

Contenido de Líquidos Penetrantes

NDTPEDIA

Elaborado por: Ing. Diego Enrique Gamarra Azacon
Primera Edición. Enero 2023



INDICE

Capítulo 1: Introducción a los Líquidos Penetrantes	5
1. Definiciones y conceptos de Líquidos Penetrantes	5
2. ¿Por qué utilizar Líquidos Penetrantes?	7
3. Ventajas y Limitaciones	7
4. Tipos de Líquidos Penetrantes y Clasificación	8
5. Proceso de Líquidos Penetrantes	11
Capítulo 2: Parámetros Físicoquímicos en Líquidos Penetrantes	15
1. Tensión Superficial	15
2. Fenómeno de Capilaridad	17
3. Mojabilidad o Humectabilidad	18
4. Angulo de Contacto	19
4.1 Parámetros que influyen en el ángulo de contacto	21
5. Viscosidad	22
6. Penetrabilidad	24
7. Punto de Incendio	26
8. Actividad Química	27
Capítulo 3: Líquidos Penetrantes	29
1. Propiedades de los Líquidos Penetrantes	29
2. Penetrantes Base Oleosa y No Oleosa	29
3. Penetrantes Visible	30
3.1 Pigmentación y Beer-Lambert en los Penetrantes Visible	31
4. Penetrantes Fluorescentes	34
5. Aplicación del Penetrante	37
5.1 Aplicación por Inmersión	37
5.2 Aplicación por Brocha	38
5.3 Aplicación por Pulverizado/Rociado (Spray)	38
5.4 Aplicación por vaciado	38
6. Tiempo de Penetración	39



7. Métodos de Remoción del Penetrante	39
Capítulo 5: Emulsificadores	41
1. Emulsión.....	41
2. Surfactante	42
3. Emulsificación y HLB	43
4. Surfactantes en Líquidos Penetrantes	44
4. Emulsificación en Líquidos Penetrantes Postemulsificables Lipofílicos.....	46
4.1 Tipos de Emulsificadores Lipofílicos	49
4.2 Características generales de los emulsificadores lipofílicos	49
5. Emulsificación en Líquidos Penetrantes Postemulsificables Hidrofílicos.....	50
5.1 Forma de Aplicación del Emulsificador Hidrofílico.....	52
5.1.1 Inmersión del Emulsificador Hidrofílico	52
5.1.2 Aplicación por Spray del Emulsificador Hidrofílico	53
5.2 Tiempo de Aplicación del Emulsificador Hidrofílico	53
5.3 Características generales de los emulsificadores hidrofílicos.....	54
5.4 Concentración del Emulsificador Hidrofílico	54
5.4.1 Verificación de la Concentración.....	55
Capítulo 6: Reveladores.....	57
1. Propiedades de los Reveladores.....	57
2. Formas de Aplicación.....	57
3. Formas de Acción de los Reveladores	60
3.1 Absorción y Adsorción.....	60
3.2 Capilaridad.....	61
3.3 Dispersión de Luz.....	62
3.4 Acción Solvente	63
4. Revelador Seco – Forma a	63
5. Revelador Húmedo Acuoso – Forma b y c	65
5.1 Soluble en Agua – Forma b	65
5.2 Suspendible en Agua – Forma c.....	66
6. Revelador Húmedo No Acuoso – Forma d.....	66
Capítulo 7: Procesos de Líquidos Penetrantes.....	68



1. Proceso Lavable con Agua.....	69
2. Proceso Penetrante Lipofílico.....	70
3. Proceso Penetrante Hidrofílico.....	71
4. Proceso Penetrante Removible con Solvente.....	72
4.1 Procedimiento para remover el penetrante de una superficie con solvente.....	72

Capítulo 1: Introducción a los Líquidos Penetrantes

1. Definiciones y conceptos de Líquidos Penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es un método de inspección no destructiva diseñado para la detección de aquellas discontinuidades abiertas a la superficie en materiales no porosos.

Este método es del tipo fisicoquímico debido a que se basa en la interacción entre un componente químico conocido como líquido penetrante y la superficie de la pieza.

Hay un rango amplio de aplicaciones y esto lo podemos ver en función de los materiales que se pueden inspeccionar con líquidos penetrantes, algunos de ellos son: materiales metálicos ferrosos y no ferrosos (aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio, Inconel, aceros para alta resistencia, bronce, etc.) así como también materiales no metálicos (vidrios, cerámicos y plásticos).

Entonces como tal el propósito del método es detectar grietas, poros, traslapes, costuras y otras discontinuidades superficiales de una manera rápida. La detección de estas discontinuidades generará la ubicación y tamaño aproximado de la discontinuidad y dará una evidencia visual de las indicaciones en el componente.

Ahora bien, la interacción entre el líquido y la superficie que permite la detección ocurre debido a que el líquido penetrante ingresa en dichas discontinuidades y las colorea, tal y como apreciamos en la siguiente figura.



Figura 1.1 Breda con grietas evidenciadas con líquidos penetrantes.

Como vemos en la figura anterior el método de líquidos penetrantes generara una evidencia física para la evaluación del componente. Podríamos pensar que el método de líquidos

penetrantes le facilita al inspector la realización de una inspección visual porque a fin de cuentas el técnico deberá realizar una inspección visual del tinte generado.

De forma general podemos sintetizar el método de líquidos penetrantes en 6 pasos básicos, los cuales son:

1. **Limpieza Inicial del componente:** Esta etapa es fundamental para permitirle al líquido penetrante acceder a las discontinuidades ya que pueden verse obstruidas por cualquier componente presente en la superficie como: óxido, grasa, pinturas, etc.
2. **Aplicación del Penetrante:** El penetrante se aplica sobre la superficie de la pieza evaluada en la zona de interés. Se requerirá un tiempo de aplicación para permitirle al líquido ingresar en la discontinuidad.
3. **Remoción del Exceso del Penetrante:** Luego del debido tiempo de penetración se procede a remover el exceso de penetrante en la superficie, se debe realizar de manera cuidadosa debido que solamente se debe retirar el exceso y no el líquido dentro de las discontinuidades.
4. **Aplicación del Revelador:** La aplicación del revelador extraerá el líquido penetrante atrapado en las discontinuidades además de brindar contraste para una adecuada inspección.
5. **Inspección de la Pieza:** Se procede a inspeccionar la pieza e interpretar las indicaciones encontradas.
6. **Limpieza Final:** La última etapa del proceso de inspección es la limpieza final del componente para remover cualquier resto de la inspección. Una indebida limpieza puede generar problemas en servicio o inclusive ser causa de corrosión.

2. ¿Por qué utilizar Líquidos Penetrantes?

Los líquidos penetrantes son un método sumamente versátil con respecto al rango de aplicaciones y la facilidad que ofrecen en su uso. Es por ello que este método es usualmente la primera opción de muchas gerencias para abarcar la inspección no destructiva (aunque muchas veces no es la mejor opción).

Pueden existir diversos motivos por los cuales escoger el método de líquidos, pero podemos hablar de dos motivos que se diferencian del resto debido a que normalmente son determinantes para la gerencia que toma la decisión.

1. Requiere de gastos mínimos para la implementación del método.
2. Puede implementarse a múltiples tipos de objetos, materiales, formas, tamaños y ubicaciones.

Básicamente podemos decir que el método de líquidos penetrantes es uno sumamente amplio con respecto a las aplicaciones, pero el punto beneficioso es que además el costo de implementación es sumamente bajo, al menos que estemos hablando de sistemas automatizados.

Ahora bien, es sumamente importante mencionar que por el hecho de que sea un método barato y de fácil implementación no significa que lo debamos utilizar de manera indiscriminada ya que muchas veces no será el método correcto, no generara los resultados deseados e inclusive puede que no consideremos la habilidad de los técnicos por el hecho de ser algo barato y caigamos en errores de ejecución.

Ciertamente el método de líquidos penetrantes trae muchas ventajas, pero utilizar este método por los motivos erróneos hace que el método pierda validez.

Entonces podemos decir que por qué utilizar líquidos penetrantes puede ir en gran medida por las consideraciones de costo y facilidad de implementación, pero eso tiene que ir de la mano con los requerimientos mínimos para poder ejecutar el método y la calificación del personal.

3. Ventajas y Limitaciones

Ventajas

- ✓ El método tiene la capacidad de inspeccionar grandes áreas de una manera muy rápida y eficiente. Independientemente de la complejidad geométrica de la superficie a inspeccionar.
- ✓ Puede detectar discontinuidades pequeñas.
- ✓ Los resultados proveen de información acerca de la ubicación, orientación y longitud aproximada.



- ✓ Se puede implementar en una gran variedad de materiales. Como ferrosos, no ferrosos, cerámicos, plásticos, entre otros.
- ✓ No requiere de suministro eléctrico.
- ✓ El proceso de inspección es relativamente sencillo.

Limitaciones

- ✓ Solamente pueden ser detectadas aquellas discontinuidades que sean abiertas a la superficie.
- ✓ La superficie y las discontinuidades a encontrar deben limpiarse para eliminar cualquier contaminante que pueda interferir en el ingreso del líquido en la discontinuidad.
- ✓ La inspección de superficies rugosas se ve dificultada.
- ✓ No aplica para materiales porosos debido que el líquido ingresara en el material propiamente y no en las discontinuidades.
- ✓ No se puede determinar la profundidad a la que se encuentran las discontinuidades.
- ✓ Los penetrantes son componentes derivados del petróleo y por lo tanto hay que evaluar la compatibilidad con el material inspeccionado.

4. Tipos de Líquidos Penetrantes y Clasificación

Existen diversos tipos de líquidos penetrantes que podemos agrupar por clasificaciones dependiendo de la normativa.

Pero empecemos hablando de forma general los tipos de penetrantes que existen en función de su color:

1. **Líquidos Penetrantes Visibles:** Este tipo de líquidos utiliza un pigmento coloreado (normalmente rojo) para generar las indicaciones de la evaluación. Esta técnica de inspección utiliza luz blanca y un revelador que genera un fondo blanco y la evaluación se realiza a partir de la diferencia de contraste entre el fondo blanco y el pigmento rojo presente en el líquido.
2. **Líquidos Penetrantes Fluorescentes:** Esta técnica utiliza un pigmento fluorescente que se evalúa bajo luz ultravioleta para poder distinguir los pigmentos fluorescentes del fondo.
3. **Líquidos Penetrantes Duales:** Este tipo de líquidos presentan ambas características. Se pueden evaluar bajo luz blanca como un penetrante visible y se pueden evaluar bajo luz ultravioleta como los penetrantes fluorescentes.



Ahora bien, estos tipos de penetrantes no es todo lo que tenemos que saber para poder clasificar los tipos de penetrantes. Otra cosa que es sumamente importante son los tipos de remoción de exceso de penetrante, sensibilidad, forma de aplicación del revelador y clases de removedores.

Si nos basamos en la norma MIL-I-25135 en su última revisión E podemos clasificar los líquidos penetrantes tal y como se aprecia en la siguiente tabla:

Designación	Familias		
	Penetrante	Removedor	Revelador
Grupo I	Removible con Solvente y Visible	Solvente	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo II	Postemulsificable y Visible	Emulsificable	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo III	Lavable con Agua y Visible	Ninguno	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo IV	Lavable con Agua y Fluorescente	Ninguno	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo V	Sensibilidad Media postemulsificable	Emulsificable	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo VI	Sensibilidad alta postemulsificable fluorescente	Emulsificable	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo VI A	Sensibilidad alta, postemulsificable, fluorescente	Hidrofílico	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo VI B	Ultra alta sensibilidad postemulsificable	Hidrofílico	Seco, Húmedo o No acuoso (húmedo).
Grupo VII	Alta sensibilidad, removible con solvente y fluorescente.	Removible con Solvente	No acuoso (húmedo).

Como podemos apreciar la norma MIL-I-25135E divide los materiales a utilizar en líquido penetrantes en tres familias (Penetrante, Removedor y Revelador). Además de dividirlos por grupos dependientes de la sensibilidad en la inspección.

Ahora bien, este concepto de la MIL-I-25135E es una designación obsoleta y que se encuentra en desuso por parte de los fabricantes de estos materiales, pero aun así lo mostramos en este manual básicamente por dos motivos:

- 1) Es bueno entender de donde nacen las designaciones.
- 2) En muchos procedimientos de diversas empresas se sigue utilizando la designación presentada en MIL-I-25135E a pesar de esta desfasada.

Hoy en día se trabaja con el documento AMS-2644 y básicamente el motivo por el cual no seguimos utilizando la nomenclatura antigua es por el hecho de que el concepto de familias no es un concepto adecuado para clasificar los líquidos penetrantes.

Se deben clasificar por Sistemas. Un sistema básicamente sería un penetrante y emulsificador/removedor correspondiente.

Los fabricantes hoy en día formulan los líquidos para ser utilizados como un sistema, de forma conjunta y por lo tanto no es correcto utilizar un penetrante de una marca con un revelador de otra ya que no tendrá los resultados esperados.

Por lo tanto, nace la clasificación por sistemas.

Según la AMS-2644 podemos establecer las siguientes clasificaciones.

Tipos de Penetrantes	
Tipo I	Penetrante fluorescente
Tipo II	Penetrante visible (color rojo)
Tipo III	Penetrante fluorescente y visible (dual)

En esta tabla podemos ver los distintos tipos de penetrantes en función de la pigmentación que poseen y por lo tanto la forma en que será evaluado.

Métodos de Remoción	
Método A	Lavables con agua
Método B	Postemulsificable Lipofílico
Método C	Removible con solvente
Método D	Postemulsificables Hidrofílico

En esta tabla podemos apreciar los distintos métodos de remoción que tenemos disponibles para eliminar el exceso de penetrante en nuestro procedimiento de inspección. Cada método de remoción brindara ventajas y limitaciones al método.

Sensibilidades	
Nivel de sensibilidad ½	Ultra baja sensibilidad



Nivel de sensibilidad 1	Baja Sensibilidad
Nivel de sensibilidad 2	Sensibilidad Media
Nivel de sensibilidad 3	Sensibilidad Alta
Nivel de sensibilidad 4	Ultra alta Sensibilidad

La sensibilidad la podemos definir como la capacidad que tiene un sistema de determinar discontinuidades pequeñas. Ahora bien, la sensibilidad se puede designar a un sistema de forma global ya que la sensibilidad variara en función de la selección el tipo de penetrante, método de remoción, forma de aplicación del revelador, entre otros factores. Ciertamente se le puede asignar un valor de sensibilidad, pero siempre y cuando esa asignación sea al sistema.

De manera puntual podemos mencionar que los líquidos fluorescentes tendrán una mayor sensibilidad que los visibles.

Si queremos hablar acerca del impacto de la remoción podemos decir que los postemulsificables aportaran la mayor sensibilidad, seguidos de los removibles por solvente y por último los lavables con agua.

Forma de Aplicación del Revelador	
Forma a	Polvo seco
Forma b	Revelador soluble en agua
Forma c	Revelador en suspensión acuosa
Forma d	Revelador no acuoso
Forma e	Revelador de aplicación específica

La forma de aplicación del revelador es sumamente importante ya que también tendrá un impacto directo en los resultados de inspección.

Clase de Solvente - Limpiadores/Removedores	
Clase 1	Removedor de Solvente Halogenado (No es Inflamable)
Clase 2	Removedor de Solvente No Halogenado (Inflamable)
Clase 3	Removedor de Solvente de Aplicación Especifica

La selección de la clase del solvente es sumamente importante ya que puede afectar la pieza evaluada. Si pensamos en aceros inoxidables austeníticos o aleaciones de níquel la presencia de sulfatos o haluros puede afectar negativamente al material debido a procesos corrosivos.

5. Proceso de Líquidos Penetrantes

Como ya menciono anteriormente el proceso de líquidos penetrantes tiene 6 etapas claves que siempre estarán presentes, pero como observamos en la sección de clasificación existen distintos tipos de líquidos que requerirán de pasos adicionales. La idea de esta sección es mostrar todas las posibles etapas del proceso de líquidos penetrantes.

Aquí mostraremos a groso modo todas las etapas que luego serán explicadas de manera detallada a lo largo del manual.

1. Limpieza Inicial del componente. Sabemos que esta etapa es crucial. De manera general podemos hablar de tres métodos de limpieza:

- a. Limpieza por medios Mecánicos
- b. Limpieza Química
- c. Limpieza con Solventes

2. Aplicación del Penetrante.

- La **forma** en cómo se aplique el penetrante en el material evaluado repercutirá en los resultados de la inspección. Podemos hablar de las siguientes formas de aplicación:
 - a) Inmersión.
 - b) Rociado.
 - c) Brocha.
 - d) Vaciado.
- El **tiempo de penetración** es un factor determinante en la técnica ya que si el tiempo de penetración del líquido no es suficiente no se generarán resultados satisfactorios. Si queremos definir el tiempo de penetración podemos decir que es el tiempo que transcurre desde la aplicación hasta que el exceso deba ser removido.

3. Remoción del Exceso del Penetrante. La remoción del exceso del penetrante se podría pensar que es la etapa que requiere de mayor cuidado ya que una correcta



remoción determinara la efectividad de la prueba. Ahora bien, el método de remoción dependerá del líquido penetrante aplicado.

- **Lavable con Agua (Método A. Tipos I y II):** Este tipo de remoción básicamente es la remoción con agua luego de que transcurre el tiempo de penetración. Más adelante en el manual se detallarán las especificaciones puntuales para esta remoción.
 - **Penetrante Postemulsificable (Método B y D. Tipos I y II):** Este tipo de remoción requiere de la aplicación de un emulsificador que emulsificará el exceso de penetrante para que pueda ser removido con agua. Hay dos tipos de procesos Hidrofílico y Lipofílico, cada uno tendrá sus procesos, pero ambos requieren de la aplicación del emulsificante, del tiempo de emulsificación y por último la remoción del exceso. Más adelante en el manual se detallarán las especificaciones puntuales para estos tipos de remoción.
 - **Penetrante Removible con Solvente (Método C. Tipo I y II):** Este proceso de remoción se ejecuta con un solvente que podrá remover el exceso de penetrante, no se realiza con agua. Más adelante en el manual se detallarán las especificaciones puntuales para esta remoción.
4. **Secado:** Esta etapa no es un paso que siempre se debe llevar a cabo ya que dependerá del tipo de revelador a implementar. Pero en caso de que se requiera el secado es clave para una correcta aplicación del revelador y subsecuente obtención de resultados. El tiempo del secado variara dependiendo de las dimensiones de la pieza inspeccionada.
5. **Aplicación del Revelador:** Sabemos que existen 5 forma de revelador. Cada una de estas formas tendrá sus ventajas y desventajas para la inspección. Estas son:
- a. Revelador en Polvo.
 - b. Revelador Soluble en Agua
 - c. Revelador en Suspensión Acuosa
 - d. Revelador No Acuoso.
 - e. Revelador de Aplicación Especifica.
6. **Tiempo de Revelado:** El tiempo de revelado es el tiempo en el que el líquido penetrante atrapado en las discontinuidades es extraído por el revelador. Este tiempo variara dependiendo de la técnica y el procedimiento. En líneas generales no debe ser menor de 10 minutos ni mayor de 2 horas.



7. **Inspección de la Pieza:** Esta etapa inicia luego que el tiempo de revelado culmina, aunque la evaluación como tal puede iniciar durante la extracción. Dependiendo si el líquido penetrante es visible o fluorescente ciertas condiciones con respecto a la iluminación deberán seguirse.

8. **Limpieza Final:** La última etapa del proceso de inspección es la limpieza final del componente para remover cualquier resto de la inspección. Una indebida limpieza puede generar problemas en servicio o inclusive ser causa de corrosión.

Capítulo 2: Parámetros Fisicoquímicos en Líquidos Penetrantes

Como ya hemos visto existen diversos componentes claves para la ejecución del método de líquidos penetrantes, entre ellos:

- Penetrante
- Revelador
- Emulsificador
- Solvente

Cada uno de los materiales mencionados tiene que cumplir ciertas características para poder brindar buenos resultados en la ejecución del método.

Pero para poder hablar de las características que deben cumplir cada uno de estos componentes tenemos que hablar de ciertos parámetros fisicoquímicos que son fundamentales de conocer para poder entender la ciencia del método de líquidos penetrantes.

1. Tensión Superficial

Desde un punto de vista físico la tensión superficial es la cantidad de energía que requiere un líquido para aumentar su superficie. Esto traducido a una forma más coloquial lo podríamos decir como es la cantidad de energía que requiere una superficie líquida para romperse. Y podemos asociarlo con el ejemplo clásico de tensión superficial, muchos insectos son capaces de desplazarse a través de la superficie del agua sin hundirse debido a que no tienen suficiente peso como para romper esa tensión superficial, tal y como se ve en la siguiente figura.



Figura 2.1.1

Ahora bien, esa tensión superficial es producida por el contacto entre las moléculas del líquido que producen una fuerza de cohesión entre sí promoviendo esa tensión superficial.

Más adelante veremos que el agua es uno de los grandes contaminantes en el método de líquidos penetrantes a pesar de que se utiliza como removedor. Y el motivo por el cual el agua es un contaminante es debido a que su tensión superficial es bastante alta lo cual produce que remover el agua de las discontinuidades no sea tarea fácil y por lo tanto previene la penetración del líquido penetrante generando una mala inspección.

Por otra parte, la importancia de la tensión superficial es que el fenómeno de capilaridad depende de la tensión superficial. Más adelante explicaremos la capilaridad, pero para entender el impacto vamos a ver la siguiente figura.

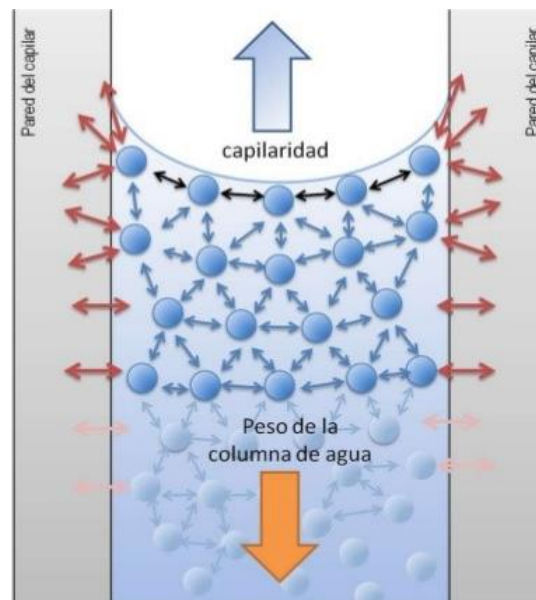


Figura 2.1.2

En la figura anterior podemos ver la tensión superficial representada por las líneas de unión de color negras. Además, apreciamos las fuerzas de cohesión mencionada anteriormente que básicamente es producto de las relaciones intermoleculares del líquido representadas por las líneas azules. Y por último vemos otra fuerza que es representada por las líneas rojas que básicamente son las fuerzas de adhesión entre el líquido y el sólido que está representado por las paredes de este orificio.

Ahora bien, dependiendo de la tensión superficial que básicamente sería hablar de los valores de la cohesión y de la adherencia el fluido tendrá dos posibilidades:

1. Mojar la superficie.
2. No mojar la superficie.



Figura 2.1.3

Tal y como apreciamos en la figura anterior tenemos dos casos, en el primero vemos que el resultado de los esfuerzos genera que el extremo que está en contacto con la pared vaya hacia abajo y en el segundo caso el líquido sube levemente. En el segundo caso lo que ocurre es que la fuerza de adhesión es mayor que la fuerza de cohesión y lo que está haciendo es mojar la superficie.

Claramente vemos que la tensión superficial es un factor clave en evaluar si el fenómeno de capilaridad.

2. Fenómeno de Capilaridad

El fenómeno de capilaridad es uno que ocurre de manera natural y básicamente lo que provoca es la ascensión de un líquido dentro de un tubo capilar (un tubo estrecho) que para nosotros de manera conveniente lo podemos llamar discontinuidad.

Ahora bien, este fenómeno ocurre debido a que el líquido se adhiere a las paredes del tubo capilar y asciende dentro del tubo. Esto es producto de la tensión superficial que permite que el líquido ascienda levemente y luego la adhesión genera la ascensión.

Este fenómeno de ascensión ocurre hasta que el peso de la columna de agua se equilibre con la fuerza vertical generada por la tensión superficial y la adhesión. Este fenómeno se aprecia la claramente en la figura 2.1.2.

El fenómeno de capilaridad es dependiente del fluido, básicamente la curvatura que se genera producto de la tensión superficial generara ese fenómeno. En la siguiente figura podemos apreciar el efecto.

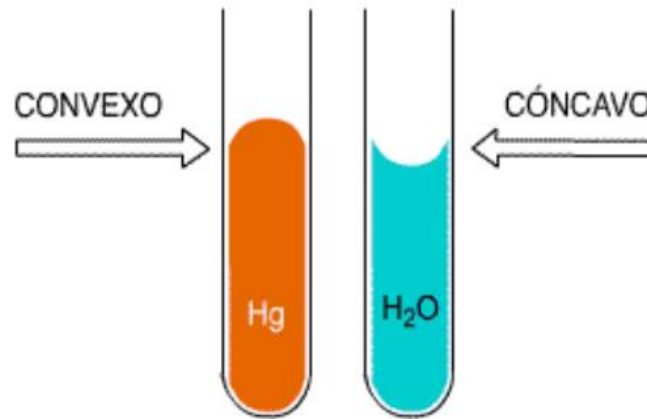


Figura 2.2.1

En la siguiente figura se aprecian dos tubos capilares uno con Mercurio y otro con Agua. La curvatura del menisco determinará si el líquido podrá ascender o no. Este fenómeno es determinado por la explicación dada en la parte de Tensión Superficial.

3. Mojabilidad o Humectabilidad

Esta característica básicamente se puede sintetizar en la capacidad que tiene el líquido de mojar o humedecer la superficie del sólido con el que se encuentra en contacto.

Si buscamos una definición más técnica podemos decir que es la capacidad que tiene un líquido para mantener contacto con una superficie sólida. Y esa mojabilidad es determinada por las interacciones intermoleculares de dichos componentes.

Por lo tanto, la mojabilidad de un líquido se determina por las fuerzas cohesivas y adhesivas. Estas fuerzas las explicaremos a continuación en función de un líquido:

- **Fuerzas Cohesivas:** Las fuerzas cohesivas dentro de un líquido son las fuerzas que causan que una gota del líquido se haga una esfera.
- **Fuerzas Adhesivas:** Las fuerzas adhesivas entre un líquido y una superficie son las que causan que el líquido se esparza o extienda sobre la superficie.

La mojabilidad es un factor determinante en la capacidad de un líquido para poder mojar la superficie y si lo atamos con el método de líquidos penetrantes es una característica clave. En la siguiente figura podemos apreciar el impacto que tiene la mojabilidad en la capacidad que tiene un líquido de esparcirse sobre una superficie:

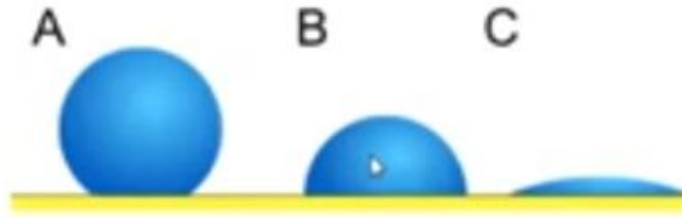


Figura 2.3.1

En la figura anterior podemos observar tres casos en los cuales de izquierda a derecha vemos como aumenta la mojabilidad del líquido sobre la superficie del sólido. Ahora bien, la mojabilidad ciertamente está determinada por el balance entre las fuerzas adhesivas y cohesivas, pero hay otro factor que tenemos recalcar que es el ángulo de contacto que será explicado más adelante.

Pero si pensamos en el efecto de esta característica sobre la inspección con líquidos penetrantes debemos pensar directamente en que la capacidad que tenga el líquido de esparcirse sobre la superficie será fundamental para que el líquido pueda buscar e ingresar en las discontinuidades. Por lo tanto, se busca una buena mojabilidad en los líquidos penetrantes.

4. Ángulo de Contacto

El ángulo de contacto está determinado por la mojabilidad del líquido con respecto a la superficie evaluada y esto es algo que hay que comprender. La habilidad que tiene el líquido de mojar una superficie no está determinada solamente por el líquido, el sólido juega un papel fundamental debido a que la mojabilidad depende de la interfaz Sólido-Líquido y ambos componentes determinan la mojabilidad.

Una forma de determinar la mojabilidad en función de una superficie es a través del ángulo de contacto.

El impacto que tiene la superficie lo podemos apreciar en diversos materiales industriales que se utilizan para ropa para usar bajo la lluvia, la ropa impermeable. Este tipo de materiales genera un ángulo de contacto sumamente alto y disminuye la capacidad del líquido de mojar la superficie.

Un caso natural de este efecto lo podemos ver en las flores de loto que tienen un ángulo de contacto mayor que 150 grados lo que la vuelve sumamente hidrofóbica. En la siguiente figura apreciamos este caso.



Figura 2.4.1

Tal y como se observa en la figura anterior el agua no es capaz de humedecer la flor debido al ángulo de contacto. Podemos decir que esta interfaz liquido-sólido tiene un ángulo sumamente alto y por lo tanto una mojabilidad muy baja.

En la siguiente figura podemos ver de manera general el comportamiento en del líquido en función del ángulo de contacto.

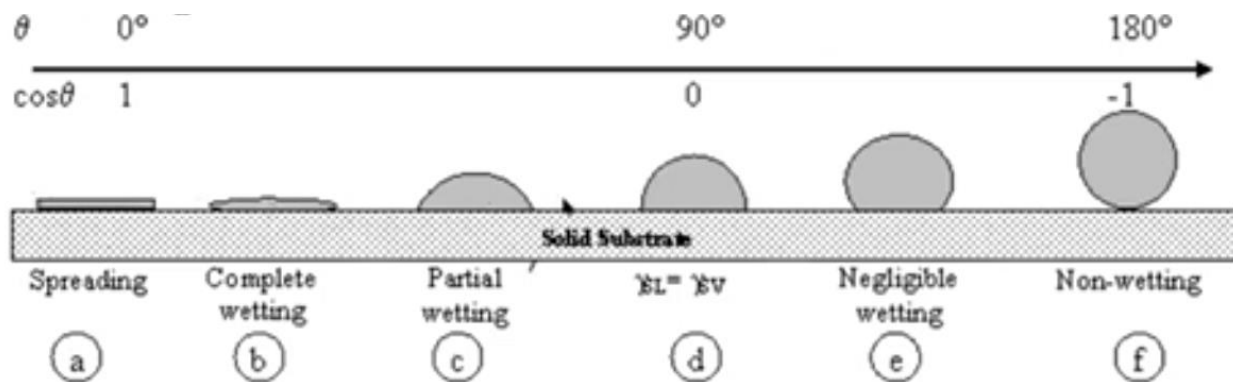


Figura 2.4.2

A medida que al ángulo aumenta la mojabilidad disminuye. En el caso de líquidos penetrantes se busca que el líquido tenga el menor ángulo posible para poder mojar la superficie fácilmente. Si hablamos de valores numéricos podemos decir que usualmente los valores comerciales de líquidos penetrantes son ángulos menores a 10 grados.

Ya apreciamos el efecto del ángulo de contacto en la mojabilidad. Pero también podemos determinar las características de la interfaz sólido-líquido en función del mismo ángulo de contacto. Esto lo podemos apreciar en la siguiente figura.

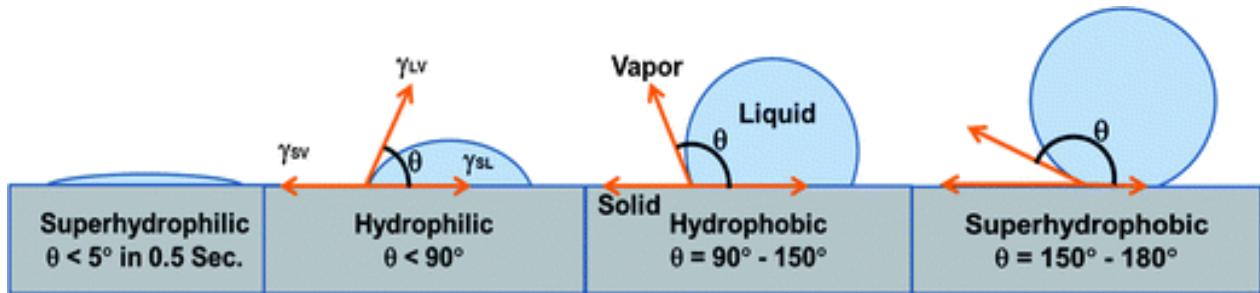


Figura 2.4.3

Como podemos ver tenemos 4 tipos de superficies en función del ángulo de contacto, pero para los efectos del curso de líquidos penetrantes solamente hablaremos de la superficie hidrofóbica e hidrofílica. Los efectos de estas superficies los podemos apreciar en la siguiente tabla.

	Superficie Hidrofóbica	Superficie Hidrofílica
Angulo de Contacto	Alto	Bajo
Adherencia	Baja	Buena
Mojabilidad	Baja	Buena

4.1 Parámetros que influyen en el ángulo de contacto

El ángulo de contacto es un parámetro sumamente importante en los resultados de la prueba de líquidos penetrantes ya que como mencionamos anteriormente de esto dependerá la capacidad del líquido de mojar y subsecuentemente de entrar en las discontinuidades a través del fenómeno de capilaridad. Que si pensamos en la capilaridad recordemos que depende de la capacidad del líquido para subir en la superficie por la adherencia y a su vez la adherencia del líquido depende del ángulo de contacto así que por transitividad podríamos decir que la capilaridad que es el fenómeno físico clave en este método depende del ángulo de contacto.

Así que debido a la importancia del ángulo de contacto aquí presentaremos algunos factores que afectan directamente el ángulo de contacto y que hay que tener presentes para garantizar buenos resultados en la inspección.

- **Temperatura:** El ángulo de contacto es dependiente de la temperatura. Esto se debe a que la tensión superficial de la superficie variará dependiendo de la superficie y por lo tanto el ángulo de contacto también se verá afectado. De manera general podemos decir que a medida que aumenta la temperatura de la superficie el ángulo de contacto aumenta.

No es bueno que la temperatura aumente debido a que disminuirá la mojabilidad del líquido penetrante además que afectara la integridad del líquido penetrante, más adelante veremos el efecto de la temperatura en el líquido penetrante como tal.



- **Rugosidad de la superficie:** La rugosidad es un factor clave con respecto al ángulo de contacto y por lo tanto en el ángulo de contacto.

Si lo pensamos de manera práctica podemos pensar que una superficie rugosa tendrá: más superficie efectiva que abarcar, mayor dificultad para que un líquido se propague de manera eficiente y la capacidad de mojar la superficie.

Una superficie lisa tendrá un solo ángulo de contacto a lo largo de toda la superficie, pero una superficie rugosa tendrá un ángulo de contacto aparente que se puede calcular con la siguiente fórmula.

$$\cos \phi = \frac{A_r}{A_a} \cos \theta$$

En donde:

ϕ : Ángulo de Contacto Aparente

A_r : Área real del sólido

A_a : Área aparente del sólido

θ : Ángulo de Contacto

Como podemos apreciar en la fórmula anterior la rugosidad de la superficie tiene un impacto directo en el ángulo de contacto, pero también se ve afectada por la superficie y debido a esto podemos establecer las siguientes relaciones:

- ✓ En superficies con muy baja mojabilidad el ángulo de contacto aumenta con un incremento de la rugosidad de la superficie.
- ✓ En superficie con muy buena mojabilidad el ángulo de contacto disminuye con el aumento de la rugosidad de la superficie.

Por otra parte, es bueno mencionar que la temperatura también tiene un efecto con respecto al impacto de la rugosidad. A mayores temperaturas se disminuye la influencia que tiene la rugosidad, pero esto dependerá de la naturaleza del líquido.

5. Viscosidad

La viscosidad es la característica que poseen los fluidos de oponerse al flujo y esta oposición es producto de la fricción molecular interna.

Esta característica se asocia a la fuerza de cohesión del líquido, mientras menos interacción ocurra entre las moléculas internas menor será la viscosidad porque tendrán menos fricción entre sí.

Desde un punto de vista del método de líquidos penetrantes tenemos que decir que la viscosidad no afectara las habilidades penetrantes de un líquido, pero lo que si afectara será el tiempo que le tome a dicho liquido penetrar en una discontinuidad.

Si un líquido es demasiado viscoso el tiempo requerido para llevar a cabo el ensayo será muy alto. Por otra, si el líquido es muy poco viscoso también podemos tener un problema ya que se escurrirá muy rápidamente y no ingresará en aquellas discontinuidades poco profundas.

Así que la característica de la viscosidad es sumamente importante y debe ser la adecuada para tener los mejores resultados en la inspección.

De manera general podemos evaluar la viscosidad desde un punto de vista matemático para entender las relaciones que posee con otros parámetros y para ello evaluemos la siguiente formula.

$$\eta = \frac{\pi r^4 T P}{8 V L}$$

En donde:

η : Coeficiente de Viscosidad

r : Radio del Tubo Capilar

T : Tiempo de Llenado

P : Presión de Penetrabilidad

V : Volumen del Liquido

L : Longitud de Penetración

Esta fórmula sería la forma de calcular la viscosidad del líquido evaluado, pero sabemos que para nosotros como inspectores realmente el valor de viscosidad no afectara la inspección, sino que afectara el tiempo de inspección. Así que desde un punto de vista práctico sería mejor evaluar la fórmula que dictamine el tiempo de penetración y para ello podemos despejar T y sustituir V y P por otras representaciones. Luego del cálculo tendríamos la siguiente formula.

$$T = \frac{4L^2\eta}{r\gamma \cos \theta}$$

En donde:

η : Coeficiente de Viscosidad

r : Radio del Tubo Capilar

T : Tiempo de Llenado

θ : Angulo de Contacto

L : Longitud de Penetración

Finalmente podemos decir que esta última forma nos puede dar las relaciones claves del tiempo de inspección porque sabemos que dependerá de la viscosidad, pero además podemos establecer los siguientes comentarios:

- ✓ El tiempo de penetración es directamente proporcional a la viscosidad.
- ✓ La longitud del tubo capilar determinara el tiempo de penetración.
- ✓ La tensión superficial es inversamente proporcional al tiempo de penetración.
- ✓ El radio del tubo capilar es inversamente proporcional al tiempo de penetración.

Ciertamente las relaciones mencionadas anteriormente son producto de la ecuación matemática, pero si hacemos algunas consideraciones practicas desde el punto de vista de la inspección con líquidos penetrantes podemos establecer lo siguiente:

- ✓ Usualmente la longitud L o mejor dicho la profundidad que llegan las discontinuidades es relativamente pequeña y por lo tanto el tiempo de penetración suele ser pequeño también. Pero el tiempo de penetración debe ser determinado para la inspección. Esto es cierto al menos que la viscosidad del fluido sea muy alta.
- ✓ Viscosidades muy altas suelen significar perdida del penetrante ya que se puede quedar pegado en la superficie de su contenedor en zonas que no son de interés y si juntamos el acumulado terminamos teniendo perdidas de material que se traducen en costos. Y desde un punto de vista de la inspección como tal tendremos tiempos de trabajos muy altos que también podríamos asociar a mayores costos.

6. Penetrabilidad

La penetrabilidad es la habilidad de un líquido de ingresar en una discontinuidad. Un líquido penetrante debe tener buena penetrabilidad para poder efectuar el método no destructivo.

Si relacionamos la penetrabilidad con algunas de las características fisicoquímicas mencionadas anteriormente podemos establecer lo siguiente:

- ✓ Si relacionamos la penetrabilidad con la tensión superficial podemos decir que una penetrabilidad alta significa una alta tensión superficial. Aunque tener una alta tensión superficial no significa necesariamente que se va a tener una buena penetrabilidad.
- ✓ Si relacionamos la penetrabilidad con el ángulo de contacto podemos decir que un ángulo de contacto pequeño significa una alta penetrabilidad.
- ✓ La viscosidad no afecta significativamente la penetrabilidad. Lo que afectará será el tiempo de penetración.

Un punto sumamente importante de recordar con respecto a la penetración del líquido penetrante en una discontinuidad es que ciertamente el fluido penetrará gracias al fenómeno de capilaridad y esto es clave en el método de inspección. Porque si no se conoce la física detrás del ensayo uno puede asumir que el líquido ingresa en las discontinuidades debido a la gravedad, pero ya que la penetración viene dada por la capilaridad es importante recalcar que no importa la orientación del ingreso de la discontinuidad.

Por otra parte, si nos interesa calcular la penetrabilidad de un líquido lo podemos hacer a través del uso de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{2\gamma}{R}$$

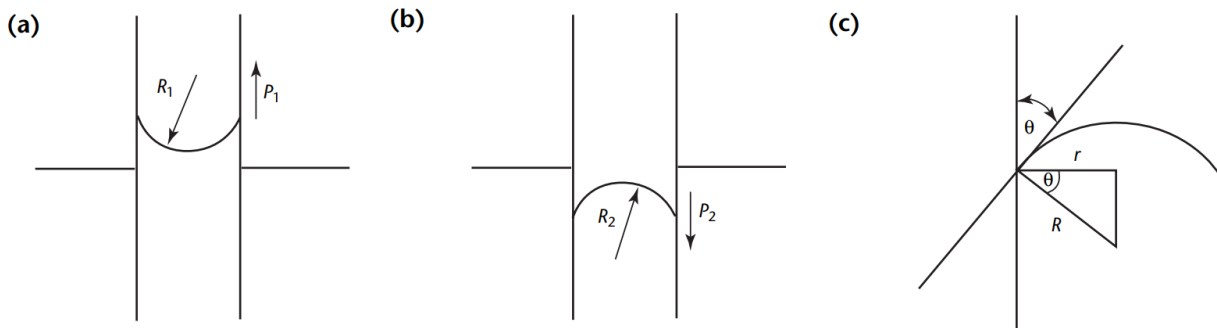
En donde:

P : Penetrabilidad

γ : Tensión Superficial del Líquido

R : Radio de Curvatura del Líquido

Hasta ahora no habíamos hablado directamente del radio de curvatura, pero si hemos hablado sobre si el líquido es cóncavo o convexo dentro del tubo capilar y sabemos que un requerimiento para poder subir por la pared es que presente una forma cóncava. Ahora bien, esa concavidad es medible a través del radio de curvatura que presente y esto lo podemos apreciar en la siguiente figura.



Figura

En la imagen A de la figura anterior podemos apreciar un tubo capilar que tiene la acción de subir por la pared, la imagen B no tiene la capacidad por la pared y la imagen C denota la relación de ángulos entre el radio del tubo capilar y el radio de curvatura. Si escribimos esa relación tenemos la siguiente fórmula.

$$\cos \theta = \frac{r}{R}$$

En donde:

θ : Angulo de Contacto entre el líquido y la pared

r : Radio del tubo capilar

R : Radio Curvatura del liquido

Si esta relación la introducimos en la fórmula de que asocia la penetrabilidad y la tensión superficial tendríamos una expresión que asociara el tamaño del tubo capilar con respecto a la penetrabilidad. Esa ecuación sería la siguiente:

$$P = \frac{2\gamma}{r} * \cos \theta$$

En donde:

P : Penetrabilidad

γ : Tensión Superficial del Liquido

r : Radio del tubo capilar

θ : Angulo de Contacto entre el líquido y la pared

Entonces todo lo que hemos visto hasta ahora se puede sintetizar en esta última ecuación y a partir de esta ecuación podemos hacer los siguientes comentarios:

- ✓ A medida que aumenta la tensión superficial aumenta proporcionalmente la penetrabilidad. (Esto ya lo habíamos mencionado anteriormente pero ahora ya lo demostramos matemáticamente).
- ✓ El tamaño del tubo capilar es inversamente proporcional a la penetrabilidad. Mientras más pequeño sea el tubo capilar mejor penetrabilidad tendrá el líquido. Y recordemos que para el método de inspección el tubo capilar es equivalente a las discontinuidades.
- ✓ Si el Angulo de contacto es menor que 90 grados la penetrabilidad será igual a cero. Y esto lo asociamos con la concavidad del líquido y la capacidad de mojar la superficie producto de la adherencia.

7. Punto de Incendio

El punto de incendio es la temperatura a la cual un líquido inflamable puede incendiarse espontáneamente a través del vapor desprendido.

Esta característica fisicoquímica es de altísima importancia sobre todo cuando los trabajos que se tiene que efectuar son a temperaturas elevadas. No podemos correr el riesgo de que nuestros implementos de trabajo se incendien espontáneamente.

De manera general una temperatura adecuada para el punto de incendio en los líquidos penetrantes de por encima de los 93°C.

En el caso de trabajos que se desempeñen a temperaturas aún más altas debido a la pieza que se tiene que evaluar se deberá trabajar con líquidos penetrantes especiales que su punto de incendio permita su uso a dichas temperaturas, esto se verá más adelante en el manual

Ahora un punto sumamente importante de conocer es la relación del punto de incendio específicamente con la viscosidad.

- ✓ La viscosidad es directamente proporcional con el punto de incendio.

Esta relación es un problema porque evidentemente una solución podría ser buscar la composición química del penetrante que resulte en un punto de incendio mucho mayor y evitamos el problema del incendio espontaneo, pero ya que la viscosidad del penetrante aumenta esto no se puede hacer. Como vimos en el punto de viscosidad tener una viscosidad alta no es bueno para la inspección.

8. Actividad Química

La actividad química básicamente es el potencial químico que tienen de interactuar con otra sustancia, podríamos pensar en una reacción química sencilla entre dos componentes.

Esta característica es importante de entender debido que el líquido penetrante en si es un componente químico que estará en contacto con la pieza sujeta a ser evaluada de manera no destructiva y por ello no podemos permitir que el líquido penetrante reaccione de ninguna manera en el objeto evaluado.

Es por ello que hay que verificar que el material a evaluar y los distintos materiales utilizados en el método de inspección sean químicamente compatibles.

El ejemplo más claro y reseñable en los líquidos penetrantes es cuando el objeto a inspeccionar es:

- ✓ Aceros Inoxidables Austeníticos.
- ✓ Aleaciones de Titanio.
- ✓ Aleaciones de Níquel.

Estos tres materiales son sumamente sensibles a la presencia de cloruros, fluoruros y sulfuros ya que interactuaran con el material produciendo problemas de corrosión y esto es algo que evidentemente no podemos permitir.

La actividad química debe ser evaluada y en el caso de que el material no sea compatible habrá que evaluar el uso de otro tipo de líquido penetrante o inclusive otro método de inspección.

Capítulo 3: Líquidos Penetrantes

1. Propiedades de los Líquidos Penetrantes

Como ya hemos visto hasta ahora el líquido penetrante es un fluido que se introduce en las discontinuidades abiertas a la superficie y esto lo realiza a través del fenómeno de capilaridad. Por otra parte, existen diversas propiedades fisicoquímicas que fueron estudiadas en el capítulo anterior que sabemos tendrán un impacto no solamente en el líquido penetrante sino en la inspección en general.

Pero si sintetizamos todas esas características fisicoquímicas y las traducimos en que características debe tener nuestro líquido penetrante podemos hacer el siguiente listado:

- ✓ El penetrante debe poseer alta penetración para detectar discontinuidades muy finas. Esto quiere decir que el penetrante debe tener una buena penetrabilidad.
- ✓ Debe evaporarse lentamente. Por lo tanto, la volatilidad del líquido debe ser baja.
- ✓ El penetrante debe permitir remover el exceso de penetrante en la etapa de remoción de una manera fácil. La etapa de remoción se hablará más adelante.
- ✓ El penetrante debe permanecer en estado líquido durante el proceso de inspección.
- ✓ No debe reaccionar con el revelador ni con el material a inspeccionar. Este punto hace referencia a la actividad química y su compatibilidad.
- ✓ El penetrante debe mostrar estabilidad con respecto al color que genera para la evaluación.
- ✓ Deben tener un alto punto de incendio.
- ✓ Debe tener estabilidad en condiciones de almacenamiento.

2. Penetrantes Base Oleosa y No Oleosa

Los líquidos penetrantes se pueden clasificar de diversas formas y evidentemente la resaltante sería si el penetrante es visible o fluorescente. Pero una de las clasificaciones que son más importantes es la base en la que se constituye el líquido penetrante.

Recordemos que a fin de cuentas el líquido penetrante es un fluido que se coloca sobre la superficie de la pieza y la naturaleza química de dicho líquido es primordial para saber si podemos colocarlo sobre un objeto inspeccionado.

De manera general podemos decir que existen dos tipos de penetrantes:

- ✓ **Penetrantes a base oleosa:** Estos penetrantes tienen una base de aceite que si hablamos desde un punto de vista químico hablaríamos de una mezcla hidrocarburos de parafina, de nafta y aromáticos. Este tipo de penetrantes podríamos llamarlo como el penetrante estándar que es el que normalmente se utiliza.
- ✓ **Penetrantes a base agua:** Este tipo de penetrante utiliza una base acuosa en vez del uso de una base oleosa. Son penetrantes más económicos en comparación a los de base oleosa.

3. Penetrantes Visible

Si clasificamos a los penetrantes en función de su pigmentación podemos dividirlos en dos tipos, los penetrantes visibles y los penetrantes fluorescentes.

Y como ya hemos visto anteriormente el impacto que tendrá el color y la iluminación es clave para poder realizar una buena evaluación.

Desde un punto de vista de la química podemos decir que todas las moléculas interactúan con la incidencia de la luz a través de la absorción, reflexión y transmisión y los líquidos penetrantes no son una excepción.

El líquido penetrante tiene que ser un componente que interactúe de una manera que les permita a los inspectores maximizar su detectabilidad para así maximizar la detectabilidad de las discontinuidades.

Ya estudiamos de manera general la iluminación y los colores, pero aquí estableceremos algunos puntos de interés con respecto a los penetrantes visibles:

- ✓ Se utilizan pigmentos de color rojo para darle al líquido penetrante este color.
- ✓ Se utiliza un revelador que servirá de fondo que sea de color blanco para generar el contraste adecuado para facilitar la visualización.

- ✓ El espesor de la capa del penetrante es un factor a tomar ya que dependiendo del espesor la interacción con la luz variara. Esto lo veremos más adelante.

De los tres puntos anteriores ya hemos estudiado los dos primeros, pero el punto número tres dependerá de una ley llamada Beer-Lambert que se utiliza en la espectroscopia.

Si definimos la espectroscopia básicamente es el estudio de la interacción de la radiación electromagnética con la materia y para nuestros efectos seria la interacción de la luz con la materia.

3.1 Pigmentación y Beer-Lambert en los Penetrantes Visible

Los penetrantes visibles trabajan con pigmentos de color rojo pero la cantidad de pigmento es sumamente importante ya que afectara la visualización. Esto lo podemos apreciar en la siguiente figura.

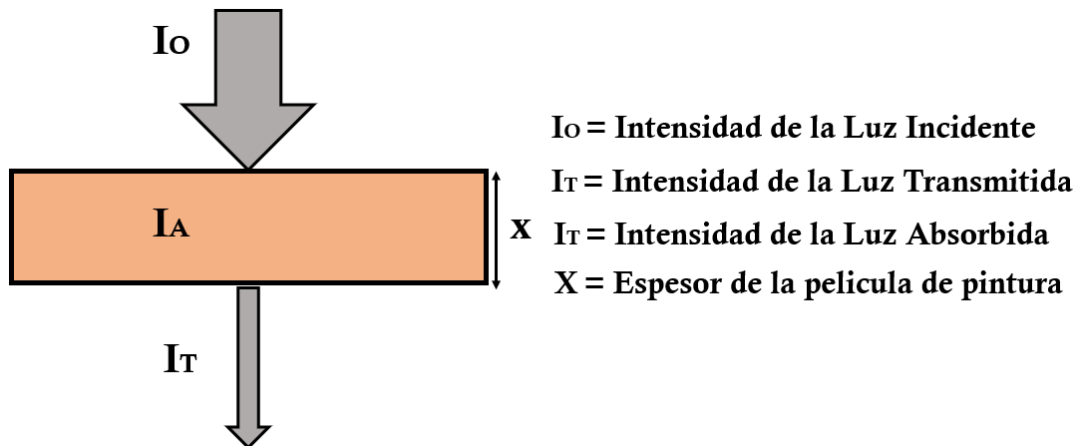


En la figura anterior se tienen seis frascos en los cuales de izquierda a derecha la concentración del componente va en incremento y si asociamos esto con los líquidos penetrantes podríamos pensar en la cantidad de pigmento rojo que tendría el líquido. Y es por esto que la cantidad es importante.

En los líquidos penetrantes visibles la concentración del pigmento deberá ser la máxima que el tipo de penetrante permita para que las características de mojabilidad, capilaridad y tensión superficial sean adecuadas para efectuar el ensayo.

Pero otro punto sumamente importante es el comportamiento de esos pigmentos con la incidencia de la luz porque ya hemos visto que el éxito de este método recae sobre la capacidad de visualización genere el líquido.

Para ellos hablemos un poco sobre la incidencia sobre la película del penetrante a través de la siguiente figura.



Imaginémonos que el rectángulo de espesor X es la película de líquido penetrante que se encuentra sobre la superficie. Cuando la luz incide sobre este líquido tendremos una incidencia de intensidad I_0 . Esa luz que incide generará una absorción y una transmisión de energía que es clave para la visibilidad del líquido. Si las relaciones de la figura anterior las escribimos de forma matemática tendríamos la siguiente fórmula.

$$I_0 = I_T + I_A$$

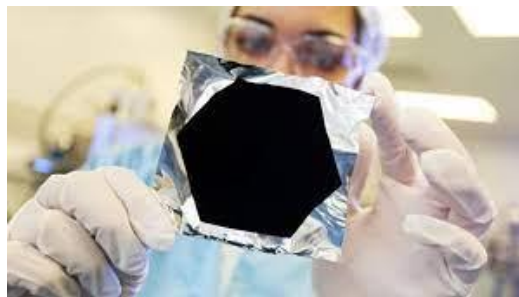
En donde:

I_0 : Intensidad de la luz Incidente

I_T : Intensidad de la luz Transmitida

I_A : Intensidad de la luz Absorbida

Ahora bien, la cantidad de energía que es absorbida dependerá de un coeficiente de absorción que es intrínseco de la materia. En la siguiente figura podemos observar un material que tiene uno de los coeficientes de absorción más altos.



En la figura anterior se aprecia un material llamado Vantablack que absorbe un 99,965% de la luz que incide sobre el material. Evidentemente este es un caso extremo y nada parecido a los líquidos penetrantes, pero podemos ver el impacto que tiene la absorción en la visión producto de la incidencia de la luz.

Ahora bien, para el caso de los líquidos penetrantes el coeficiente ciertamente es un factor importante a tomar en cuenta, pero ese coeficiente no es el único valor que tiene un impacto en la absorción.

Otro factor es la concentración de pigmento es otro factor clave en la absorción. Este punto ya fue abordado anteriormente.

Y el otro factor que desglosaremos es el espesor del líquido penetrante que se genera sobre la superficie de la pieza evaluada.

Para hablar sobre el impacto del espesor sobre la absorción tenemos que citar la fórmula de Beer-Lambert.

$$I_T = I_0 \times 10^{-ecX}$$

En donde:

I_0 : Intensidad de la luz Incidente

I_T : Intensidad de la luz Transmitida

ec : Una constante para el material

X : Espesor medido en milímetros

Pero si mezclamos esta ecuación de Beer-Lambert con la ecuación que asocia la Intensidad de Luz absorbida tendríamos la siguiente ecuación.

$$I_A = I_0(1 - 10^{-ecX})$$

En donde:

I_0 : Intensidad de la luz Incidente

I_A : Intensidad de la luz Absorbida

ec : Una constante para el material

X : Espesor medido en milímetros

A través del uso de esta fórmula podemos determinar en función de la cantidad de energía que se absorbe cual sería el espesor.

De forma general podemos establecer los siguientes conceptos:

- ✓ Un buen líquido penetrante visible debe ser opaco en películas con espesores mayores a 0,1mm.
- ✓ En capas de 0,01mm se vuelve casi opaco.
- ✓ En capas de menor espesor el líquido se vuelve transparente.

Es importante hacer una acotación, el espesor de la película de líquido penetrante no solamente se debe tomar en cuenta cuando ese líquido se coloca sobre la superficie, sino que

el espesor también debe ser tomado en cuenta (y sobre todo aquí) en el líquido que aparece por las discontinuidades.

Ese espesor variará dependiendo del tamaño de las grietas, fisuras, etc.

En el caso de que la discontinuidad sea muy delgada y la capa de líquido sea sumamente delgada que prácticamente el líquido es invisible se deberá pensar en utilizar técnicas más sensibles como líquidos penetrantes fluorescentes.

4. Penetrantes Fluorescentes

Tal y como lo dice su nombre los líquidos penetrantes fluorescentes tienen la característica que brillan debido a la fluorescencia que emiten al ser sometidos a la presencia de una luz UV-A.

Pero expliquemos un poco más en detalle cómo funciona la fluorescencia. Existen diversos componentes que bajo la incidencia de una luz ultravioleta generarán un color brillante conocido como fluorescencia.

Lo que sucede es que las partículas fluorescentes reciben una incidencia de luz UV-A que es invisible para los seres humanos pero la emisión que genera esa partícula sí será visible para el ser humano bajo luz UV-A. Generando lo que conocemos como fluorescencia.

Ese fenómeno ocurre porque las partículas entran en un estado de excitación generada por la incidencia de UV-A y esa energía hace que aumente su nivel energético por encima del normal. La partícula no se puede retener esa energía y la libera en forma de luz fluorescente visible.



Figura 4.1

En la figura anterior se aprecia el fenómeno de manera general pero lo que hay que recordar es que el pigmento que es sometido a UV-A tiene que ser fluorescente para que esto funcione.

Y precisamente la presencia de esos pigmentos en el líquido penetrante es lo que permite esta técnica.

En la siguiente figura podemos apreciar el efecto de la fluorescencia con resaltadores que muy probablemente hemos utilizado, pero nunca hemos colocado bajo la incidencia de luz UV-A.

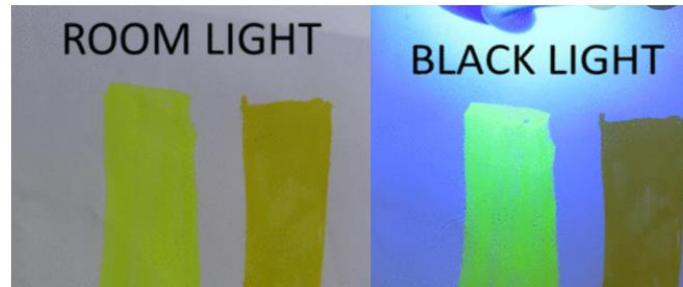


Figura 4.2

Como podemos apreciar los resaltadores generan fluorescencia significando que tienen pigmentos que permiten este fenómeno.

Ahora bien, esa fluorescencia se puede medir a través de la siguiente fórmula.

$$F = QI_A$$

En donde:

F : Intensidad de Brillo Fluorescente

Q : Eficiencia Cuántica del Líquido Penetrante

I_A : Intensidad de la luz Absorbida

Tal y como apreciamos en la fórmula la intensidad del brillo fluorescente dependerá del valor Q que es dependiente del líquido, pero también dependerá de la cantidad de luz absorbida. Si recordamos la fórmula de Beer-Lambert entonces podemos asociar la fluorescencia con la incidencia de la luz. Entonces tendríamos la siguiente fórmula:

$$F = QI_0(1 - 10^{-ecX})$$

Como podemos apreciar en la fórmula anterior la fluorescencia dependerá de cuatro valores. En primer lugar, de la eficiencia cuántica Q , en segundo lugar, de la intensidad de luz UV-A que incida sobre los pigmentos fluorescentes, el coeficiente de absorción y por último del espesor de la capa de líquido.

Ya hemos establecido que los penetrantes fluorescentes son más sensibles que los visibles, pero uno de los motivos principales de esto es que los líquidos fluorescentes pueden trabajar con espesores de película mucho menores que los requerimientos de los penetrantes visibles. Si recordamos con los penetrantes visibles llega un momento que el líquido se vuelve

transparente si es muy delgado, pero en el caso de los fluorescentes ese espesor puede ser mucho menor. Esto lo podemos explicar debido a los siguientes motivos.

- ✓ El **coeficiente de absorción “e” es tres veces mayor** en los penetrantes fluorescentes que en los penetrantes visibles. Y es claro que esta diferencia tendría un impacto directo en el resultado de la ecuación.
- ✓ El contraste que se genera con los penetrantes fluorescentes es mucho más favorable que el contraste generado por los visibles. Si pensamos en este contraste los penetrantes fluorescentes tienen un **contraste Brillante sobre Oscuro** y en el caso de los visibles su contraste es Oscuro sobre Claro. El contraste de los fluorescentes es mejor.
- ✓ La **dispersión de la luz** producida por la fluorescencia aumenta la visibilidad del penetrante en casi un orden de magnitud.

Para entender ese fenómeno de dispersión tenemos que visualizarlo con la siguiente figura.

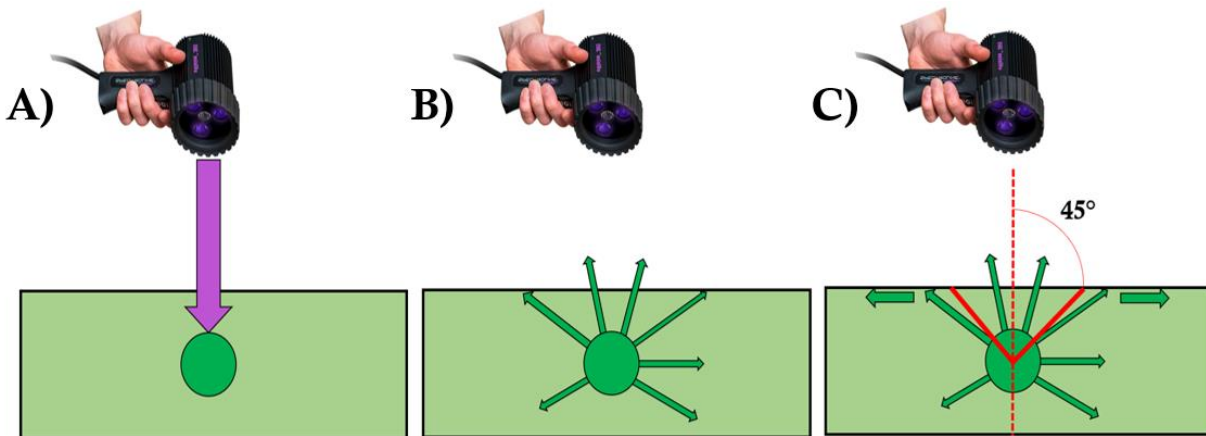


Figura 4.3. Dispersión de la Luz por Pigmentos Fluorescentes. A) Incidencia de la Luz Ultravioleta. B) Luz Fluorescente saliendo del pigmento. C) Limitación Angular de la Visibilidad.

En la figura anterior podemos ver el efecto que tienen la fluorescencia pero específicamente vemos el efecto de la dispersión de la luz producida por los pigmentos.

En la parte A de la imagen apreciamos como la luz UV-A impacta el pigmento fluorescente, luego de esto hacemos la transición a la parte B de la imagen en donde apreciamos como la luz ultravioleta es generada a partir de ese pigmento que se comporta como el emisor de la fluorescencia.

Ahora antes de hablar de la parte C sería bueno recordar que la efectividad de esta prueba no destructiva dependerá que la luz fluorescente pueda llegar al ojo del operador para ser evaluada por los conos y bastones en el sistema visual.

Entonces que sucede en la parte C de la imagen que tenemos que mencionar. Existe un problema con la dispersión de la luz fluorescente. El problema básicamente es que la luz quedara atrapada dentro del líquido su el ángulo de impacto con la superficie de salida es mayor a 45° . Tal y como apreciamos en la figura vemos que nada más dos flechas de luz fluorescente logran escapar mientras que el resto quedan atrapadas dentro del fluido. Esto es un gran problema que minimizaría la sensibilidad de esta prueba.

Pero este problema tiene una solución sencilla que es a través de la presencia del revelador que generara un efecto que eliminara el problema del ángulo de salida. Pero esto lo hablaremos en detalle en la sección de reveladores.

5. Aplicación del Penetrante

La aplicación del penetrante se debe realizar sobre la superficie limpia y seca de la pieza. Por lo tanto, esta etapa se tiene que realizar luego de la limpieza inicial.

Los procesos de aplicación del líquido penetrante pueden ser realizada de las siguientes formas:

- ✓ Aplicación por Inmersión.
- ✓ Aplicación por Brocha.
- ✓ Aplicación por Pulverizado/Rociado (Spray).
- ✓ Vertiendo directamente el líquido penetrante sobre la pieza.

5.1 Aplicación por Inmersión

Esta forma de aplicación del líquido penetrante se realiza sumergiendo la prueba evaluada sobre un tanque del penetrante.

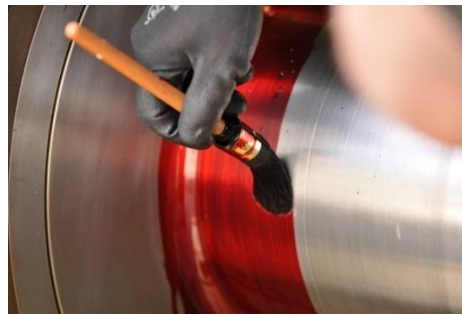
Normalmente esta forma de aplicación se realiza normalmente para alguna de los siguientes requerimientos:

- ✓ Cuando se requiere examinar una gran cantidad de piezas pequeñas
- ✓ Piezas con geometrías complejas.
- ✓ Se requiere cubrir toda la superficie de la pieza evaluada.



5.2 Aplicación por Brocha

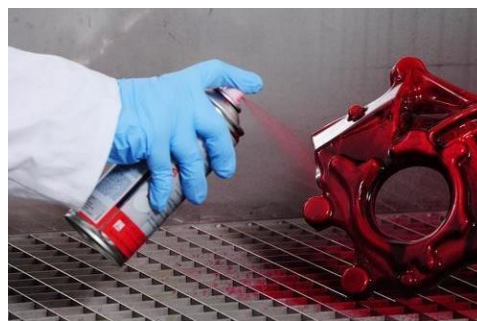
Esta forma de aplicación se utiliza cuando se tiene que inspeccionar un área bien definida de algún componente



5.3 Aplicación por Pulverizado/Rociado (Spray)

Esta forma de aplicación más común de los líquidos penetrantes y se realiza mediante la pulverización del líquido y el posterior rociado sobre el componente.

Existen diversas formas de generar esa pulverización, pero ciertamente la más común es la utilización de latas presurizadas.



Otra forma que se puede aplicar por pulverizado es a través de rociado electrostático, pero para ese tipo de aplicación se requerirá del equipamiento adecuado para poder realizar ese tipo de aplicación.

5.4 Aplicación por vaciado

Esta forma de aplicación simplemente se basa en vaciar el líquido penetrante sobre la superficie evaluada.

6. Tiempo de Penetración

El tiempo de penetración recordemos que es el tiempo que el líquido penetrante debe mantenerse en contacto con la superficie para que el líquido pueda ingresar en las discontinuidades.

Ese tiempo de penetración es variable dependiendo de múltiples factores como:

- Material
- Tipo de discontinuidad
- Temperatura de la superficie
- Penetrante utilizado
- Otros factores

Evidentemente cada caso de aplicación deberá ser estudiado para tener el tiempo de penetración adecuado y producir buenos resultados en la inspección. Lo más recomendable es utilizar las recomendaciones del fabricante y la normativa y procedimientos.

Como ya observamos el tiempo de penetración necesario variara de caso a caso, pero si el tiempo de penetración utilizado es mayor al tiempo necesario no habrá ningún problema con respecto a la sensibilidad de la inspección siempre y cuando el tiempo utilizado no genere que el líquido se seque en la superficie. Evidentemente si el líquido se seca tendremos problemas de inspección.

De manera general mostramos la siguiente tabla que muestra tiempo de penetración estimados en función de la aplicación y el tipo de discontinuidad.

Material	Forma	Tipo de Discontinuidad	Tiempo de Penetración		
			Método A	Método B y D	Método C
Acero	Fundición	Poros	10min	10min	5min
		Traslapes Fríos	15min	10min	7min
	Forja	Traslapes		10min	7min
	Soldadura	Falta de Fusión	10min	20min	7min
		Poros	10min	20min	7min
	Otros	Grietas	15min	20min	7min
Grietas por Fatiga			30min	10min	

7. Métodos de Remoción del Penetrante

La remoción del exceso del penetrante podríamos decir que es el paso más importante en el proceso de inspección ya que eliminara todo el líquido que no esté atrapado en las discontinuidades para no afectar los resultados de la inspección.

Ahora bien, existen distintos tipos de remoción, pero la selección de la forma de remoción dependerá del método de líquidos penetrantes seleccionado. Estos métodos ya se mencionaron anteriormente, pero a continuación los citamos:

- Lavables con Agua
- Post-Emulsificables
- Removibles con Solvente

En el capítulo 7 se abordará un poco más a detalle los requerimientos y resultados de los tipos de remoción.

Capítulo 5: Emulsificadores

Los emulsificadores son un componente esencial para algunas técnicas de inspección con líquidos penetrantes. Pero para entender su utilidad y su función debemos explicar la teoría detrás de una emulsión, surfactantes y el balance hidrofílico y lipofílico (HBL).

1. Emulsión

Para entender que es una emulsión podemos pensar en lo que sucede si colocamos aceite en agua. Si alguna vez lo hemos hecho sabemos que el aceite y el agua no se mezclan, el aceite flota en el agua tal y como lo apreciamos en la siguiente figura.



Tal y como observamos en la figura anterior el agua y el aceite no son miscibles y se separan por densidades. Pero si procedemos a batir vigorosamente esa mezcla tendríamos algo como lo presentado en la siguiente figura.



Lo que se observa es el aceite en partículas a lo largo del recipiente de agua, pero si dejamos esta solución un tiempo breve rápidamente volverá a separarse en dos fases (aceite y agua).

Aquí es donde entra un componente llamado emulsificante que emulsiona la mezcla inmisible. Definamos que es un emulsificantes.

Emulsificante: Un emulsificador es una sustancia que ayuda a mezclar dos sustancias que normalmente son poco miscibles o muy difíciles de mezclar.

Entonces en el caso de que busquemos mezclar el agua y el aceite podríamos utilizar algún emulsificante para mejorar esa mezcla. Un ejemplo del que podemos hablar es la mayonesa, esta es una emulsión de agua y aceite que utiliza la yema de huevo como emulsificador.

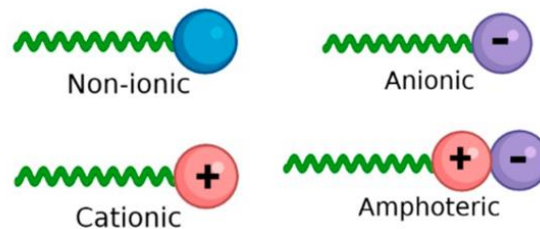
Ahora ya que sabemos que es una emulsión y un emulsificador, pero también debemos hablar de lo que es un surfactante.

Surfactante: Los emulsificadores cuando se utilizan en aplicaciones industriales se conocen como Surfactantes. Un surfactante es un agente químico que tiene una superficie activa que cuando se disuelven en agua se concentran en las interfaces y ejercen diversas funciones como: humedecer, emulsificar, dispersar y solubilizar.

Cuando utilizamos surfactantes en líquidos penetrantes podemos sacarle un gran beneficio para los procesos de lavado, eliminación del exceso del penetrante y humectación.

2. Surfactante

Hablemos un poco sobre la estructura de la molécula surfactante para entender como la podemos implementar en nuestros procesos de líquidos penetrantes.



Básicamente el surfactante lo podemos encontrar de cuatro formas tal y como lo apreciamos en la figura anterior.

Podemos tener los surfactantes No Iónicos que no tienen carga.

Los surfactantes Iónicos los podemos encontrar de tres tipos:

- Con carga negativa, surfactantes aniónicos.
- Con carga positiva, surfactantes catiónicos.
- Con ambas cargas, surfactantes anfóteros.

Otro punto que también debemos conocer del surfactante es la clasificación de sus partes y para ello observemos la siguiente figura.



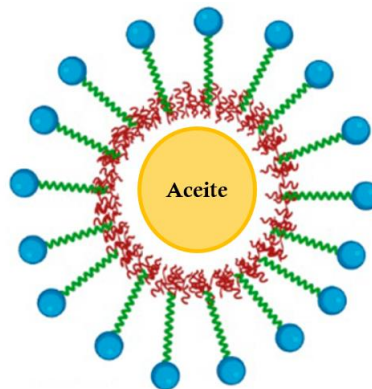
Como se observa en la figura anterior la cabeza del surfactante es una zona hidrofílica y el cuerpo del surfactante es una zona lipofílica. Para entender qué es esto definamos estos términos.

Hidrofílico: Este término hace referencia a aquellas sustancias que tienen afinidad por el agua. Buscan mezclarse con el agua.

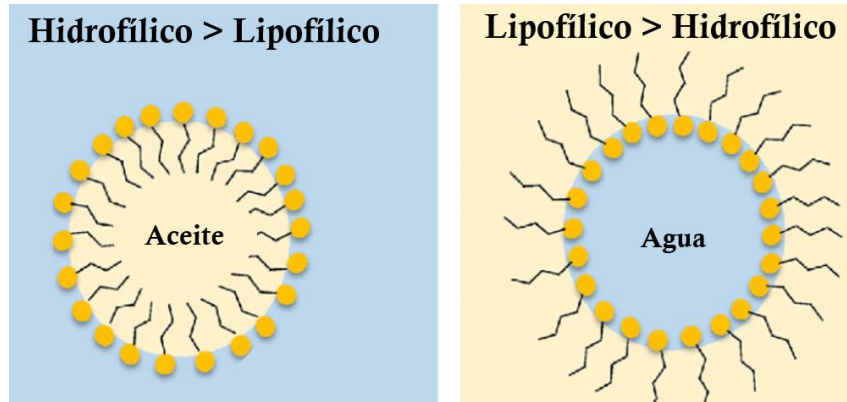
Lipofílico: Este término hace referencia a aquellas sustancias que tienen afinidad por los lípidos (grasas).

3. Emulsificación y HLB

La presencia de los surfactantes en mezclas de agua y aceite genera que los grupos hidrofílicos estarán en contacto con el agua mientras que la parte lipofílica se cerrará en una estructura que contendrá las partículas de aceite. Esta estructura se llama micela. En la siguiente figura se observa este comportamiento.



La presencia de estos componentes en la mezcla puede mejorar sustancialmente algunas características o se le puede sacar provecho para algunas etapas de la inspección con líquidos penetrantes. Pero otro concepto que hay que abordar es el Balance Hidrofílico/Lipofílico (HLB), para ello evaluemos la siguiente figura.



El HLB determinará el comportamiento del surfactante en el líquido. Como podemos apreciar en la figura anterior si la capacidad hidrofílica es mayor que la lipofílica el aceite quedará atrapado en gotas. Caso opuesto ocurre si la capacidad lipofílica es mayor que la hidrofílica.

Si hablamos de rango de valores de HLB podemos establecer los siguientes comentarios.

- ✓ El rango usual va de 1 a 20.
- ✓ Cuando el valor de HLB es menor a 10 el comportamiento lipofílico es mayor.
- ✓ Cuando el valor de HLB es mayor a 10 el comportamiento hidrofílico es mayor.

Otros comentarios de interés con respecto al valor de HLB

- ✓ Valores entre 3 y 6 generan micelas de Agua/Aceite.
- ✓ Valores entre 8 y 18 generan micelas de Aceite/Agua.

4. Surfactantes en Líquidos Penetrantes

La presencia de los surfactantes en los líquidos penetrantes es muy variada ya que el objetivo del uso de los tensioactivos puede variar dependiendo de los valores de HLB. A continuación, mencionaremos algunas aplicaciones.



- ✓ **En la formulación del Penetrante:** El uso de surfactantes de valores de
 - En penetrantes lavables con agua se utilizan surfactantes con valor de HLB entre 14-16 que permiten la eliminación del exceso de penetrante y limpieza con agua.
 - Los penetrantes base agua suelen utilizar tensioactivos de tipo anión debido a que esto reduce la tensión superficial del agua y aumenta la humectación de la superficie por parte del penetrante.

- ✓ **En solventes de limpieza:**
 - Se puede añadir surfactantes de valores 14-16 que mejoren las propiedades de limpieza del limpiador.

- ✓ **En el revelador:**
 - Se pueden añadir surfactantes de tipo iónico para mejorar las propiedades de revelado.

Como podemos observar las aplicaciones de los surfactantes en los líquidos penetrantes se aprecian desde la formulación de los distintos componentes de los líquidos. Pero la función más evidente o más palpable es la utilización de los emulsificadores en los líquidos penetrantes postemulsificables.

Para entender que es un líquido penetrante postemulsificable tenemos que explicar lo que es un penetrante pre-emulsificado. Para entender hablemos de la limpieza de los penetrantes lavables con agua.

Este tipo de penetrantes que al ser pre emulsificables pueden ser lavados fácilmente con agua y esto se debe a que estos penetrantes tienen dentro de su formulación el emulsificador y la presencia del agua activa su comportamiento y facilita la limpieza del penetrante.

Ahora bien, si hablamos de los líquidos penetrantes postemulsificables la adición del emulsificador se hace en una etapa específica y luego de esa adición es que el penetrante puede ser lavado con agua.

Cuando hablamos de los líquidos penetrantes postemulsificables recordemos que hablamos de dos tipos:

- ✓ Método B. Líquido Penetrante Postemulsificable Lipofílico
- ✓ Método D. Líquido Penetrante Postemulsificable Hidrofílico.

Cada uno de estos métodos tendrá sus ventajas, limitaciones y mecanismos de acción, pero lo que si es cierto es que ambos tienen esa etapa adicional de añadir el emulsificador para permitir el lavado del exceso con agua.

4. Emulsificación en Líquidos Penetrantes Postemulsificables Lipofílicos

Para entender cómo funciona la emulsificación en líquidos penetrantes postemulsificables lipofílicos podemos observar la siguiente figura.

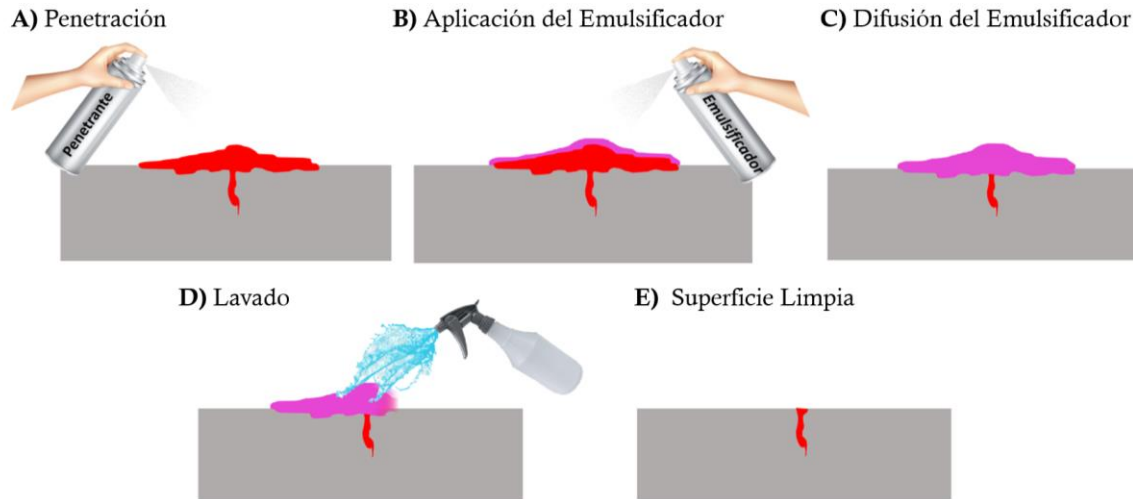


Figura 5.1 Emulsificación Lipofílica en Líquidos Penetrantes

En la figura anterior observamos que hay 5 etapas bien definidas en este proceso. Expliquemos cada una de ellas.

A) Penetración

El proceso de penetración es simplemente la aplicación del líquido penetrante en la superficie de la prueba evaluada. La selección de la forma de aplicación dependerá de las condiciones de trabajo, en el capítulo 7 se desarrollará esta idea. Dentro de la penetración hay que tomar en cuenta el tiempo de penetración que variara dependiendo de las condiciones.

B) Aplicación del Emulsificador

La segunda etapa de este proceso es la aplicación del emulsificador lipofílico. Podemos hacer las siguientes consideraciones referentes a este punto:

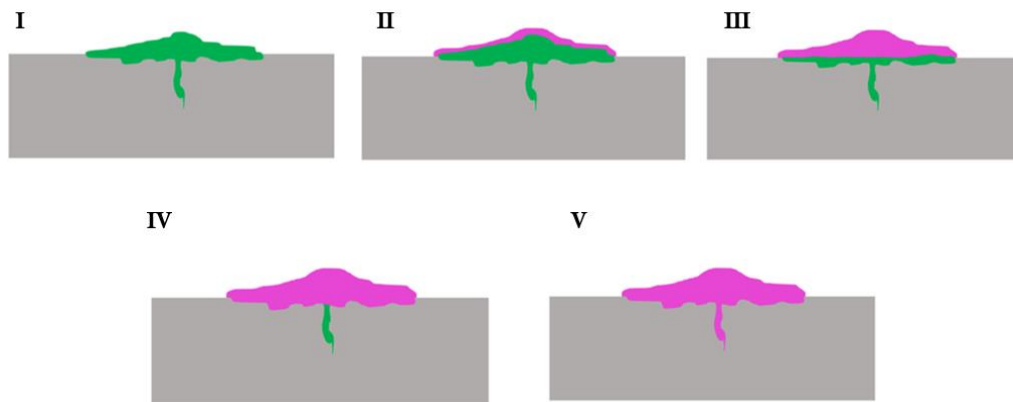
- ✓ La aplicación del emulsificador lipofílico solamente se puede hacer por inmersión.
- ✓ Se recomienda no agitar la pieza durante la inmersión.
- ✓ La aplicación por brocha o pulverizado no se recomienda debido a que las cerdas del pincel al igual que la presión del pulverizado pueden remover el penetrante atrapado en la discontinuidad y por lo tanto disminuir la sensibilidad de la prueba (No tendría utilizar esta técnica de alta sensibilidad e implementar el emulsificador de estas formas).

C) Difusión del Emulsificador

Luego de la aplicación del emulsificador lipofílico viene un proceso de difusión. La difusión es un proceso en el cual un material de concentración alta ingresa a otro material en donde se tiene una concentración baja. La difusión continua hasta obtener una distribución homogénea.

En el caso del emulsificador lipofílico lo que ocurre es que poco a poco va difundiendo a través del líquido penetrante.

Al igual que el tiempo de penetración para el penetrante existe un tiempo de emulsificación. Este tiempo es crucial para tener buenos resultados en la inspección. La importancia de esto lo podemos ver en la siguiente figura.



Como se aprecia en la figura anterior tenemos 5 casos que van en orden ascendente en función del tiempo de emulsificación. Claramente vemos como la difusión va aumentando poco a poco. Ahora bien, el motivo por el cual el tiempo de emulsificación es crucial es debido a que el próximo paso es el lavado.

En el paso de lavado se removerá todo el exceso de penetrante, pero hay que tomar en cuenta que solo se podrá remover aquel exceso que haya sufrido una emulsificación para permitirle su lavado.

Si hablamos de los casos I, II y III observamos que tendríamos problemas ya que si eliminamos el penetrante emulsificado claramente observamos que quedara penetrante en la superficie entorpeciendo los resultados de la inspección.

En el caso IV podríamos decir que es la emulsificación ideal, en donde todo el penetrante que se encuentra en la superficie fue emulsificado.

En el caso V nuevamente tendremos problemas de inspección ya que esta vez no será por falta de remoción sino por exceso de remoción. Se aprecia como la difusión logro emulsificar el penetrante atrapado en la discontinuidad y por lo tanto en la siguiente etapa se podría remover el penetrante atrapado en la discontinuidad. Esto entorpecería la inspección.

Hay que detener la difusión para que la emulsificación no se genere en el líquido penetrante que se encuentra dentro de las discontinuidades.

El tiempo de emulsificación es crítico para buenos resultados. Esta técnica tiene una sensibilidad muy alta, pero esto depende de una buena emulsificación.

De que va a depender el tiempo de emulsificación:

- ✓ Rugosidad de la superficie (Retener más o menos líquido producto de la rugosidad).
- ✓ Geometría.
- ✓ Tipo de penetrante postemulsificable.

La mejor manera de determinar el tiempo de emulsificación es fijándolo experimentalmente en una pieza y luego se aplica en piezas similares. Empiezas de un tiempo grande y vas disminuyendo hasta que llegas al tiempo correcto. Pero esa disminución de tiempo requiere repetir el ensayo completamente.

En líneas generales las normas establecen un tiempo máximo de 3min para la emulsificación.

El emulsificador tiene una leve fluorescencia rosada que se puede discriminar del penetrante.

Si queda mucho fondo al realizar la remoción del exceso da el indicio de que el tiempo de emulsificación no fue suficiente. Si no queda nada de fondo fue un exceso de tiempo y probablemente el penetrante atrapado fue emulsificado.

Lo que se busca es que quede un pequeño fondo que no influya en el resultado del ensayo que asegura que no se sobre emulsifico la pieza.

D) Lavado

La cuarta etapa del proceso de emulsificación es el lavado que en otras palabras sería la remoción de exceso de penetrante. Este lavado estará condicionado al paso anterior (Difusión) que determinará la efectividad del lavado.

Este proceso de lavado se efectúa con agua y se deben seguir las recomendaciones de lavado que se detallaran en el capítulo 7.

E) Superficie Limpia

La última etapa de este proceso sería tener la superficie limpia que básicamente significa limpia de exceso de penetrante para la aplicación del revelador. Dependiendo del tipo de revelador se necesitará secar o no la superficie para una correcta aplicación del revelador, pero esto será detallado en el capítulo 7.

4.1 Tipos de Emulsificadores Lipofílicos

Existen tres tipos de emulsificadores lipofílicos. Los de alta viscosidad, los de baja viscosidad y los de baja viscosidad sin azufre.

Emulsificador Lipofílico de Baja Viscosidad: A continuación, mencionamos las consideraciones:

- ✓ Son utilizados para detectar defectos finos.
- ✓ Actúan de una manera más rápida en comparación a los de alta viscosidad.
- ✓ Es adecuado para la implementación en superficies rugosas ya que se difunde más rápido y por lo tanto tiene la capacidad de llegar más rápido al fondo de la rugosidad en comparación a los de alta viscosidad.

Emulsificador Lipofílico de Baja Viscosidad sin Azufre: A continuación, mencionamos las consideraciones:

- ✓ Este tipo de emulsificador tiene las mismas consideraciones que el de baja viscosidad a excepción del hecho de que no tiene azufre. La presencia de azufre puede afectar a las aleaciones de Níquel cuando son sometidas a calor, generando fragilización en el material.

Emulsificador Lipofílico de Alta Viscosidad: A continuación, mencionamos las consideraciones:

- ✓ Son utilizados para detectar defectos abiertos y poco profundos.
- ✓ No son adecuados para su utilización en superficies rugosas.

4.2 Características generales de los emulsificadores lipofílicos

En esta sección hablaremos sobre algunas características importantes de conocer sobre este tipo de emulsificadores.

- ✓ **Dilución:** El emulsificador de tipo lipofílico viene en una presentación lista para usar.
- ✓ **Tolerancia al Agua:** El emulsificador lipofílico tiene una capacidad de tolerar 5% de agua en su constitución. Si ese porcentaje es mayor el emulsificador deberá ser desechado.
- ✓ **Tolerancia al Penetrante:** El emulsificador lipofílico tiene una capacidad de tolerancia de hasta el 20%. Luego de eso su rendimiento se verá afectado.



- ✓ **Proceso de Acción:** El emulsificador lipofílico tiene dos procesos de acción. Pero la remoción como tal se genera por el lavado con rociado de aire/agua.
 - **Acción Mecánica:** El proceso de acción mecánico es el proceso de “remoción” que ocurre por el propio drenado del emulsificador que arrastra parte del penetrante.
 - **Acción Química:** El proceso químico es propiamente el proceso de difusión que ocurre entre el emulsificador y el penetrante.

- ✓ **Tiempo de Emulsificación:** El tiempo de emulsificación es clave para tener buenos resultados en la prueba. Un tiempo de emulsificación inadecuado generara pérdidas de sensibilidad en la prueba.

- ✓ **Residuos:** Los residuos que se generan por la presencia del emulsificador es muy importante de tomar en cuenta ya que se generan residuos de alto contenido de aceite mineral que debe ser debidamente tratado para ser desechado. Ese tratamiento suele ser costoso.

- ✓ **Facilidad de Lavado:** El lavado sabemos que es el proceso de remoción, pero para los líquidos penetrantes emulsificables lipofílicos es proceso de lavado se verá afectado por la viscosidad, actividad y tolerancia al agua del emulsificador.

- ✓ **Actividad:** La actividad es la rapidez con la que se realiza la emulsificación para la subsecuente remoción con agua.

- ✓ **Viscosidad:** La viscosidad del emulsificador puede variar entre 10 y 100 centistokes. La velocidad de difusión es dependiente de la viscosidad, la difusión disminuye al aumentar la viscosidad.

5. Emulsificación en Líquidos Penetrantes Postemulsificables Hidrofílicos

Para entender cómo funciona la emulsificación en líquidos penetrantes postemulsificables hidrofílicos podemos observar la siguiente figura.

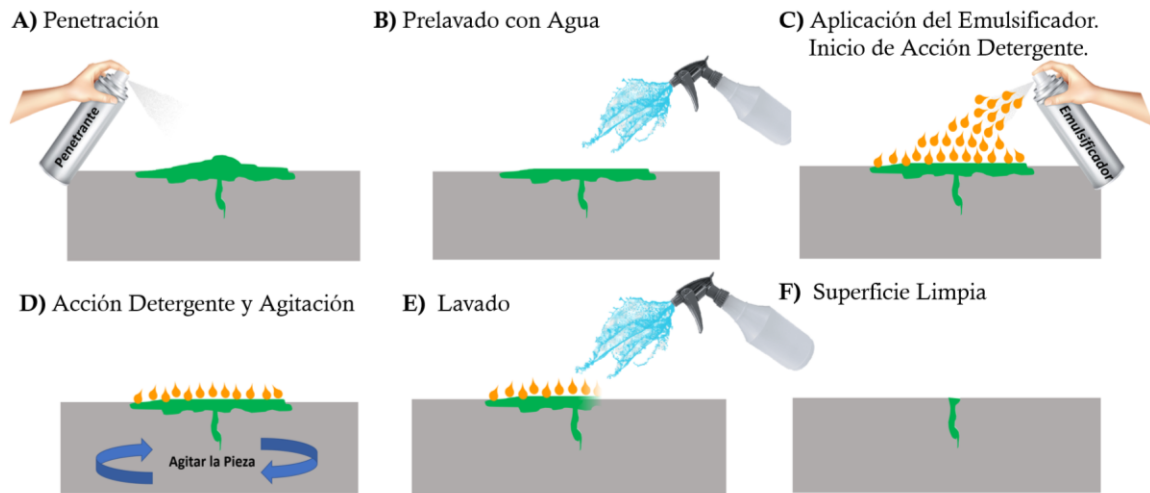


Figura 6.1 Emulsificación Hidrofílica en Líquidos Penetrantes

En la figura anterior observamos que hay 6 etapas bien definidas en este proceso. Expliquemos cada una de ellas.

A) Penetración

El proceso de penetración es simplemente la aplicación del líquido penetrante en la superficie de la prueba evaluada. Dentro de la penetración hay que tomar en cuenta el tiempo de penetración que variara dependiendo de las condiciones.

B) Prelavado con Agua

En esta etapa se procede a realizar un prelavado con agua, recordemos que el emulsificador hidrofílico es afín con el agua y no hay ningún problema que el emulsificador entre en contacto con el agua (a diferencia del lipofílico).

Debido al hecho que es afín se puede aprovechar para realizar un prelavado con agua. Este prelavado básicamente nos permite eliminar el exceso de penetrante que pueda salir fácilmente. Evidentemente no haremos un lavado adecuado por el hecho que no se encuentra emulsificado.

C) Aplicación del Emulsificador. Inicio de Acción Detergente

D) Acción Detergente y Agitación

En estas etapas se aplica el emulsificador. La emulsificación en este caso ocurre por acción detergente. Ese fenómeno detergente lo podemos asociar a exactamente el mismo fenómeno que sucede cuando limpiamos los platos luego de comer.

Lo que sucede en la acción detergente es que la parte lipofílica de la molécula interactúa con la capa de penetrante y se genera una capa fina de penetrante emulsionado.

Posteriormente se debe agitar la pieza para eliminar esa capa de penetrante emulsionado para removerla y permitirle al emulsificador entrar en contacto con penetrante que aún no se encuentra emulsionado.

Con respecto al tiempo de emulsificación es más fácil de determinar en comparación con el emulsificante lipofílico. Más adelante se detalla este punto.

E) Lavado

La etapa de lavado simplemente consta de limpiar con agua la pieza evaluada. Esto removerá el penetrante emulsionado.

Recordemos que el emulsificador es afín al agua entonces en el caso de que el proceso de emulsión no haya sido adecuado la pieza puede nuevamente ser sometida al emulsificador y repetir el paso de acción detergente y agitación para finalmente repetir el lavado.

F) Superficie Limpia

La última etapa de este proceso sería tener la superficie limpia que básicamente significa limpia de exceso de penetrante para la aplicación del revelador. Dependiendo del tipo de revelador se necesitará secar o no la superficie para una correcta aplicación del revelador, pero esto será detallado en el capítulo 7.

5.1 Forma de Aplicación del Emulsificador Hidrofílico

La aplicación del emulsificador hidrofílico puede ser por inmersión o por pulverizado. Evidentemente las formas y aplicación son diferente pero el punto más importante a comparar es la concentración de emulsificante que se encontrara en cada una de estas presentaciones.

- ✓ Inmersión 20% de concentración.
- ✓ Spray 1 al 5% de concentración. Tiempos más cortos de emulsión.

La aplicación mediante spray es más activa ya que tiene la acción química normal del emulsificador que también está presente en la inmersión, pero de manera adicional tiene la acción mecánica.

Esa acción mecánica es por el impacto del spray. Que tan fuerte sea esta acción mecánica variara dependiendo de la presión del agua.

Este es el motivo por el cual en forma de spray la concentración debe ser menor.

5.1.1 Inmersión del Emulsificador Hidrofílico

La inmersión con el proceso de emulsificación es una buena opción debido a que, al sumergir toda la pieza, en principio, el tiempo de contacto será casi igual en toda su extensión lo cual para los efectos de la técnica de inspección es adecuado.

Ahora bien, hay un problema en utilizar la inmersión cuando las piezas son largas. Normalmente cuando las piezas son largas y/o grandes la velocidad con la que sumerge la pieza es lenta y, por lo tanto, hace que los tiempos de contacto a lo largo del objeto evaluado sean diferentes generando un problema en la inspección.

5.1.2 Aplicación por Spray del Emulsificador Hidrofílico

La aplicación por pulverizado es la aplicación de emulsificador a través de un rociado sobre la superficie de la pieza evaluada.

Este tipo de aplicación tiene dos ventajas principales sobre el proceso de inmersión, estas son:

- ✓ Se utiliza una concentración menor del emulsificante. Esto hará que el emulsificador rinda más y por otra parte los tiempos de emulsificación serán mayores (esto puede ser beneficioso para controlar el proceso).
- ✓ La otra ventaja del proceso de pulverizado es el hecho de que el emulsificador no se “recicla”. Cada vez que se utiliza el emulsificador es un producto nuevo cada vez que se implementa. Si pensamos en inmersión el emulsificador se queda en el tanque.

Por otra parte, podemos hablar de las desventajas de utilizar pulverización para la aplicación del emulsificador:

- ✓ Cuando se aplica el emulsificador por pulverizado sobre piezas muy grandes o con formas complejas es muy difícil asegurar que el tiempo de contacto del emulsificador será igual a lo largo de toda la pieza.
- ✓ Otro problema que se puede generar con el pulverizado es que al aplicar el rociado sobre el componente de manera homogénea se genera una película continua, esto es lo ideal. Pero el problema de esto es que por gravedad el fluido hará que el emulsificador escurra generando que las áreas inferiores reciban más emulsificador y probablemente generando sobre emulsificación en esta zona.

5.2 Tiempo de Aplicación del Emulsificador Hidrofílico

La forma de determinar el tiempo de emulsificación es de la siguiente manera

Se empieza con tiempo corto, se saca del emulsificador y se humedece con agua. En caso de que la emulsificación no haya sido suficiente se procede a colocar nuevamente la pieza sobre



el emulsificado ya que no hay problema con el agua ya que es afín. Se repite el proceso hasta obtener una emulsificación adecuada. El problema es si te excedes con la emulsificación.

5.3 Características generales de los emulsificadores hidrofílicos

En esta sección hablaremos sobre algunas características importantes de conocer sobre este tipo de emulsificadores.

- ✓ **Dilución:** El emulsificador de tipo hidrofílico debe ser diluido en agua. Dependiendo de su forma de aplicación la concentración variara.
 - **Pulverizado:** 1 al 5% de concentración.
 - **Inmersión:** 20% de concentración.
- ✓ **Tolerancia al Agua:** El emulsificador lipofílico tiene una capacidad de tolerar 5% de agua en su constitución. Si ese porcentaje es mayor el emulsificador deberá ser desechado.
- ✓ **Tolerancia al Penetrante:** La tolerancia con respecto al penetrante varía dependiendo de la concentración que tenga el emulsificador. La tolerancia suele ser de entre 1 y 5% en volumen cuando la concentración del emulsificador es del 10%.
- ✓ **Proceso de Acción:** El emulsificador hidrofílico tiene dos procesos de acción, química y mecánica. Importante recordar que no hay difusión.
 - **Acción Química:** El emulsificador descompone al penetrante en las distintas micelas que se generan y evita que se reagrupen con el penetrante. Permitiendo la fácil remoción mediante la acción mecánica.
 - **Acción Mecánica:** El proceso de acción mecánico es el proceso de “remoción” de ese penetrante emulsificado. Esto permite que el emulsificador entre en contacto con nuevo penetrante.
- ✓ **Tiempo de Emulsificación:** El tiempo de emulsificación es sumamente importante para tener buenos resultados, pero no es una variable crítica debido a que como el emulsificador es tolerable al agua el proceso de emulsificación se puede repetir sin afectar el proceso (el problema es si se excede el tiempo de emulsificación).
- ✓ **Residuos:** Los residuos que se generan por la presencia del emulsificador hidrofílico no genera residuos de aceite mineral por lo tanto el tratamiento sería como tratar agua y es mucho más fácil de manejar en comparación al emulsificador lipofílico.

5.4 Concentración del Emulsificador Hidrofílico

Como observamos anteriormente el emulsificador hidrofílico debe ser diluido en agua y la concentración dependerá de la forma de aplicación.

Ahora bien, garantizar la concentración correcta del emulsificador es sumamente importante para tener buenos resultados en la inspección.

De manera general podemos decir que a medida que la concentración es menor el tiempo de emulsificación del penetrante será mayor. Pero recordemos que la selección de la concentración no va atada al tiempo de emulsificación únicamente sino a la forma en cómo se aplica.

5.4.1 Verificación de la Concentración

La concentración se verifica con una herramienta llamada refractómetro. Esta herramienta es utilizada para medir el índice de refracción generada por el material evaluado. En la siguiente figura se aprecia un refractómetro.



En la figura anterior se aprecia un refractómetro y como observamos tiene una tabla de medición que dará los valores. Esta medición se realiza en grados brix.

Con el refractómetro se puede medir el índice de refracción de la solución de emulsificador y ese índice de refracción se puede relacionar con la concentración del emulsificador hidrofílico. Esto se debe a que las distintas concentraciones generaran un cambio en la dirección de la luz y por lo tanto una variación del índice de refracción que luego se puede asociar con la concentración.

Ahora bien, para asociar ese índice de refracción con la concentración se deberá realizar una curva de calibración que asocie las distintas concentraciones con los distintos índices.

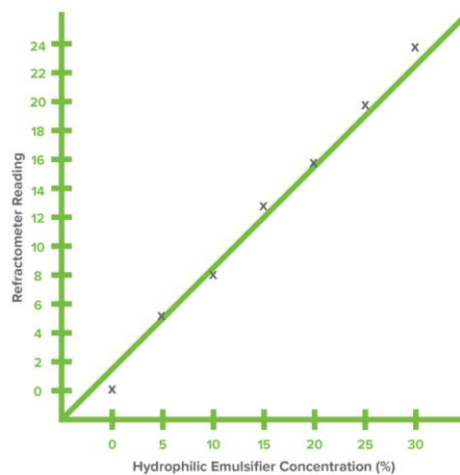
La medición no es directa. El refractómetro lee grados brix y luego hay que relacionar ese valor con la concentración de emulsificante y agua

Para generar la curva de calibración tenemos que utilizar diluciones del emulsificador con concentraciones conocidas y evaluarlas con el refractómetro y en función de esos valores generar la curva de calibración.



En la figura anterior podemos observar seis diluciones con distintas concentraciones, desde 5% hasta 30%.

En función de los resultados del índice de refracción colocamos esos resultados en una gráfica de índice vs. Concentración y luego de tener esos valores procedemos a realizar una línea recta que mejor se ajuste a dichos valores. Esto lo podemos apreciar en la siguiente figura.



De esta grafica que podemos observar se puede fácilmente relacionar el índice de refracción con la concentración, pero de manera adicional se puede calcular la ecuación de la recta de esta curva para poder tener los valores más exactos desde un punto de vista matemático.

Capítulo 6: Reveladores

1. Propiedades de los Reveladores

El revelador es el componente de la inspección mediante líquidos penetrantes que extraerá el líquido penetrante atrapado en las discontinuidades. Existen distintos tipos de reveladores que brindaran beneficiosos a su implementación.

Los reveladores tienen dos grandes funciones independientemente de la forma del revelador:

1. Extraer el penetrante.
2. Generar el contraste para poder visualizar el penetrante.

De manera general estableceremos algunas propiedades que debería tener un buen revelador.

- ✓ El revelador debe ser absorbente para generar una buena acción capilar para la extracción.
- ✓ Debe estar constituido por partículas finas para producir indicaciones bien definidas y brindando la mejor resolución en el ensayo.
- ✓ Cuando la técnica de inspección utiliza un penetrante visible el revelador deberá ser capaz de generar un buen fondo para maximizar el contraste entre el líquido y color blanco del revelador.
- ✓ Debe ser capaz de generar una superficie uniforme a lo largo de toda su extensión.
- ✓ Poderse aplicar fácilmente.
- ✓ El penetrante debe ser capaz de mojar el revelador fácilmente.
- ✓ Cuando la técnica de inspección utiliza un penetrante fluorescente el revelador no debe ser fluorescente.
- ✓ Debe ser fácilmente removible para la limpieza final.

2. Formas de Aplicación



La forma en cómo se aplique el revelador deberá ser seleccionada en función de la técnica utilizada y en las ventajas y limitaciones que brinde cada forma de aplicación. En la siguiente tabla observamos las formas de aplicación según la AMS 2644.

Forma de Aplicación del Revelador	
Forma a	Polvo seco
Forma b	Revelador soluble en agua
Forma c	Revelador en suspensión acuosa
Forma d	Revelador no acuoso
Forma e	Revelador de aplicación específica

Cada una de las formas de aplicación que se aprecian en la tabla anterior serán desarrolladas a lo largo de este capítulo.

Ahora bien, la forma de aplicación es de suma importancia, pero independientemente de la forma podemos hablar de su aplicación sobre penetrantes visibles y fluorescentes y el objetivo de cada una de esas aplicaciones.

Reveladores en Penetrantes Visibles: En el caso de los penetrantes visibles se requiere aplicar una capa delgada sobre el material evaluado. En primer lugar, sabemos que la capa como tal generara el contraste para poder detectar las discontinuidades, pero el hecho de que esa capa debe ser delgada es crucial. Debe ser delgada debido a que si la capa es muy gruesa dificultará la visualización del penetrante en el revelador y por lo tanto disminuirá la sensibilidad de la prueba.

Reveladores en Penetrantes Fluorescentes: En el caso de los líquidos penetrantes fluorescentes el objetivo del revelador, además de extraer el penetrante, es de generar el contraste inverso al que se tiene en los penetrantes visibles. Para ello se busca una capa de revelador delgada pero además debe ser una capa tenue que inclusive permita ver el brillo del metal.

Antes de explicar cada uno de los tipos de revelador que podemos utilizar mostraremos la siguiente tabla, en la que se muestra que reveladores se pueden utilizar con que tipos de penetrantes.

Penetrante	Técnica	Revelador				
		Seco	Soluble	Suspendible	No Acuoso	Aplicación Especifica



		Forma a	Forma b	Forma c	Forma d	Forma e
Tipo I Fluorescente	A	X		X	X	
	B	X	X	X	X	
	C	X	X	X	X	
	D	X	X	X	X	
Tipo II Visibles	A			X	X	
	B			X	X	
	C			X	X	
	D			X	X	

Tal y como se aprecia en la tabla anterior no todos los reveladores pueden ser implementados con ambos tipos de penetrantes. Los motivos o las razones para esta tabla estarán explicados en cada una de las secciones de cada forma de revelador.

Otro punto que es importante tomar en cuenta con respecto a la forma del revelador es a la manera en cómo se ejecuta la aplicación de ese revelador porque la forma del revelador no es la manera en que se aplica.

Algunas de las maneras en cómo se aplica el revelador son:

- ✓ Inmersión
- ✓ Pulverizado
- ✓ Nube de Polvo
- ✓ Nube de Polvo (Electrostática)

Estas maneras de aplicación tendrán un impacto en la sensibilidad que aportara el revelador en la inspección. A continuación, se presenta una tabla en donde se aprecian las formas del revelador con su método de aplicación y su ranking de sensibilidad.

Ranking de Sensibilidad #	Forma del Revelador	Método de Aplicación
1	No Acuoso	Pulverizado
2	Película Plástica	Pulverizado
3	Soluble en Agua	Pulverizado
4	Suspendible en Agua	Pulverizado

5	Soluble en Agua	Inmersión
6	Suspendible en Agua	Inmersión
7	Seco	Nube de Polvo (Electrostática)
8	Seco	Cama Fluidizada
9	Seco	Nube de Polvo
10	Seco	Inmersión

3. Formas de Acción de los Reveladores

Sabemos que los reveladores tienen dos grandes funciones que son extraer el penetrante y generar el contraste con el fondo, pero los mecanismos a través de los cuales ejecutan la acción de extraer el penetrante aun no los conocemos.

Es importante recalcar que el mecanismo de acción de los reveladores no es un mecanismo único sino el resultado de un conjunto. Además, dependiendo el revelador los mecanismos de acción pueden variar.

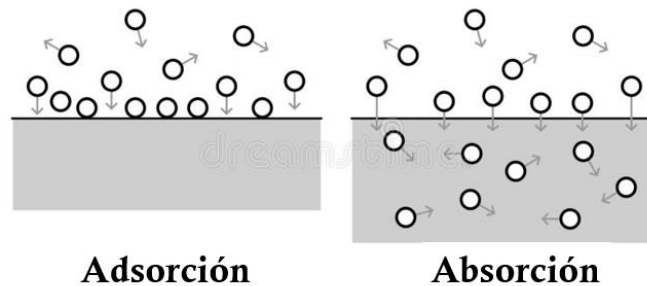
3.1 Absorción y Adsorción

Los mecanismos de adsorción y absorción no son propiamente formas a través de las cuales el revelador extrae el penetrante, pero son esenciales para el correcto funcionamiento del revelador. Definamos cada una.

Adsorción: La adsorción es la acumulación por adhesión en una superficie.

Absorción: La absorción es la asimilación del líquido por un material absorbente.

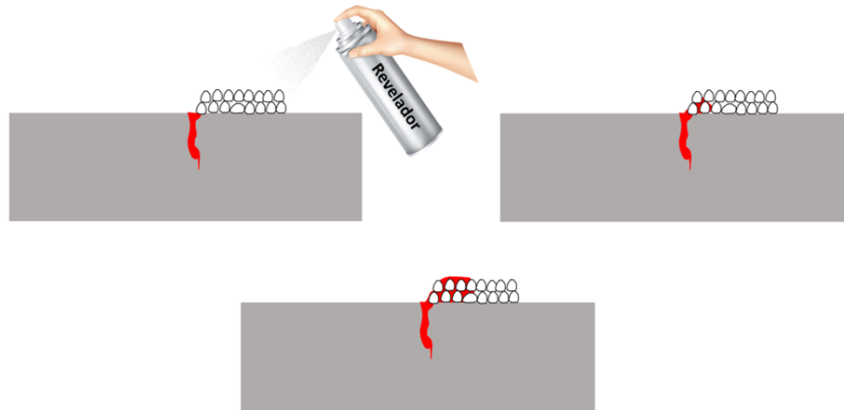
Para ejemplificar estos ejemplos veamos la siguiente figura.



Como se observa en la figura anterior la adsorción es el fenómeno de acumulación de partículas y la absorción el fenómeno de asimilación en un material absorbente. Pero para aplicar estos conceptos en el revelado del líquido penetrante tenemos que asociarlo con el proceso como tal.

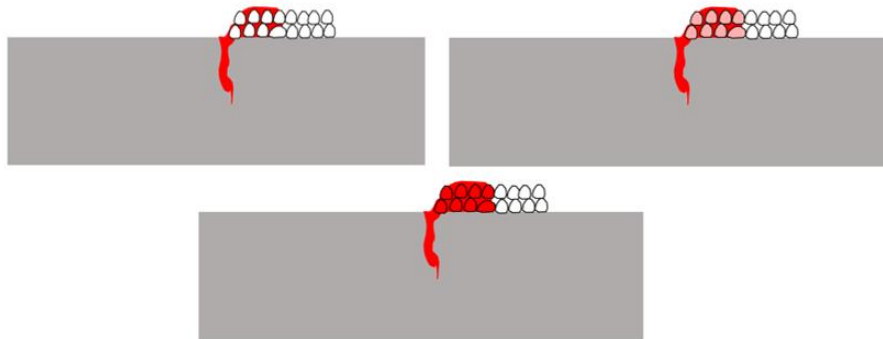
Empecemos con la adsorción, básicamente lo que genera es la acumulación de un líquido en la superficie exterior de una partícula debido a las fuerzas adhesivas que se generan entre

sí. Entonces si asociamos esto con la salida del penetrante de la discontinuidad lo que va a suceder es que el líquido penetrante se va a adherir a las partículas sólidas del revelador generando la acumulación y permitiéndole al inspector determinar la ubicación de la discontinuidad. En la siguiente figura se puede apreciar este fenómeno.



Tal y como se aprecia en la figura anterior el penetrante que escapa la discontinuidad se adhiere a las partículas sólidas del revelador.

El proceso de absorción se podría pensar como un proceso de difusión del penetrante sobre el revelador. Básicamente sería la “coloración” del penetrante. Esto se puede ejemplificar en la siguiente figura.



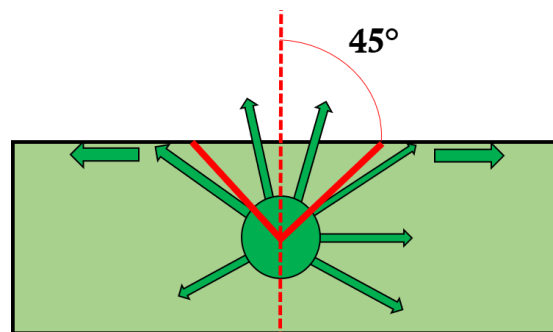
3.2 Capilaridad

Al igual que el penetrante ingresa en las discontinuidades por el efecto capilar también sale por el mismo efecto. Ahora bien, este efecto capilar es producido por la presencia del revelador.

El revelador logra ese efecto capilar a través de la porosidad que tienen las partículas de revelador. Esa porosidad genera que queden espacios vacíos de aire que generan un “tubo” capilar más fino que el generado por la discontinuidad y por lo tanto permite la salida de los penetrantes.

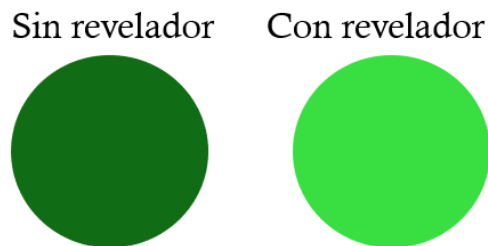
3.3 Dispersión de Luz

Esta propiedad que tienen los reveladores es sumamente importante para las aplicaciones de líquidos penetrantes fluorescentes. Esta propiedad mejora fuertemente el brillo que es generado por la fluorescencia del líquido penetrante. Si recordamos cuando se desarrolló la sección de líquidos penetrantes fluorescentes solamente la luz que se encuentre a un ángulo menor de 45 grados podrá escapar de la capa de penetrante y el resto se pierde. Tal y como se aprecia en la siguiente figura.



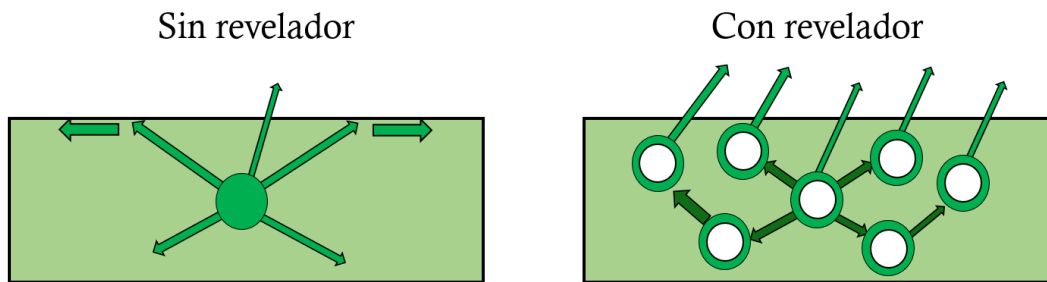
Como se observa en la figura anterior solamente un porcentaje pequeño es visible producto de esta trampa de luz. Si queremos ir un poco más al detalle la cantidad de luz fluorescente que queda atrapada es próximo al 90%, si se pierde un 90% de la generación de fluorescencia es evidente que se perdería muchísima sensibilidad.

Pero aquí es donde entra la acción de dispersión de luz que aporta el revelador. En la siguiente figura podemos observar este fenómeno.



Lo que se aprecia en la figura anterior es un aumento del brillo del líquido fluorescente producto de la dispersión de la luz mejorando así la sensibilidad.

El mecanismo de dispersión se basa en un efecto que ya mencionamos, la adsorción. La adsorción hará que el líquido penetrante se adhiera al revelador generando una esfera de revelador cubierta por penetrante fluorescente. Estas múltiples esferas lo que harán es aumentar el efecto de la reflexión y de manera consiguiente romper esa trampa de luz debido a la gran cantidad de ángulos generados por todas las esferas. Este fenómeno se puede apreciar en la siguiente figura.



3.4 Acción Solvente

La acción solvente es una propiedad que solamente tienen los reveladores no acuosos ya que esta propiedad viene de la base de solvente del revelador.

Lo que genera la acción solvente es que el solvente se combina con el penetrante, lo atrapa y lo diluye.

Al diluirse el penetrante aumenta su volumen y reduce su viscosidad al salir de la discontinuidad. Esto mejora la visibilidad de la discontinuidad.

Debido a esta acción solvente los reveladores no acuosos son los mejores reveladores desde un punto de vista de sensibilidad. Aunque la sensibilidad global del sistema dependerá si se utiliza penetrante visible o fluorescente.

4. Revelador Seco – Forma a

Los reveladores secos como lo dice su nombre está conformado por partículas secas y por lo tanto su presentación es en forma de polvo. La granulometría de estas partículas varía entre 0,1µm a 15 µm de diámetro.

Este revelador es solamente útil para los líquidos penetrantes fluorescentes y esto se debe a que las especificaciones prohíben el uso de este revelador con penetrantes visibles debido a que su utilización con este tipo de penetrante no generara un fondo blanco de contraste lo suficientemente adecuada.

Si recordamos lo mencionado en la sección anterior en los penetrantes fluorescentes se busca una capa delgada y tenue. La forma de polvo de este revelador generara una capa necesariamente tenue. Claro está, si se utiliza mucho revelador seco se podría tener un buen contraste, pero recordemos que tanto en visible como en fluorescente la capa debe ser delgada. Así que definitivamente podemos decir que el revelador seco es útil solamente para los penetrantes fluorescentes.

Desde un punto de vista de sensibilidad en la inspección este revelador es el menos sensible pero esta forma es útil cuando otros reveladores no son compatibles con la pieza evaluada.

El revelador seco puede ser aplicado de distintas formas, estas se presentan a continuación.

Pulverización / Espolvoreo

- ✓ Esta forma de aplicación no permite aplicar una capa delgada del revelador. Se agrega mucho revelador a la pieza y normalmente se debe remover ese exceso.
- ✓ La remoción del exceso del revelador podría generar la remoción de penetrante atrapado en las discontinuidades y afectar la confiabilidad de la prueba.

Pulverización electrostática

- ✓ Las partículas son cargadas eléctricamente con una diferencia de potencial de 30 a 90 kV. Luego se empujan con aire comprimido a través de una pistola diseñada para estos fines. Debido al diferencial eléctrico se conectan con la superficie más cercana conectada a tierra.

- ✓ Un problema visible de esta aplicación es que normalmente no solamente la pieza sometida a la prueba se encuentra conectada a tierra.

Inmersión

- ✓ Esta forma de aplicación es básicamente sumergir la pieza en el revelador seco.

5. Revelador Húmedo Acuoso – Forma b y c

Los reveladores húmedos acuosos son reveladores que su constitución es basada en agua. Se tienen dos formas húmedas acuosas, la forma b que es la forma soluble en agua y la forma c que es la forma Suspensible en agua.

Todos los reveladores acuosos contienen algunos componentes en su constitución que son esenciales para su durabilidad y estabilidad. Estos componentes son biocidas, inhibidores de corrosión y agentes humectantes.

La presencia de estos componentes en los reveladores acuosos se debe a que estos tipos de reveladores tienen la tendencia de deteriorarse durante el almacenamiento producto de la reacción de los inhibidores de corrosión con algunos elementos esenciales del revelador.

Por otra parte, los reveladores solubles en agua son susceptibles al ataque de bacterias y hongos, es por ello la presencia de biocidas.

La mejor forma de aplicación de estos tipos de reveladores es mediante inmersión, seguido del drenaje de la pieza y un secado en un horno.

Aunque también se pueden implementar mediante el uso de pulverización.

La aplicación de este tipo de revelador no requiere de un proceso de secado previo a la colocación del revelador sobre la pieza evaluada.

De manera general podemos mencionar las siguientes ventajas:

- ✓ Este revelador es más barato que el no acuoso.
- ✓ No se generan vapores a diferencia del revelador no acuoso.

De manera general podemos mencionar las siguientes desventajas:

- ✓ Difícil de aplicar una capa uniforme.
- ✓ Requiere del secado de la pieza luego de la aplicación.
- ✓ Se debe realizar la mezcla adecuada.

5.1 Soluble en Agua – Forma b

El revelador húmedo acuoso soluble en agua viene en una presentación de polvo que debe ser mezclado con agua, de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

Dicho polvo se disolverá en el agua y solamente requiere de agitación durante el proceso de preparación de la solución.

Este tipo de revelador solamente se puede utilizar con penetrantes fluorescentes. No se pueden utilizar con penetrantes visibles debido a que no generaran suficiente contraste para la evaluación (Ocurre igual que en los reveladores secos).

La norma ASTM E1417 establece que el revelador soluble en agua no debe usarse con penetrantes Tipo II y la Técnica A del Tipo I.

Se recomienda que este tipo de revelador se utilice con penetrantes fluorescentes postemulsificables o al menos con penetrantes no lavables con agua.

El motivo por el cual no se puede utilizar con técnicas lavables con agua es que el revelador soluble en agua podría actuar como un emulsificador adicional y eliminar el penetrante.

5.2 Suspensible en Agua – Forma c

El revelador húmedo acuoso suspendible en agua viene en una presentación de polvo que debe ser mezclado con agua, de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

Este polvo no se disuelve, sino que las partículas quedan en suspensión y por lo tanto la agitación debe ser constante para mantener una concentración homogénea en el revelador.

Este tipo de revelador puede ser utilizado con los penetrantes visibles y fluorescentes debido a que la presencia de las partículas en forma de suspensión si producirán un recubrimiento adecuado para el contraste en ambas técnicas.

Este tipo de revelador tiene agentes dispersantes en su composición para reducir la formación de grumos de revelador y que la suspensión sea la adecuada. Por otra parte, también tienen en su formulación agentes humectantes e inhibidores de corrosión.

6. Revelador Húmedo No Acuoso – Forma d

Este tipo de revelador son suministrados en una presentación que es lista para su uso. La forma preferida para este tipo de revelador es mediante pulverizado mediante latas debido a la facilidad de uso por parte de los operadores.

Este tipo de revelador contiene partículas de revelador suspendidas en un solvente volátil y debe ser mezclado previo a su uso para garantizar una buena concentración.

Cuando se aplica este revelador la suspensión de polvo blanco generara un recubrimiento sobre la pieza inspeccionada una vez que el solvente volátil se evapore. Un requerimiento



para la correcta aplicación de este revelador es que la pieza inspeccionada debe encontrarse seca.

Este tipo de revelador puede ser implementado con penetrantes visibles y fluorescentes.

Capítulo 7: Procesos de Líquidos Penetrantes

Hay muchas características de las piezas a inspeccionar que influyen en la selección de la técnica. Aunado a esto, el costo y sensibilidad de cada técnica varían y son importantes a la hora de la selección.

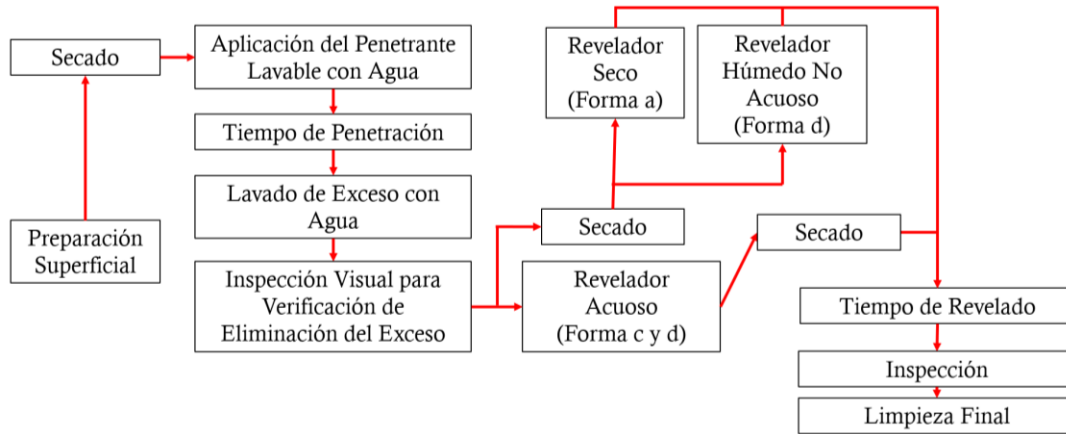
Usualmente las técnicas con mayor sensibilidad son también más costosas. Pero el requerimiento de cada una depende totalmente de la necesidad del estudio aplicado, es por esto que es imprescindible el conocimiento sobre las técnicas para determinar cuál es la mejor opción.

Las técnicas de inspección (en orden creciente de sensibilidad y costo), son:

1. Penetrantes visibles lavables con agua.
2. Penetrantes visibles removibles con solvente.
3. Penetrantes visibles postemulsificables.
4. Penetrantes fluorescentes lavables con agua.
5. Penetrantes fluorescentes removibles con solvente.
6. Penetrantes fluorescentes postemulsificables.

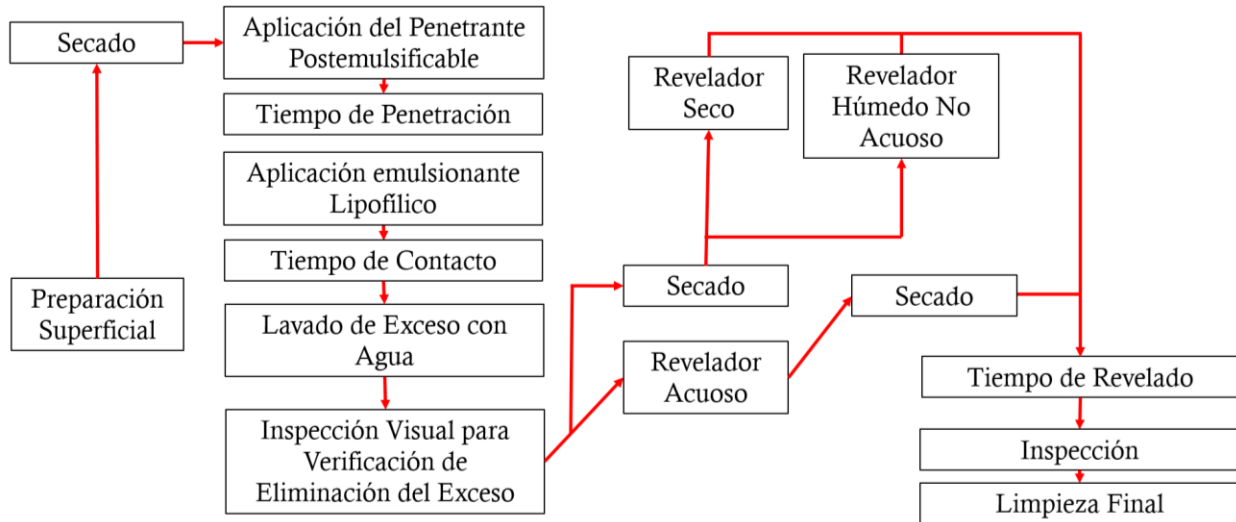
1. Proceso Lavable con Agua

De manera general podemos ver en la siguiente figura los pasos en la técnica de líquidos penetrantes lavables con agua.



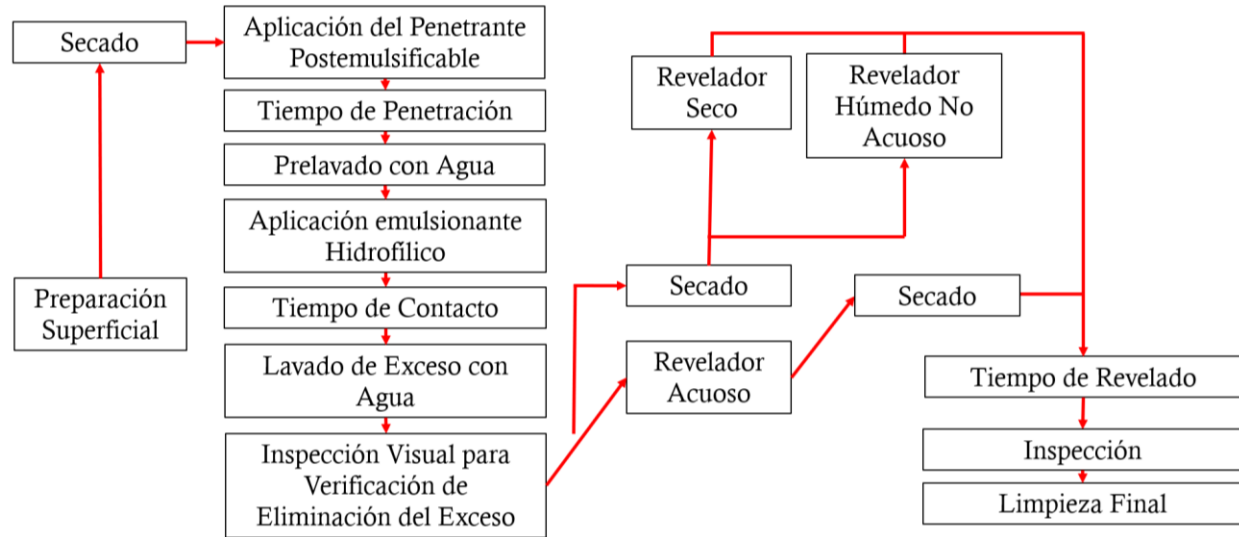
2. Proceso Penetrante Lipofílico

De manera general podemos ver en la siguiente figura los pasos en la técnica de líquidos penetrante postemulsificable lipofílico.



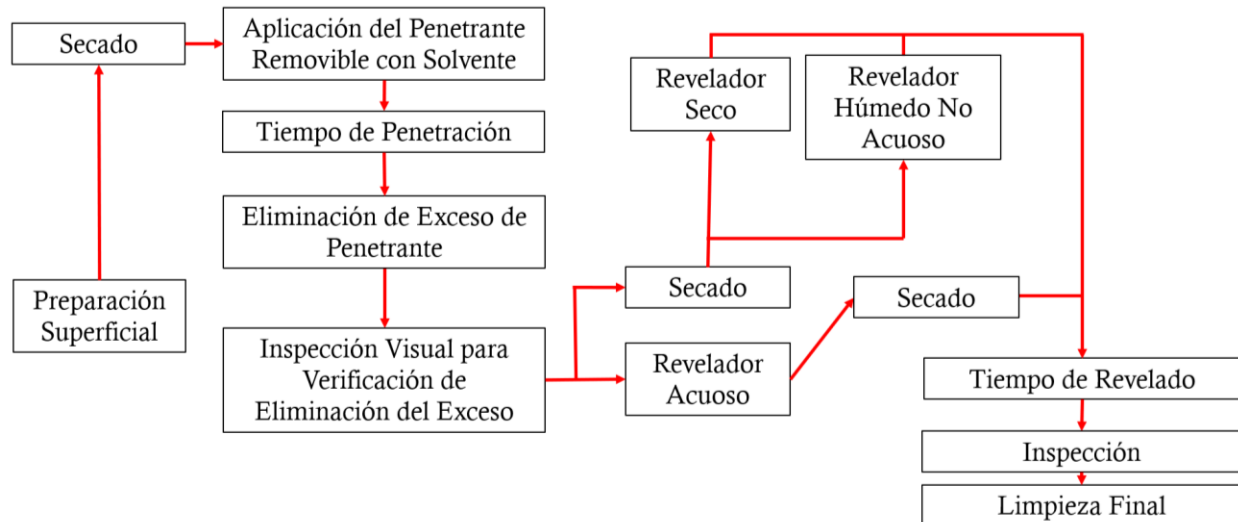
3. Proceso Penetrante Hidrofílico

De manera general podemos ver en la siguiente figura los pasos en la técnica de líquidos penetrante postemulsificable hidrofílico.



4. Proceso Penetrante Removible con Solvente

De manera general podemos ver en la siguiente figura los pasos en la técnica de líquidos penetrante removible con solvente.



4.1 Procedimiento para remover el penetrante de una superficie con solvente

Los removedores de líquidos penetrantes se utilizan para eliminar el exceso de líquido penetrante de la superficie después de la aplicación de líquido penetrante. Debido a que los removedores funcionan mediante la acción del solvente, la eliminación excesiva puede ser un problema si el removedor se usa en exceso. El procedimiento de extracción de la toallita de manos recomendado incluye los siguientes pasos.

1. Limpie las superficies del objeto de prueba con un instrumento de limpieza en seco, como un trapo seco o papel absorbente suave.
2. Elimine los residuos de líquidos penetrantes restantes limpiando con un instrumento de limpieza humedecido con disolvente.
3. Limpiar nuevamente con un trapo seco o papel absorbente para eliminar cualquier película de solvente que quede en las superficies.

Cuando se examinan discontinuidades finas y poco profundas en superficies lisas, como paneles de prueba con cromado agrietado, es suficiente limpiar en seco. El uso de cualquier removedor resultará en una eliminación excesiva de los residuos de líquidos penetrantes y la consiguiente pérdida de sensibilidad. Precaución. La técnica de limpieza manual es difícil de usar en piezas de prueba con superficies rugosas o en huecos como roscas debido a la dificultad de limpiar el fondo de huecos pequeños y afilados o limpiar ranuras profundas. Además, el paño o el papel de limpieza solo deben humedecerse ligeramente con disolvente para la eliminación final de los residuos de líquidos penetrantes de la superficie. Nunca

sumerja el paño en solvente ni lo sature con solvente rociado cuando elimine el exceso de líquido penetrante de la superficie de las piezas de prueba. El exceso de disolvente se difundiría entonces en los atrapamientos de líquido penetrante dentro de las discontinuidades y tendería a eliminar parte o todo el líquido penetrante necesario para formar indicaciones de discontinuidad.