituye una tarea absolutamente indispensable, por ejemplo para evaluar la acción inhibitoria de una pintura anticorrosiva.

Un método relativamente sencillo para contabilizar los canales continuos en el interior de la película consiste en sumergir el panel pintado en una solución de sulfato de cobre a la cual se le incorporó un agente tensioactivo.

El hierro de base es oxidado por el ion cobre y este a su vez se deposita visiblemente como cobre metálico; la cantidad de espacios por decímetro cuadrado del panel permite realizar una clasificación según la densidad de los mismos:  $P_1$ , sin espacios vacíos;  $P_2 < 20$ ;  $P_3$ , 20-100;  $P_4$ , 101-400 y  $P_5 > 400$ . Los espacios o capilares no continuos no se pueden identificar y cuantificar con la solución de cobre.

Un método adecuado, tanto para espacios continuos como discontinuos, consiste en generar una descarga eléctrica mediante la aplicación de una elevada tensión entre el sustrato metálico y un plumero de alambres el cual es pasado sobre el mismo.

Los espacios conductores son indicados por descargas sonoras o por líneas de campos eléctricos fácilmente observables a simple vista, Figura XIII.9.

### **XIII.5 PROPIEDADES VISUALES**

La opacidad, el color y el brillo de las superficies son percepciones subjetivas por la interacción de la luz con la película de las pinturas.

Estas propiedades, en conjunción con la forma de la superficie pintada, combinan aspectos estéticos y funcionales.

La **opacidad** se refiere a la capacidad de ocultación del sustrato; depende de la diferencia de los índices de refracción del pigmento considerado y el material formador de película. Se emplean diversos métodos para determinarla:

- Escala de contrastes: se emplea un cartón damero con cuadrados blancos (reflexión mayor al 85%) y negros (reflexión inferior al 5%) de 50 x 50 mm, Figura XIII.10.



**Figura XIII.9. Detector de poros en películas sobre sustratos metálicos por descarga eléctrica**

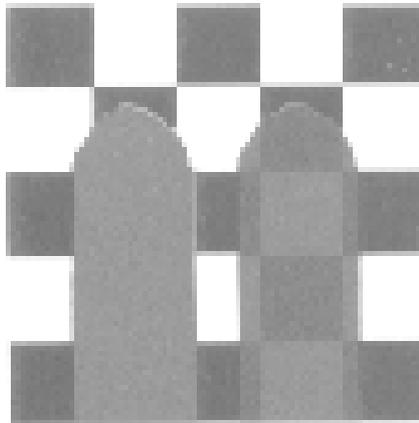
La determinación involucra la aplicación de pintura hasta cubrir totalmente el contraste blanco-negro y se expresa generalmente en  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  o bien en  $\text{m}^2 \cdot \text{l}^{-1}$ .

La observación se puede realizar a simple vista o bien empleando un reflectómetro; en este caso la relación de reflexión negro/blanco considerada aceptable alcanza un valor de 0,98.

- Criptómetro de Pfund: El criptómetro consiste en una placa de vidrio negra de aproximadamente 140 x 50 x 6 mm; la cara superior es óptimamente plana y posee una ranura transversal de 10 mm de ancho y 2 mm de profundidad. Hacia un lateral de la citada ranura la placa tiene grabada una escala graduada.

El dispositivo se complementa con una placa de vidrio transparente rectangular de 70 x 35 x 6 mm con la superficie inferior también ópticamente plana; en un extremo tiene adherido, transversalmente al largo, una placa de acero de 0,45 mm de espesor.

Se carga pintura sobre la placa base y se apoya sobre ella la placa de vidrio transparente; esta última se desplaza hacia el extremo graduado hasta determinar qué línea de la escala visualmente desaparece (L). El poder cubriente HP en  $\text{pie}^2/\text{galón}$ , se calcula a partir de la ecuación dada por  $HP = k / L$ , donde k es una constante de la cuña. Este dispositivo está actualmente en revisión.



**Figura XIII.10. Opacidad**

Un factor importante en el aspecto decorativo de una película de pintura es el **color** y la retención del mismo durante la vida útil (envejecimiento). La determinación se puede realizar por comparación visual con una carta de colores.

Este método presenta falta de precisión por las características particulares del operador y las condiciones de iluminación y de observación.

Para obviar las causas de error se diseñaron equipos que establecen las citadas variables; se trata de dispositivos fotoeléctricos que generan parámetros representativos y reproducibles que están correlacionados directamente con el color.

El color se corresponde con un tipo de luz y tiene un efecto sobre el ojo humano; la percepción y la interpretación del color la realiza la mente humana. La curva de visibilidad para el ojo humano indica que el valor

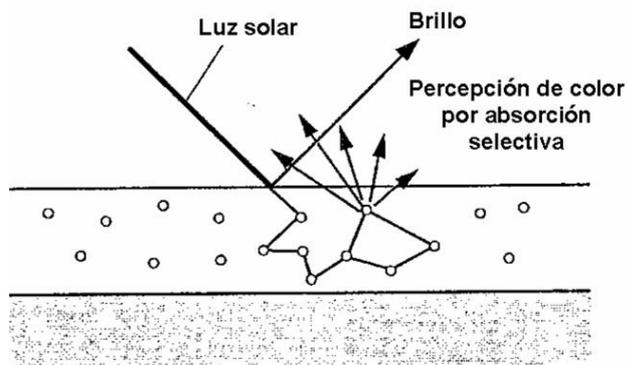
máximo se sitúa a 550 nanómetros y decrece prácticamente a 380 y 720 nanómetros.

El color es el resultado de un efecto fisiológico debido a la interacción de la luz, en el interior de la película, con sus componentes.

Resulta oportuno establecer la diferencia sustancial con el brillo; este es una impresión sensorial causada por la reflexión de la luz sobre la superficie, Figura XIII.11.

El color es un atributo de la experiencia visual; su estudio involucra propiedades físicas (se evalúan con un sistema óptico adecuado y se interpretan en una curva espectral), psicológicas (dependen del observador y por lo tanto resultan subjetivas) y psicofísicas (ubicadas entre las dos anteriores). Los atributos psicológicos se pueden describir considerando:

- La luminosidad: permite clasificar un color como equivalente a un gris que evoluciona del blanco al negro o viceversa.
- La saturación: interpreta el color de la misma luminosidad.
- El matiz o tinte: identifica el rojo/verde y el azul/amarillo.



**Figura XIII.11. Diferencia entre color y brillo**

Se conocen diferentes sistemas o espacios de color desarrollados para facilitar el estudio sobre este tema. Así, por ejemplo, el sistema CIE (Comisión Internationale de L'Eclairage) normaliza tres componentes de la experiencia visual para el estudio de la colorimetría: la fuente de iluminación, el observador y finalmente las condiciones de iluminación y

el recorrido de los rayos luminosos. La Figura XIII.12 muestra un medidor de color portátil.

En lo referente a la *fente de iluminación*, se definen tres iluminaciones tipo designadas como fuentes A, B y C, donde la fuente A representa una luz artificial, la fuente B corresponde a la luz solar del mediodía y la fuente C interpreta la luz de un día totalmente nublado.

Cada fuente tiene una determinada distribución de intensidad relativa de luz. La elección de la fuente de iluminación contempla la condición de exposición de la superficie en estudio.

Dado que la sensibilidad espectral del ojo depende del ángulo de visión y consecuentemente del tamaño del objeto, la CIE definió inicialmente un campo de medida de  $2^\circ$  y luego fue ampliado a  $10^\circ$ .

Para determinar las condiciones de iluminación y recorrido de los rayos luminosos, el ángulo de incidencia se define a  $45^\circ$  y el recorrido de los rayos reflejados como normal a la superficie de color. Generalmente, la forma de medición se indica como  $45^\circ/0^\circ$  (iluminación a  $45^\circ$ ; medición a  $0^\circ$ ).

La CIE recomienda los valores numéricos  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  como coordenadas de un espacio de color. Se obtiene así un diagrama tridimensional.



**Figura XIII.12. Medidor de color portátil**

Los valores numéricos CIELAB  $L^*$   $a^*$   $b^*$  presentan, desde el punto de vista práctico, un beneficio significativo ya que sobre el plano  $a^*$   $b^*$  se pueden representar más claramente las diferencias en el matiz y en la saturación; en ese plano surge el concepto de ángulo de tono  $h^*$  que varía entre  $0$  y  $360^\circ$ .

Las direcciones positiva y negativa de los ejes perpendiculares  $a^*$   $b^*$  describen el rango del rojo al verde y del amarillo al azul. Los cuadrantes individuales contienen los colores marrón anaranjado, verde amarillento, azul verdoso y violeta, mientras que el eje  $L^*$ , perpendicular al plano  $a^*$   $b^*$ , indica la luminosidad.

Los colores acromáticos (no saturados) blanco, gris y negro se disponen sobre el eje de luminosidad  $L^*$  ( $a^* = 0$ ;  $b^* = 0$ ). El alejamiento del eje acromático ( $a^* \neq 0$  y / o  $b^* \neq 0$ ) conduce a un aumento de la cromaticidad (saturación).

Para determinar la diferencia de color entre dos películas de pintura se utiliza el siguiente vector  $\Delta E = \Delta a + \Delta b + \Delta L$ .

El módulo de ese vector esta dado por  $\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2}$ , donde  $\Delta a$  y  $\Delta b$  representan el incremento o la disminución de los índices de cromaticidad y  $\Delta L$  la diferencia de luminosidad.

En lo referente al significado de los signos, estos indican que para  $\Delta =$  muestra – patrón el  $+\Delta L$  implica más claro; el  $-\Delta L$  más oscuro; el  $+\Delta a$  más rojo (menos verde); el  $-\Delta a$  más verde (menos rojo); el  $+\Delta b$  más amarillo (menos azul) y el  $-\Delta b$  más azul (menos amarillo).

Para establecer la diferencia de color y el criterio de tolerancia, generalmente se establece en forma inicial un patrón, luego se clasifican visualmente las muestras y finalmente, para aquéllas muestras aprobadas, se definen los límites superior e inferior para cada coordenada, es decir  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$ .

Un criterio de tolerancia aceptable consiste en que esos límites superior e inferior pueden determinarse calculando tres veces el desvío estándar.

Los aparatos disponibles determinan por lectura directa las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  y  $L^*$ ; estos deben ser previamente calibrados con patrones adecuados. El cabezal del instrumento posee lentes y espejos que dividen la luz de la fuente en 4 rayos (para mayor sensibilidad), incidiendo a  $45^\circ$  sobre la muestra y reflejando perpendicularmente, es decir a  $0^\circ$ .

La evaluación de la luz reflejada se realiza a través de filtros y fotocélulas y se manifiesta a través de las citadas coordenadas. Solo pueden compararse mediciones obtenidas bajo las mismas condiciones operativas.

En lo referente al **brillo**, este es una impresión sensorial causada por la reflexión de la luz sobre una superficie; es una propiedad

particularmente importante en pinturas de terminación para exteriores (generalmente se requieren películas brillantes para facilitar la limpieza e incrementar la intensidad de la luz reflejada) como también para interiores (usualmente se especifican productos de poco brillo o bien mates para evitar las molestias causadas por la reflexión de los rayos de luz concatenados en los ojos).

El método más frecuente para comparar el brillo de superficies pintadas es el visual, generalmente contrastado con paneles estandarizados de brillo decreciente. En todos los casos se debe tener la precaución de que el ángulo de incidencia de la luz sea similar y que ésta sea de las mismas características.

Sin embargo, si bien observaciones realizadas por una misma persona pueden conducir a conclusiones comparables aquéllas a cargo de otras o bien de la misma pero en situaciones diferentes pueden resultar muy disímiles. En consecuencia, se concluye que la apreciación del brillo de un sustrato pintado se encuentra afectada por numerosas variables.

La Norma IRAM 1109 permite determinar cualitativamente el brillo de una superficie pintada por comparación visual:

- Muy brillante: observación a  $90^\circ$ , la imagen reflejada tiene contornos nítidos.
- Brillante: observación a  $90^\circ$ , contornos difusos.
- Semibrillante: observación a  $45^\circ$ , contornos difusos.
- Mate: observación a  $45^\circ$ , sin imagen reflejada.

A pesar de definir las condiciones de la observación, persisten en general las dispersiones de opiniones de las diferentes personas. Los medidores de brillo son llamados usualmente "glossmeters" y cuantifican fotoeléctricamente la intensidad de un rayo de luz reflejado por la superficie en examen, en condiciones tales que el ángulo de medida es siempre igual al de incidencia.

Los aparatos constan de un dispositivo de medición (galvanómetro), con la fuente de energía y controles de ajuste y además, de la unidad de medida que comprende la fuente luminosa, el sistema óptico y la célula fotoeléctrica.

La selección del ángulo de incidencia depende del brillo de la superficie a medir; así por ejemplo, para pinturas la mejor correlación con la observación visual corresponde a un ángulo de incidencia y de reflexión de  $60^\circ$ . El brillo de una superficie dada, determinado con ángulos diferentes, proporciona valores distintos.

Para las películas de pinturas, los valores proporcionados con un ángulo de incidencia y de reflexión de  $60^\circ$ , se clasifican según la

siguiente escala: 0-15, mate; 16-25, semimate; 26-50, poco brillante; 51-70, brillante y 71-100, muy brillante.

Las medidas de brillo se realizan con respecto a patrones; generalmente se calibra el instrumento con un vidrio negro estándar en el extremo superior (la lectura se ajusta a 96 de la escala) y con un bloque de carbonato de magnesio en el inferior (la lectura se ajusta a 2,5). Los defectos de la película, provenientes del sustrato o de la aplicación, afectan el valor del brillo.

La **bruma o la niebla de brillo** es una forma especial del brillo especular; se desarrolló para contemplar pequeñas perturbaciones en la superficie pintada, como la generada por aglomerados o flóculos de pigmentos, de las dimensiones de la longitud de onda de la luz. Contempla un incremento del ángulo de reflexión de 0,3; 2,0 y 5,0° con respecto al incidente.

La bruma de brillo se expresa en por ciento de la relación entre el brillo determinado con el ángulo especular y aquel con el ángulo ligeramente incrementado; se debe indicar este último.

### **XIII.6 ENSAYOS DE DURABILIDAD**

Los métodos empleados se pueden clasificar en ensayos reales en servicio y acelerados de laboratorio.

Solo los primeros brindan la información adecuada pero presentan el inconveniente de su larga duración; sin embargo, usualmente debe dictaminarse sobre el comportamiento de un producto por razones técnico-económicas en un lapso relativamente breve.

Los métodos de laboratorio tratan en general de reproducir en forma acelerada las condiciones operativas en servicio.

La degradación de una película por los agentes atmosféricos resulta de la combinación de diversos factores, muchos de los cuales presentan variaciones cíclicas altamente destructivas.

Algunos ejemplos surgen al considerar la luz solar, la temperatura, la humedad relativa, la lluvia, etc. Las diferentes atmósferas (rural, urbana industrial y marina) generan condiciones de distinta agresividad.

Para determinar el efecto de la **exposición a la intemperie**, los laboratorios de control de calidad e institutos de investigación disponen generalmente de estaciones en las que las pinturas y los recubrimientos se exponen a la intemperie.

El tipo de sustrato y el esquema de pintado deben estar perfectamente definidos; en el hemisferio sur los paneles se orientan hacia el norte ya que reciben mayor radiación solar y se disponen inclinados a 45° para compensar la retención de suciedad con el lavado producido por el agua de lluvia.

Los paneles se inspeccionan regularmente, a lapsos preestablecidos con el fin de determinar las propiedades de la película y las posibles fallas. Se emplean normas y especificaciones para la interpretación cuali y/o cuantitativa de las propiedades o falla considerada.

Paralelamente, se deben registrar las condiciones ambientales (particularmente la temperatura, la humedad, el agua de lluvia y los días de sol) durante el ciclo de envejecimiento.

En lo referente a los **equipos de envejecimiento acelerado**, se pueden citar los siguientes:

- **Intemperiómetros:** Los equipos usualmente empleados son relativamente complejos; ellos generan las condiciones necesarias para producir un deterioro o cambio de propiedad en lapsos más reducidos que los involucrados en la intemperie.

Los “Weather-Ometers” o intemperiómetros reproducen las condiciones ambientales (luz, humedad y temperatura); en muchos casos se generan atmósferas similares a las del tipo industrial con el empleo de dióxido de azufre o de nitrógeno.

Las características operativas de los equipos intentan correlacionar los resultados de laboratorio con los correspondientes a la exposición en servicio.

En los equipos usualmente empleados, la fuente de energía radiante es una lámpara de xenon, ya que su espectro de luz se acerca al de la luz solar, Figura XIII.13.

La energía absorbida por los componentes orgánicos de la pintura, particularmente el material formador de película, es la responsable de la degradación, es decir la pérdida de propiedades fisicomecánicas.

Pueden funcionar en forma continua durante el lapso prefijado (generalmente 500, 1000 ó 2000 horas).

El equipo se completa con un dispositivo que pulveriza alternativamente agua destilada sobre los paneles pintados con los productos en estudio, generando un choque térmico.

La duración del ciclo secado/humidificación son generalmente programables. La temperatura se puede fijar usualmente en un rango comprendido entre 50 y 100°C.

Este ensayo, basado en la acción del agua y la luz, influye sobre las propiedades ópticas de la película.



**Figura XIII.13. Intemperiómetro (“Weather-Ometer”) con luz de xenon**

- **Cámara de UV:** Los ensayos de resistencia a la luz se llevan a cabo sobre paneles de características preestablecidas en lo relativo a su naturaleza y composición (metal, madera, hormigón, plásticos, etc.).

Los paneles pintados se ensayan a la acción de la luz ultravioleta en cámaras especiales durante un lapso determinado con el fin de comprobar en laboratorio los requisitos contemplados en normas o especificaciones, Figura XIII.14.

Generalmente se realizan determinaciones de color y brillo con respecto a muestras no expuestas; otras propiedades fisicomecánicas igualmente pueden ser evaluadas.

Por otra parte, para establecer la **resistencia a la corrosión y a la formación de ampollas** se emplean los siguientes equipos:

- **Cámara de niebla salina:** Paneles metálicos desnudos o bien protegidos con un sistema de pinturas se somete a la acción de una solución atomizada de cloruro de sodio en condiciones de concentración y temperatura definidas.

Esta cámara se emplea para el ensayo de revestimientos anticorrosivos y reproduce las condiciones de un medio marino, Figura XIII.15.

Las condiciones de funcionamiento de la cámara están precisadas en la norma ASTM D 117 (temperatura,  $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ; pH, 6,5 a 7,2 y concentración salina,  $5 \pm 1\%$  en peso).

La cantidad de condensado por unidad de superficie está también establecida; los paneles se disponen en posición vertical o inclinados con un ángulo entre  $10$  y  $30^\circ$  en relación a la vertical.

El pulverizado incide sobre un deflector de acrílico; el condensado es recirculado pero el que permaneció en contacto con la superficie en estudio se elimina por la parte inferior de la cámara.

El ensayo consiste en evaluar el grado de corrosión tanto en la totalidad del panel como el progreso de la oxidación a partir de un corte en X realizado con un instrumento cortante hasta la base (ASTM D 610).

- **Cámara de corrosión:** Otras cabinas permiten generar una atmósfera agresiva con dióxido de azufre, con el fin de simular el envejecimiento con un polulante cuya presencia es muy frecuente, en niveles variables, en el medio ambiente particularmente de las grandes ciudades, Figura XIII.16.



**Figura XIII.14. Cámara de envejecimiento por UV**



**Figura XIII.15. Cámara de Niebla Salina**

- **Cámara de Humedad y Temperatura Controladas:** Consta de un gabinete aislado térmicamente y está provista de un tanque con agua destilada la cual es calefaccionada eléctricamente. La circulación de vapor se implementa con un ventilador. Las probetas se disponen en posición vertical, Figura XIII.17.

Fundamentalmente se determina la resistencia a la formación de ampollas de las películas de pintura ya que el fenómeno osmótico (ASTM D 714) es significativo.

La temperatura de la cámara varía entre 42 y 48°C en un lapso de 30 minutos; luego desciende gradualmente hasta alcanzar el valor inferior, también en 30 minutos. En esta última etapa la humedad condensa sobre la superficie pintada. Ensayos más exigentes pueden diseñarse variando programadamente las temperaturas del ciclo y la extensión del mismo.

Otros ensayos de importancia que pueden citarse son los siguientes:

- **Resistencia a la temperatura:** La resistencia térmica de materiales, que en servicio son expuestos permanentemente en forma cíclica o bien puntualmente a elevadas temperaturas, se establece llevando los

paneles pintados en hornos en condiciones operativas definidas. Particularmente se consideran la cinética de calentamiento y la temperatura final. Luego de finalizada la experiencia, generalmente a temperatura ambiente, se consideran la adhesión y la retención de brillo y color.

Un ensayo más exigente incluye similares aspectos que los enunciados anteriormente pero la etapa de enfriamiento se puede realizar bruscamente por inmersión del panel caliente en un medio (agua, aceite, etc.) a temperatura ambiente.

**- Resistencia al agua y otros agentes químicos:** Para establecer el comportamiento de pinturas o sistemas de pinturas se preparan paneles en condiciones establecidas de preparación de superficie, número de capas, espesores parciales y totales, tiempo de secado/curado, etc.

Las probetas se sumergen en agua; soluciones salinas, ácidas o alcalinas; aceites, etc., a la temperatura y durante el lapso convenidos. El juzgamiento del ensayo se lleva a cabo considerando las modificaciones de color y brillo, la formación de ampollas y cualquier otro tipo de falla de la película.



**Figura XIII.16. Cámara de ensayo de corrosión con atmósfera de dióxido de azufre**



**Figura XIII.17. Cámara de Humedad y Temperatura Controladas**

- **Propiedades fisicomecánicas de la película:** Se contemplan entre otras la resistencia a la abrasión, la dureza, la flexibilidad, la adhesión y el comportamiento frente a un impacto. En general se emplean equipos y / o instrumentos normalizados con el fin de obtener resultados que permitan establecer comportamientos relativos.

Los métodos para establecer la **resistencia a la abrasión** son diversos; en líneas generales resulta posible clasificarlos en aquellos que se sustentan en el desgaste producido por la caída de arena u otro material abrasivo sobre la película de pintura o bien por el efecto de rotación de ruedas o papeles abrasivos.

El *chorro de arena* es un método que responde a este tipo de desgaste; está normalizado en ASTM D 968 (Gardner Sand Abrasion Test).

La arena de granulometría definida se dispone en un embudo cónico ubicada en la parte superior del equipo, Figura XIII.18.

La probeta con la muestra en estudio se coloca con una inclinación de 45°; la arena por acción gravitatoria impacta sobre la superficie pintada. Se determina la cantidad de arena conducente a lograr el desgaste de la película de espesor definido.

Para realizar *desgaste por rotación*, un dispositivo que responde a este principio de funcionamiento es el Taber Abraser; está constituido por un juego de discos abrasivos que se disponen sobre la probeta.

Estos discos soportan pesas que pueden ser seleccionadas en función de la resistencia de la película con el fin de alcanzar un número de ciclos razonable que conduzca al desgaste de la película de espesor conocido.

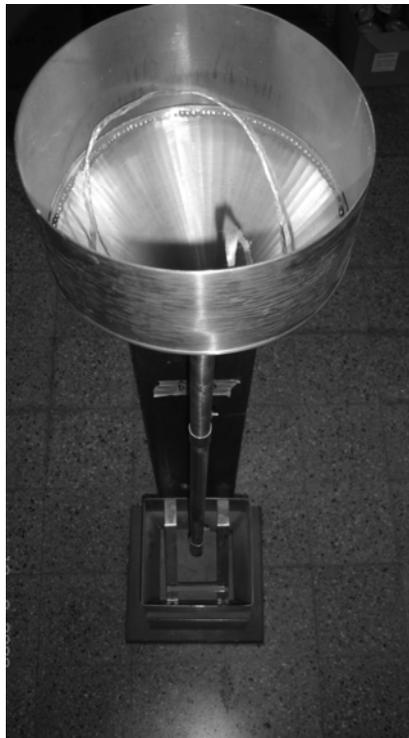
El tipo de disco también puede ser seleccionado en función de las características del material a ensayar.

El movimiento rotativo es realizado por la base a la cual se sujeta el panel con la muestra en estudio, Figura XIII.19 y Figura XIII.20.

El resultado se indica en función de la pérdida de masa o disminución de espesor de la película para el tipo de disco, carga y ciclos establecidos.

Para realizar un ensayo de *desgaste por fricción*) se utiliza un cepillo que permite evaluar la lavabilidad y resistencia a la abrasión de la película, Figura XIII.21; dispone de un contador de ciclos y se determina el número hasta lograr el desgaste de la película. El ensayo puede realizarse empleando agua destilada, detergentes o sustancias abrasivas.

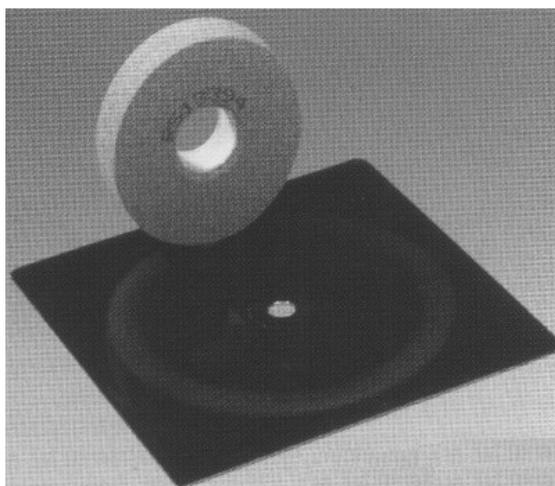
También se disponen de equipos que permiten evaluar en forma comparativa la resistencia al rayado (“Scratch test”) de películas de pintura, Figura XIII.22.



**Figura XIII.18. Resistencia al desgaste por chorro de sílice**



**Figura XIII.19. Resistencia a la abrasión;  
desgaste por rotación**



**Figura XIII.20. Resistencia a la abrasión;  
desgaste por rotación**

La determinación de la **dureza** de la película por rascado generalmente involucra la acción de una aguja que se dispone sobre la probeta en estudio; esta última se sujeta a una plataforma que se desplaza en una dirección dada, en ambos sentidos de desplazamiento, Figura XIII.23.

El resultado se expresa en función del número de ciclos de avance y retroceso, para una carga dada dispuesta sobre la aguja, que conduzca al contacto con el sustrato o soporte de la película ensayada.



**Figura XIII.21. Resistencia a la abrasión; desgaste por fricción**



**Figura XIII.22. Medidor de resistencia al rayado ("Scracht test")**

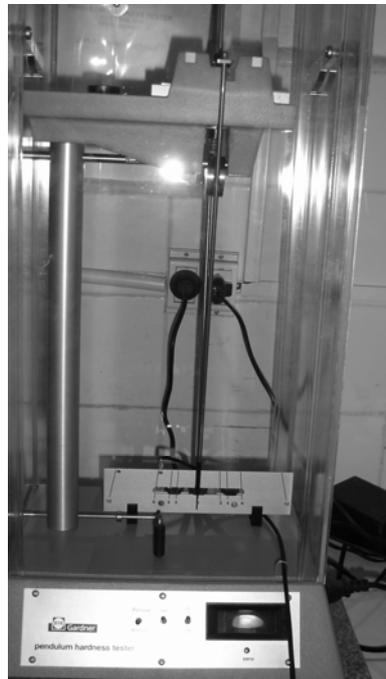
El método de evaluación de la dureza por indentación cuantifica la carga requerida para producir la penetración de una esfera o semiesfera o bien determina la deformación producida por una carga preestablecida. Esta técnica es una adecuación del medidor de Brinell empleado para otros materiales.

El ensayo de **flexibilidad** o determinación de las características elásticas de una película de pintura generalmente involucra el doblado

de un panel pintado. El doblado puede realizarse sobre una barra cilíndrica o bien sobre un mandril cónico. Se especifica la naturaleza del sustrato y la preparación de la superficie; igualmente se define el espesor de la película seca ensayada, Figura XIII.24.

En el caso de la barra cilíndrica, el diámetro varía en función de las características deseables del material ensayado: valores más pequeños resultan más exigentes (menor radio de curvatura) para el doblado a 180° realizado en forma instantánea.

Definidas las condiciones del ensayo, las propiedades elásticas son aceptables cuando no se detecta cuarteado de la película ni tampoco desprendimientos de esta última desde el panel de base.



**Figura XIII.23. Durómetro de péndulo**

Por su parte, el mandril cónico tiene la ventaja de presentar un diámetro de doblado creciente. El sustrato pintado en condiciones preestablecidas se dispone en el aparato entre dos hojas de papel entalcadas para proteger la película; el doblado se realiza también a 180° en un lapso de 15 segundos. Se determina el punto final del cuarteado medido desde el extremo del cono; lectura y el empleo de las

tablas correspondientes permiten estimar la elongación porcentual máxima.

Un método muy empleado para optimizar formulaciones experimentales consiste en traccionar películas libres de pintura (geometría y espesor especificados), desde los extremos de la probeta mediante mordazas adecuadas y con cargas crecientes

Se grafica la tensión (carga por unidad de área de corte) versus la deformación específica en la zona de comportamiento elástico. Se calcula el módulo de elasticidad o de Young.

La **adhesión** de la película de pintura es un fenómeno de naturaleza física y química; las fuerzas de adhesión propiamente dichas se manifiestan generalmente en la interfase sustrato/película mientras que las de adhesión interna (cohesión) tienen lugar en el seno de la propia película.

El grado de limpieza del sustrato, la rugosidad superficial y el método de aplicación por un lado y las variables de formulación/elaboración de la pintura por el otro inciden sobre la tensión de adhesión. La adhesión en húmedo resulta en general inferior o sensiblemente inferior a la tensión en seco.

La evaluación de la tensión de adhesión involucra técnicas generalmente distintivas. Los ensayos son solo indicativos del comportamiento en servicio; resultan particularmente valiosos en los estudios comparativos.



**Figura XIII. 24. Dispositivo para determinar la flexibilidad de películas**

La norma IRAM 1109 (Método B-VI) establece la técnica medición por corte, Figura XIII.25; esta consiste en aplicar la muestra sobre un sustrato, en un espesor preestablecido, y dejarla secar/curar adecuadamente.

Se emplea un elemento cortante normalizado; se realizan cortes perpendiculares hasta el sustrato de manera de obtener cuadrados de 1, 2 ó 3 mm de lado según el espesor de la película.

Se desplaza un cepillo sobre el área descrita y se determina el porcentaje de cuadrados que permanecen adheridos.

Ese porcentaje tiene correspondencia con una escala que varía de 2 a 10 con intervalo de 2 unidades. El valor mínimo indica al menos un deterioro del 65% de la superficie mientras que el 10 implica 0% de desprendimiento.



**Figura XIII.25. Dispositivo para determinar Adhesión de película por corte**

El ensayo de adhesión por tracción consiste en adherir adecuadamente un dispositivo de área circular sobre la superficie pintada, Figura XIII.26.

Se determina la fuerza ejercida en un tiempo dado, por unidad de área para producir el valor de rotura, Figura XIII.27. El Elcometer Tester Modelo 106 constituye otro claro ejemplo para determinar la adhesión por tracción, Figura XIII.28.

Se debe observar el tipo de fractura (adhesión propiamente dicha, cohesiva o mixta) para precisar las variables determinantes que influyen sobre el resultado obtenido.



**Figura XIII.26. Panel pintado con dispositivos para ensayo de adhesión por tracción**

En lo referente **a la resistencia al impacto**, los métodos usualmente empleados intentan reproducir las exigencias a que están sometidas las películas de pintura en servicio, particularmente a la acción de golpes por elementos contundentes.

La adhesión de la película al sustrato y su capacidad de absorción de un impacto por deformación elástica resultan las variables fundamentales que determinan la resistencia al impacto.

Los ensayos más frecuentes para cuantificar esta propiedad contemplan la acción producida por la caída de una pieza metálica de forma y masa establecidas sobre un sustrato pintado.

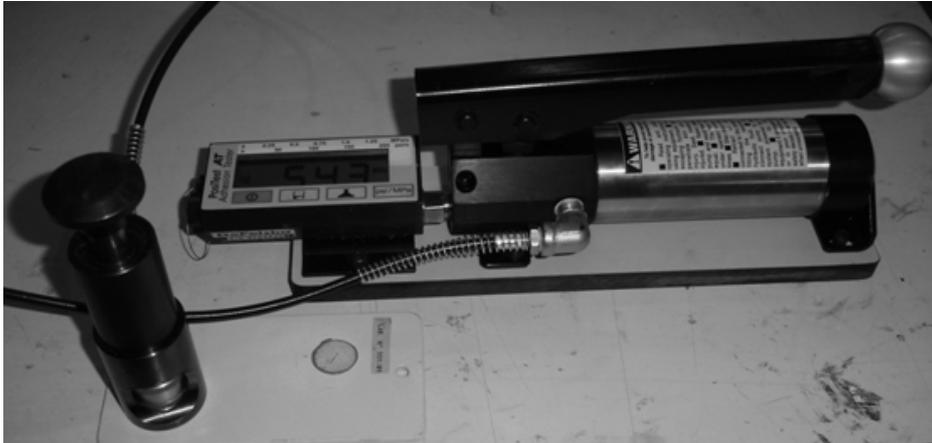
En todos los casos se considera un resultado satisfactorio cuando la película se deforma acompañando el sustrato sin la presencia de grietas y desprendimientos.

Entre los dispositivos más usados se encuentra el *impactor Hart*, este consiste en un martillo de 500 g dispuesto en el extremo de un brazo de 300 mm de longitud.

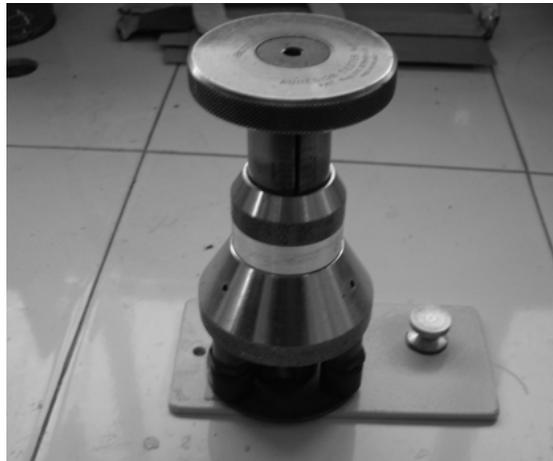
El panel pintado se ubica en posición horizontal y el martillo se desplaza desde un plano vertical impactando sobre la superficie en estudio.

El ensayo se puede realizar sobre ambas caras del panel experimental.

Otro dispositivo ampliamente empleado se conoce como embutido *Erichsen*; se ejerce una presión con una esfera normalizada en el reverso del panel pintado. Se observa mediante una lupa la presencia de grietas y / o desprendimiento de la película.



**Figura XIII.27. Medidor de adhesión de película por tracción**



**Figura XIII.28. Medidor de adhesión  
Elcometer Tester Modelo 106**

- **Resistencia a la acción del fuego:** también resultan de gran significación. Las películas de pinturas pueden favorecer la propagación superficial del frente de llama, no alterar la velocidad que exhibe el material de base desnudo o bien controlar dicha cinética hasta transformar el sustrato pintado en un material autoextinguible.

Se desarrollaron muchos ensayos normalizados que determinan diversas propiedades de la película para intentar correlacionar el comportamiento en servicio cuando el sustrato pintado está expuesto a la acción del fuego o del calor.

Estos ensayos defieren generalmente en el tamaño y forma de la probeta, en la cantidad de energía incidente, etc. Los resultados de los diferentes ensayos no se correlacionan entre sí.

Entre los ensayos usualmente especificados figura el índice *LOI* (Limiting Oxygen Index) por su simpleza y elevada reproducibilidad de resultados (ASTM D 2863). La probeta se dispone en un tubo con un flujo de oxígeno y nitrógeno en diferentes niveles porcentuales, Figura XIII.29.

Se determina el valor más bajo porcentual de oxígeno en la mezcla que conduce a una débil llama luego de retirada la fuente de energía externa. Valores de índice *LOI* superiores a 28% usualmente permiten clasificar como autoextinguibles a las probetas estudiadas.

Otro dispositivo muy difundido es el *Túnel Inclinado* (ASTM D 3806), Figura XIII.30; una llama normalizada de un mechero incide sobre la cara inferior de la probeta dispuesta en un plano ubicado en un ángulo de 30° con respecto a la horizontal.

Se evalúa el recorrido del frente de llama a lo largo de la probeta cada 15 seg durante 4 minutos, tiempo después del cual el equipo se apaga automáticamente. Se promedian los tres avances de llama más elevados y se lo refiere con respecto al panel desnudo o algún otro definido como referencia.

Paralelamente se determinan la pérdida de masa, el tiempo de llama y el de incandescencia luego de finalizado el ensayo; también permite determinar la temperatura de la contracara del panel durante el ensayo mediante una termocupla con el fin de evaluar la conductividad térmica del panel pintado y relacionarlo con el comportamiento del sustrato sin tratamiento.

El equipo posee un medidor de la evolución de la densidad de humos generados durante el ensayo, la cual se registra en función del tiempo.

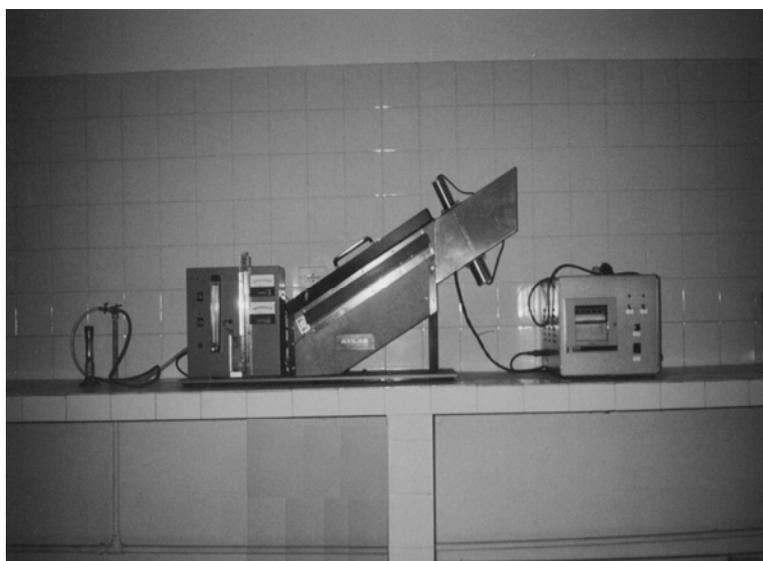
Otras determinaciones sobre sustratos combustibles, tratados o no con materiales ignífugos, son los análisis térmicos (TGA, Thermo Gravimetric Analysis y DTA, Differential Thermal Analysis).

Estos ensayos son de real significación para seleccionar los diferentes componentes de una formulación en forma individual y luego ya sobre

el producto final para optimizar los niveles porcentuales óptimos de cada uno de ellos ya que resultan frecuentes los fenómenos sinérgicos.



**Figura XIII.29. Equipo para determinar el Índice de Oxígeno Límite**



**Figura XIII.30. Túnel Inclinado**