

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
Departamento de Ingeniería Química



TESIS DOCTORAL

Influencia del substrato en las propiedades ópticas de las marcas viales

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Emiliano Moreno López

DIRECTOR:

Manuel Blanco Fernández

Madrid, 2015

66.0
BLA



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

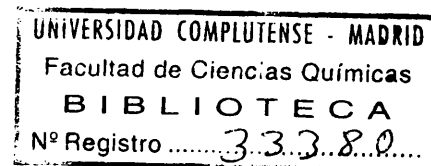


5322344363

Tesis Doctoral

INFLUENCIA DEL SUBSTRATO EN LAS PROPIEDADES OPTICAS DE LAS MARCAS VIALES

EMILIANO MORENO LOPEZ



Director de la Tesis Doctoral

MANUEL BLANCO FERNANDEZ

MADRID, 1991

El presente trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Prof. Dr. D. Manuel Blanco Fernández, a quien deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento.

Quede constancia de mi reconocimiento al Centro de Estudios y Experimentación de obras Públicas (CEDEX) por haberme permitido disponer de los medios necesarios para la realización del trabajo, así como al Prof. Dr. D. Fernando Mirada Coronel por su constante apoyo durante el tiempo empleado en la redacción de esta memoria.

Por último deseo hacer constar mi gratitud a la empresa Grupo de Pinturas Industriales (GRUPISA) por su altruista e inestimable colaboración.

A mi familia

INDICE.

Paq.

1. Introducción.	
2. Antecedentes.....	2
2.1. Desarrollo histórico.....	2
2.2. Funciones de la señalización.....	4
2.3. Otros aspectos importantes de la señalización horizontal.....	6
2.3.1. Seguridad.....	6
2.3.2. Visuales.....	7
2.4. Características y criterios de calidad.....	8
3. Componentes de una marca vial.....	10
3.1. Materiales base.....	10
3.1.1. Vehículo fijo.....	10
3.1.2. Pigmentos y cargas.....	22
3.1.3. Vehículo volátil.....	26
3.1.4. Aditivos.....	27
3.2. Elementos de retrorreflexión: microesferas de vidrio.....	27
4. Planteamiento y objetivos.....	36

4.1. Planteamiento.....	36
4.2. Objetivos.....	37
5. Propiedades ópticas de los materiales empleados en la señalización horizontal.....	39
5.1. Color. Factor de luminancia y coordenadas cromáticas.....	39
5.1.1. Iluminantes patrón CIE.....	50
5.1.2. Condiciones de iluminación y de observación.....	51
5.1.3. Medida de color mediante instrumentos..	53
5.1.4. Valores triestímulos.....	54
5.1.5. Coordenadas cromáticas.....	55
5.2. Retrorreflexión.....	55
5.2.1. Principios de reflectorización esférica. "Retrorreflexión".....	57
5.2.2. Tipos de superficies reflectorizadas...	60
5.2.3. Reflectividad relativa de los materiales empleados en la seguridad vial.....	61
5.2.4. Métodos ópticos para la medida de retrorreflexión en superficies horizontales reflectorizadas.....	66
6. Procesos de envejecimiento.....	77
6.1. Envejecimiento natural.....	77
6.2. Envejecimiento artificial acelerado.....	78

6.2.1. Envejecimiento con arco de carbón.....	78
6.2.2. Envejecimiento por calor.....	79
6.2.3. Otros tipos de envejecimiento.....	79
7. Procedimiento experimental.....	80
7.1. Pruebas en campo.....	81
7.2. Pruebas en laboratorio.....	82
7.3. Equipos.....	83
7.3.1. Aparatos para la determinación de las propiedades ópticas.....	83
7.3.2. Aparatos de envejecimiento artificial acelerado.....	86
8. Resultados experimentales. Interpretación y discusión.....	88
8.1. Selección del material base.....	88
8.1.1. Pinturas convencionales.....	88
8.1.1.1. Definición de los materiales estudiados.....	90
8.1.1.2. Resultados experimentales en relación a la selección de los materiales convencionales.....	91
8.1.2. Materiales de larga duración.....	97
8.1.2.1. Termoplástico de aplicación en caliente.....	97
8.1.2.2. Plástico en frío de dos componentes.....	118

8.2. Ensayos de campo.....	148
8.2.1. Control de la aplicación.....	148
8.2.2. Resultados experimentales obtenidos en los ensayos de campo.....	149
8.2.3. Interpretación y discusión.....	152
8.3. Ensayos de laboratorio.....	174
8.3.1. Control de la aplicación.....	174
8.3.2. Resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio.....	175
8.3.3. Interpretación y discusión.....	183
9. Conclusiones.....	209
10. Bibliografía.....	213
Anexo.....	220

1. INTRODUCCION.

Desde que en el año 1911 surge por primera vez la idea de la división de la calzada para facilitar el tráfico, el concepto de la señalización de carreteras se ha visto modificado en el sentido de lograr mejores objetivos a través de la mejora de la calidad de la composición de los materiales que la constituyen.

En base a este razonamiento, puede establecerse como característica esencial de una buena señalización su visibilidad, tanto nocturna como diurna. Dicha característica está relacionada directamente con la calidad de los materiales que constituyen la propia marca vial. En este aspecto radica, fundamentalmente, la importancia de la selección de los materiales, con independencia del proceso de aplicación de los mismos.

En este sentido, y en la actualidad, cobra gran trascendencia dicha selección, ya que de ella se deriva posteriormente la eficacia de la marca vial.

Por todo ello se ha tomado como objetivo primordial en este trabajo la determinación de criterios que, una vez aplicados, puedan dar lugar a una marca vial de calidad, basada en una visibilidad buena y duradera, tanto de día como de noche.

Con el fin de alcanzar este objetivo, y una vez seleccionados distintos materiales base mediante el control de las propiedades que determinan su calidad, se procedió a evaluar la variación de la visibilidad de las marcas viales obtenidas con ellos sobre diferentes substratos, a nivel de laboratorio y de campo.

Ello permitió sentar las bases tanto científicas como técnicas para poder realizar la selección del material en función del tipo de firme, obtener la relación existente entre los ensayos de campo y laboratorio, así como el establecimiento de períodos mínimos de garantía que permitan obtener la relación de duración existente entre los distintos materiales.

2. ANTECEDENTES.

2.1. DESARROLLO HISTORICO.

Desde el año 1911 en que por primera vez se hace referencia al uso de líneas trazadas sobre el pavimento para encauzar el tráfico (USA, Estado de Michigan), el concepto de la señalización de carreteras y vías urbanas ha cambiado sustancialmente, tanto en su composición como en sus propios objetivos(1).

La idea de la división de la calzada para facilitar el tráfico surgió al observar el efecto que surtía para guiar a los automóviles y mantener en su propio carril cada sentido de la marcha, la junta bituminosa en el centro de las calzadas construidas de hormigón. Esta junta de color negro, bien visible al contrastar con el color gris de fondo propio de la calzada, venía a significar la delimitación de cada mitad de la carretera.

Así, en el estado de Maryland (USA), se utilizaban hacia el año 1920 materiales de color negro para estos fines, si bien esta situación no duró más de 4 ó 5 años, siendo sustituido paulatinamente por el color blanco(2).

Inicialmente la señalización se limitaba a las zonas de peligro que debían ser convenientemente advertidas; el subsiguiente incremento de la motorización y la simultánea mejora de las carreteras así como su evidente necesidad, hizo que esta práctica se extendiera progresivamente a gran número de vías urbanas e interurbanas(3), primero en Estados Unidos y luego en Europa.

En este sentido, se menciona ya en Gran Bretaña y Alemania en el año 1939 ésta práctica; en otros países de Europa, a partir del año 1946, además, se regula el empleo de "postes guía" en el borde de las calzadas, así como el uso de los marcadores denominados "ojos de gato", como complemento de la señalización horizontal.

El aumento de la circulación, cada vez más rápida por calzadas cada vez de mayor calidad, el conocimiento preciso de las necesidades a cubrir y el hecho de su aceptación e incorporación al uso común por parte de los conductores, ha apoyado el desarrollo del concepto de señalización horizontal, induciendo su uso y favoreciendo la mejora de los materiales y técnicas de aplicación a lo largo de los años(4).

Pueden citarse como hitos de mayor relevancia, la introducción de los "postes guía" y los "ojos de gato", el uso de las microesferas de vidrio empleadas por primera vez en USA en el año 1948 para lograr la retroreflexión de las señales horizontales, el desarrollo de materiales termoplásticos con tiempos de secado muy cortos y las técnicas de aplicación de alta velocidad(5).

En la actualidad el color predominante para la señalización es el blanco, al ser el que resulta más visible en la mayor parte de los casos, al reflejar toda la luz que recibe sin absorción de ciertas longitudes de onda como otros colores.

En los momentos iniciales, las propiedades y calidad de los materiales empleados tenían escasa importancia frente al propio hecho de la señalización, pero, aunque siempre una carretera señalizada es mejor que otra que no lo esté, pronto comenzó a procurarse que las líneas fueran visibles durante el mayor tiempo posible.

En el año 1925, Mattimore(6) describía ya los requisitos más importantes que deberían reunir las pinturas para señalización, así como los ensayos que con ellas podían realizarse. A su juicio, los factores más importantes eran: consistencia, poder cubriente, tiempo de secado y resistencia, tanto la acción de la luz como a la abrasión y a la acción del agua.

Estos criterios de calidad, junto con otros que han ido apareciendo como necesarios para satisfacer las nuevas exigencias, continúan vigentes en la actualidad(7).

El hecho de que la señalización mediante color y forma geométrica constituye un mensaje para el conductor y que la evidencia de que el mensaje transmitido debe ser universalmente entendido, se siguen criterios uniformes, que han llevado gradualmente al establecimiento de especificaciones de forma y color para la señalización. Dichas especificaciones se encuentran recogidas en las actas de la "Convención de Viena" celebrada en esa ciudad en noviembre de 1968.

Mayores detalles de esta regulación para los países europeos se dan en el "Protocolo Adicional de Señalización al Acuerdo Europeo Complementario de la Convención de Símbolos y Señales de Carretera" firmado en Ginebra el 1 de marzo de 1973, en el Sistema Europeo de Señalización, de la Comisión Económica para Europa (E.C.E), y en las normas de los diferentes países firmantes del acuerdo, entre ellos España, que deben ser consecuentes con esta normativa Internacional.

No obstante la regulación en Estados Unidos difiere en algunos casos de este sistema europeo de señalización, si bien, ambos sistemas son consecuentes con la Convención de Viena.

Actualmente y como consecuencia de la entrada en vigor del Mercado Unico Europeo a partir del 1 de enero del año 1992, la C.E.E., a través de su "Bureau Técnico", ordenó la creación de un Comité Técnico de Normalización (Comité Europeo de Normalización), cuyo objetivo fuese la creación de una única normativa europea que aglutinase las actuales existentes en cada país miembro. Así, el 4 de abril del año 1989 en París, se reunió por primera vez dicho comité para consensuar tanto el método como objetivos del mismo, acordándose dividir el comité en ocho grupos de trabajo, siendo el número dos el correspondiente a señalización horizontal. El objetivo básico de esta futura normativa es "la seguridad del usuario", haciéndose hincapié en determinadas normas de comportamiento pero dejando libertad total para la formulación de los materiales. Las propiedades fundamentales de la marca vial consideradas en esta normativa(8), son: visibilidad nocturna y diurna, resistencia al deslizamiento y erosión.

2.2. FUNCIONES DE LA SEÑALIZACION.

El objeto de la señalización es mejorar las condiciones del tráfico haciéndolo mas seguro y fluido, para lo que debe constituirse en guía visual de los conductores y en elemento regulador de la circulación.

Es evidente que la señalización juega un papel importante como medio de guía y advertencia al conductor, proporcionándole información de las condiciones de la vía o carril por el que circula, en base a un código de formas, símbolos y colores preestablecidos. Ahora bien esta información tiene evidentes limitaciones y no siempre es perfecta, puesto que empeora con el tiempo y está sujeta a deterioros.

Por ello, es importante una cuidadosa selección de los materiales a utilizar debiéndose seleccionar, aquellos que proporcionen la función deseada en cualquier condición y durante el mayor período de tiempo posible. Además es necesario una inspección regular de su estado a fin de determinar la necesidad de su renovación.

La eficacia de la señalización depende también de los propios conductores en la medida en que éstos sean capaces de interpretar correctamente su significado con la antelación suficiente para actuar de acuerdo con la información presentada.

Las líneas que señalan el borde de la calzada y las que delimitan los carriles del tráfico, son una considerable ayuda para el usuario en su misión de mantener el control direccional de su vehículo, tanto en lo que se refiere a su posición en la carretera, desplazamiento lateral, como en relación con los vehículos que le anteceden o le preceden.

La experiencia demuestra que éstas líneas pintadas sobre la calzada son la principal referencia para lograr dicho control, siendo particularmente notorio en la oscuridad, en la noche o con tiempo de lluvia o niebla, cuando el ojo no distingue a distancia más elementos de contraste con la carretera y su entorno, que ésta guía visual(9).

Además en caso de deslumbramiento el conductor puede comprobar su posición visualizando la línea de borde de calzada, evitando así mirar directamente al vehículo que se acerca de frente.

Por tanto, la señalización en sus diversas formas y mediante diferentes materiales constituye un recurso utilizado como información y proporciona una guía a los conductores mediante el uso de un sistema de formas y símbolos diversos. Las formas y símbolos son complementarios del sistema de señales convencional que se compone de dibujos, palabras, líneas, cambios de color y forma de las mismas o distancia entre ellas(10).

Otro aspecto no menos importante de la señalización es que constituye el medio para ordenar y regular el tráfico en la vías públicas, encauzándolo mediante la división en carriles de la calzada, señalando carriles de aceleración o incorporación y deceleración o salida, áreas de descanso o de emergencia, o señalando acciones obligatorias y prohibiciones.

Su propósito no es otro que el de aumentar la capacidad del tráfico, gracias a su canalización y ordenación y para hacerlo más seguro facilitando o imponiendo las decisiones necesarias para el control de la dirección y velocidad de los vehículos, advirtiendo al conductor de los peligros que pueda encontrar o del tipo de calzada o vía que está utilizando(11).

Así en USA, una línea amarilla en el centro de la calzada, señala la separación de carriles de circulación en sentido opuesto; una línea doble discontinua de color amarillo, señala el borde exterior de un carril en el que el sentido de la marcha cambia en el tiempo o en el espacio, carriles reversibles; las líneas blancas de división de carriles, señalan la separación de corrientes de tráfico en el mismo sentido. En el sistema europeo, se recomienda el color blanco para todas los casos citados.

2.3. OTROS ASPECTOS IMPORTANTES DE LA SEÑALIZACION HORIZONTAL.

2.3.1. SEGURIDAD.

No es fácil cuantificar el aporte de la señalización a la seguridad del tráfico, aunque desde luego, su utilización ha hecho disminuir el número de accidentes en las carreteras, lo que constituye ya un logro muy importante por el ahorro de lesiones y vidas humanas que comporta(12).

Admitido el aumento de la seguridad en las carreteras que poseen señalización horizontal respecto a las que no la poseen, aunque ésta ventaja no sea determinable cuantitativamente, la tarea de comparar los diferentes sistemas o símbolos, como marcas viales, ojos de gato, limitadores, líneas de centro o borde, etc, entraña una gran dificultad.

A éste respecto, además, debe señalarse, que para cada circunstancia aparece un sistema determinado como más idóneo, por lo que queda claro que, cualquier sistema en cualquier circunstancia es siempre mejor que la ausencia de señalización.

Se han desarrollado numerosas investigaciones, con diversos resultados, referentes al beneficio de la señalización respecto a la seguridad y, mientras que unas conducen hacia una disminución del número de accidentes en un lugar determinado desde la instalación de la señalización, otras manifiestan no poder deducir una influencia negativa de su no existencia(13).

No obstante, en cualquier caso y fuera de toda duda, un efecto negativo fundamental respecto de la seguridad tiene siempre lugar en condiciones de mala visibilidad.

Ningún estudio señala por otra parte, efectos negativos concretos sobre la seguridad a causa de la señalización, ya que en todo caso, ésta no constituye un inconveniente adicional.

2.3.2. VISUALES.

La señalización debe ser capaz de proporcionar, para información del conductor, toda la variedad necesaria de estímulos visuales de manera perfectamente diferenciada.

El hecho de que esta información sea precisamente en forma visual a través de gráficos, es una gran ventaja, puesto que la señalización permanece en todo momento dentro del campo visual del conductor, ya sea central o perimetral, sin exigir una atención especial para visualizarla, lo que permite recibir una información sin necesidad de desviar la atención de la carretera.

Por la noche, cuando lo importante ya no es el contraste (14) si no la agudeza visual, la retrorreflexión mantiene su utilidad.

Puede asegurarse, por lo tanto, que el éxito de la señalización estriba en el hecho de su propia visibilidad y de que sea ésta uno de los criterios para la selección de los materiales a emplear.

El hecho de que la señalización sea visible se debe a la reflexión de la luz que incide sobre ella y al contraste de color con la superficie adyacente de la calzada o el cielo de fondo.

La luz procedente de una fuente luminosa puede ser reflejada por una superficie de tres formas diferentes:

Reflexión difusa, cuando la luz incide sobre una superficie microscópicamente rugosa (infinitos planos de reflexión) y el rayo de luz incidente es reflejado en todas direcciones.

Reflexión especular, cuando la luz incide sobre una superficie microscópicamente uniforme y lisa, siendo reflejada con igual ángulo, pero opuesto, al del rayo de luz incidente.

Retroreflexión, cuando la luz incidente es reflejada en sentido contrario, es decir hacia el propio foco emisor, manteniéndose esta propiedad con una gran variedad de ángulos de incidencia.

Los tres tipos de reflexión se dan en la señalización, si bien uno, dependiendo de la colocación y ubicación, de la dirección y procedencia de la luz incidente (sol directo, luz diurna difusa, luces de servicio o faros de los vehículos) y de las condiciones atmosféricas, será el dominante(15).

A causa de las diferentes condiciones de visibilidad de la señalización durante el día y la noche, puede hacerse una clara diferenciación entre los términos "visibilidad diurna" y "visibilidad nocturna", ya que cada una depende de diferentes condiciones y está en relación con distintas causas; la diurna, depende fundamentalmente de la luminosidad en condiciones de iluminación difusa o de luz solar, mientras que la nocturna, depende de las propiedades de retroreflexión cuando las señales son iluminadas por los faros de los automóviles.

2.4. CARACTERISTICAS Y CRITERIOS DE CALIDAD.

El sistema ideal de señalización, esquemáticamente definido, sería aquél que proporcione la mejor información con el menor coste.

Cuando se estudia la implantación de un sistema de señalización deben ser considerados diversos aspectos dentro del sistema global, tales como proyecto, aplicación y condiciones en que debe llevarse a cabo, materiales a emplear y costes(16).

La importancia relativa de cada uno de estos aspectos, depende de diversos factores determinados, a su vez, en función de los objetivos perseguidos, de las condiciones del lugar a señalizar y su entorno, por lo que no puede establecerse un orden de prioridades con carácter general. No obstante, lo que sí se puede establecer es un criterio para clasificar por prioridades cada una de las propiedades de la señalización horizontal dependiendo de las necesidades específicas de cada situación.

En este sentido, pueden establecerse como características esenciales de la señalización(17), una buena visibilidad nocturna y diurna, resistencia al deslizamiento, elevada duración, sencillez de aplicación y rapidez de secado, así como gran facilidad de borrado cuando éste sea necesario.

Cada una de éstas características, aplicadas como criterio de selección, conduciría a la elección de un sistema diferente de señalización para cada caso, aunque pueden concebirse en un solo sistema o material que reuniera en grado óptimo la mayor parte de ellas.

Desde luego éste sería el sistema ideal y, en este sentido, se concentran actualmente los mayores esfuerzos.

Los materiales empleados para la señalización horizontal, se clasifican en:

I. Pinturas convencionales (con disolventes)

- Alcídicas modificadas
- Alcídicas-clorocaucho
- Clorocaucho
- Acrílicas puras
- Vinílicas
- Acrílicas estirenadas
- P.V.C.

II. Materiales de larga duración

- Termoplásticos de aplicación en caliente
- Plásticos en frío, de dos componentes
- Epóxi
- Poliuretanos

III. Otros materiales

- Cintas prefabricadas
- Captafaros, hitos...

Los materiales utilizados en la actualidad poseen solamente, en un buen tono, algunas de las características antes citadas, manteniendo el resto en un nivel aceptable; por lo tanto, tratar de mejorar las marcas viales mediante el aporte de nuevos materiales y la mejora en las formulaciones de los que actualmente se están utilizando, es de gran importancia.

Hoy en día, como consecuencia por un lado de las variaciones que en el mercado sufren los precios de los productos derivados del petróleo, en especial los disolventes, y, por otro, de las exigencias de defensa del medio ambiente, las pinturas convencionales se enfocan hacia la utilización de materiales con baja necesidad de disolventes o al empleo de agua como vehículo volátil en las mismas. Además, el considerable aumento del tráfico, hace complicadas y peligrosas las operaciones de señalización horizontal, por lo que cada vez es más importante la elección de materiales con tiempos de secado cortos.

Por todo ello, la investigación en este sector se dirige en la actualidad hacia la obtención de materiales de señalización que cumplan con la mayor parte de las propiedades anteriormente comentadas.

3. COMPONENTES DE UNA MARCA VIAL.

3.1. MATERIALES BASE.

La naturaleza química de los materiales base ha ido evolucionando a lo largo del tiempo como consecuencia del desarrollo de la investigación de los ligantes que los constituyen y del avance tecnológico en los sistemas de aplicación(18).

Desde un punto de vista general, en todo material base se pueden distinguir cuatro grupos de componentes perfectamente diferenciados(19), **vehículo fijo o ligante, pigmentos y cargas, vehículo volátil y aditivos.**

3.1.1. VEHICULO FIJO.

Está constituido, generalmente, por la resina, componente fundamental a partir del cual se formula la pintura. Dicha resina se modifica ocasionalmente con algún plastificante externo o interno con el fin de que adquiera propiedades mecánicas tales como elasticidad y resistencia a la tracción, que originalmente no presenta. En algunas ocasiones, dichos plastificantes son resinas de naturaleza química totalmente diferente a la utilizada como base.

Del ligante dependen, duración, compatibilidad con el sustrato, resistencia a la abrasión, secado y retención de microesferas de vidrio, por lo que es el elemento fundamental del material base(20).

La evolución de los ligantes empleados en la formulación de pinturas de tráfico ha sido considerable. Tradicionalmente, se empleaban resinas fenólicas para la fabricación de estos materiales de base, lo que conducía a marcas viales de poca calidad como consecuencia, fundamentalmente, de su pobre adherencia al sustrato, su baja resistencia a la acción de los rayos UV y a la abrasión y, a un excesivo agrietamiento del firme de aglomerado asfáltico(21).

Es a partir de la modificación de las resinas alcídicas con aceites insaturados para su uso industrial como ligantes(22), cuando se introduce en Estados Unidos el empleo de estas resinas en el sector de tráfico. A partir de este momento, y, motivado por el avance desarrollado en la tecnología de aplicación, aparecen ligantes que van desde los convencionales (resinas alcídicas modificadas y acrílicas en disolución) hasta los más complejos (termoplásticos de aplicación en caliente y sistemas a base de ligantes reactivos).

En la actualidad, las resinas más utilizadas como vehículos fijos de los materiales base empleados en las marcas viales son:

Resinas alcídicas modificadas.

El término alcídica o alquídica, fue usado por primera vez en el año 1927 por Kienle para describir el poliéster resultante de la reacción de polioles con ácidos polifuncionales(23); más adelante, se observó que las características de tales resinas sintéticas podían mejorarse considerablemente al modificarlas con aceites insaturados.

Las propiedades finales de estos materiales vienen condicionadas por el tipo y cantidad de aceite presente.

En el figura-3.1, puede observarse dicha influencia.

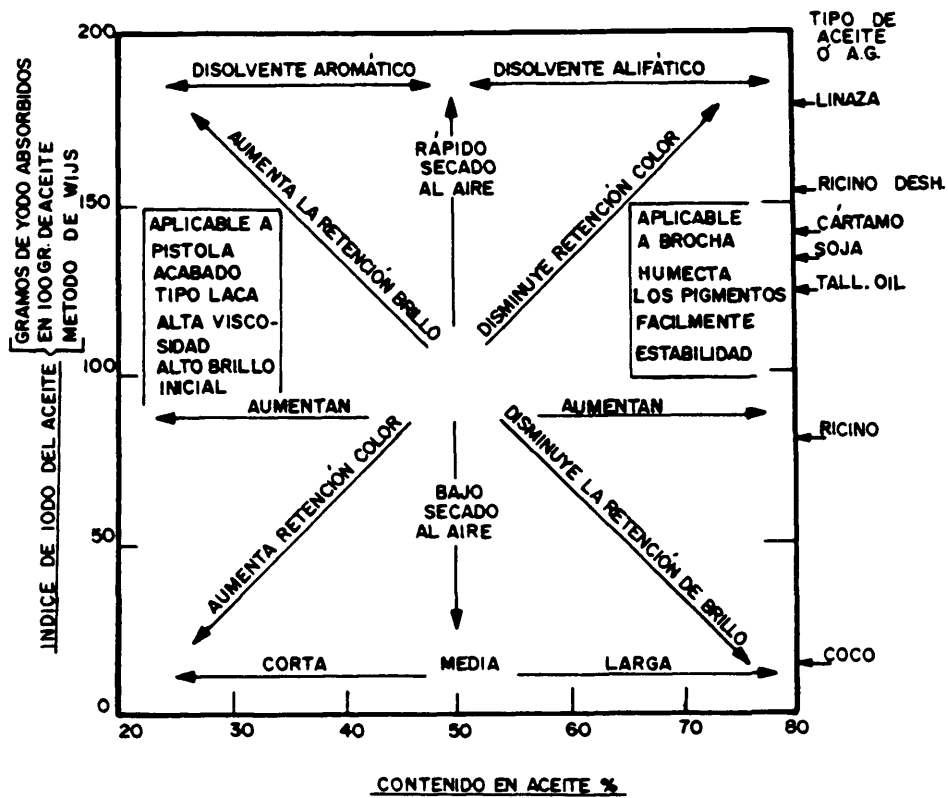


Fig.3.1 Influencia del tipo de aceite y de su contenido sobre las propiedades de las resinas alcídicas.

De acuerdo con esta figura, las resinas alcídicas empleadas en pinturas para señalización horizontal, se deberán modificar con aceites de índice de yodo, entre 120 y 150, soja y cártamo, entre otros, con el fin de obtener propiedades como un secado rápido, brillo, etc.

Mientras que la síntesis de la resina(24), implica solo el **poliol** (glicerina, pentaeritrol, sorbitol o manitol) y el **poliácido o sus derivados** (ácido isoftálico y benzoico, así como anhídridos ftálico y maleico), el proceso de "curado"(25) del material depende de su grado de polimerización e índice de yodo del aceite de modificación. Este proceso se realiza en dos etapas; una rápida, que consiste en el secado químico oxidativo, y otra lenta, en la que tiene lugar la evaporación del disolvente. Durante la primera etapa se produce la oxidación, mediante el oxígeno atmosférico, de las insaturaciones existentes en el aceite de modificación. Este proceso se realizará en un período de tiempo más o menos largo, dependiendo del número de insaturaciones que posea el aceite y del valor de la energía de activación del proceso de oxidación.

Los aceites más utilizados se recogen en la tabla-3.1.

Tabla-3.1 Clasificación de los aceites.

TIPO DE ACEITE (Valor del Índice de Yodo)		
SECANTES (Superior a 150)	SEMISECANTES (Entre 120 y 150)	NO SECANTES (Menor a 120)
- TUNG - OITICIA - LINAZA	- PESCADO - SOJA - GIRASOL - CARTAMO - RICINO DES- HIDROGENADO	- RICINO - COCO - RICINO HI- DROGENADO - DE ACIDOS - GRASOS SIN- TETICOS

A la hora de elegir el aceite hay que tener en cuenta que, además de influir en el secado, retención de brillo y color, éste tiene una influencia determinante en el amarilleamiento del material aplicado como consecuencia del efecto que sobre la película seca de pintura ejerce la radiación UV. Así, los aceites semisecantes no son amarilleantes, los no secantes suelen ser no amarilleantes, y los secantes por su parte, amarilleantes, por lo que éstos últimos no serían recomendables para pinturas que fueran a utilizarse al exterior.

Por último, su grado de insaturación también afecta a la durabilidad exterior ya que la acción de curado nunca cesa realmente. Aunque aceites altamente insaturados confieren a la película seca de pintura alta resistencia al agua, proporcionan un mayor caleo, una mayor pérdida de brillo y flexibilidad en el material.

Resinas acrílicas en disolución.

Las resinas acrílicas para la fabricación de pinturas fueron comercializadas por primera vez en los años 30, permaneciendo su uso restringido hasta el año 1953 cuando se

introdujo en el mercado la primera emulsión acrílica diseñada específicamente para pinturas(26). Desde entonces, los polímeros acrílicos, tanto en emulsión como en disolución, se vienen utilizando ininterrumpidamente en diversos campos de la construcción, no solo en la fabricación de pinturas(27).

Las pinturas formuladas a base de resinas acrílicas se caracterizan por su elevada duración, resistencia a la radiación UV, versatilidad de aplicación y cortos tiempos de secado.

Aunque su campo de aplicación es muy extenso (industria del automóvil, tintas para plásticos, pinturas para suelos y estructuras, etc), su uso como materia prima base para la formulación de pinturas convencionales, ha ido creciendo en progresión geométrica con el tiempo, debido por un lado a la necesidad de resolver el problema de la señalización horizontal sobre pavimentos de hormigón y por otro, en pavimentos bituminosos, para obtener marcas viales de mayor calidad y duración que las obtenidas con resinas alcídicas modificadas.

A pesar del hecho de su mayor calidad, comparada con las pinturas alcídicas modificadas, es la necesidad de señalizar firmes rígidos, la que hace despegar en nuestro país la utilización de estos ligantes(28).

Ya que un firme rígido es un substrato alcalino (ph alrededor de 13) todo material que se emplee para su señalización horizontal con alto contenido en residuo ácido, será inservible.

Hasta el año 1987 se venían utilizando en nuestro país como pinturas convencionales, las basadas en resinas alcídicas modificadas (índice de acidez superior a 9), por lo que la duración de la señalización horizontal era muy escasa, de cuatro a seis meses. Sólo se conseguía una señalización duradera, superior a doce meses, cuando a base de repintados se situaba una interfase estable entre el pavimento y la nueva capa de pintura alcídica.

La causa de este mal comportamiento radica en la hidrólisis(29) de los poliésteres que componen dichas resinas. Este fenómeno conducía, a la degradación de la marca vial, en mayor o menor grado, dependiendo de la edad del firme y, en pavimentos nuevos, de las características de cada tramo de hormigón (ph, en cada unidad de extensión del citado firme).

Las resinas acrílicas utilizadas en la obtención de recubrimientos, se presentan, básicamente, de tres formas:

- Dispersiones acuosas termoplásticas (LATEX)
- Disoluciones termoplásticas (TPA)
- Disoluciones termoendurecibles (TSA)

Además, y cada vez con mayor frecuencia, se vienen utilizando dispersiones acrílicas no acuosas y emulsiones acuosas, sobre todo estas últimas, como modificadores de las propiedades del hormigón(30).

De estos tres grupos, las más utilizadas a la hora de la fabricación de pinturas convencionales para señalización horizontal, son las disoluciones de polímeros acrílicos termoplásticos.

En la tabla-3.2, se citan las propiedades más importantes de los monómeros acrílicos y metacrílicos más utilizados en la industria, para la fabricación de pinturas convencionales(31).

Tabla-3.2 Propiedades de los monómeros acrílicos más utilizados en la fabricación de polímeros.

CARACTERISTICA	TIPO DE MONOMERO			
	Metacrilato de metilo	Acrilato de metilo	Acrilato de etilo	Acrilato de n-butilo
Pegajosidad	No pegajosa	Algo pegajosa	Pegajosa	Muy pegajosa
Dureza	Duro	Blando	Blando y plástico	Muy blando y plástico
Resistencia a tracción	Alta	Moderada alta	Baja	Muy baja
Elongación a rotura	Baja	Moderada alta	Muy alta	Extremada alta
Absorción de agua	Pequeña	Moderada alta	Pequeña	Muy pequeña
Punto de rotura	Alto	Moderado alto	Bajo	Extremado alto

Otra propiedad importante, a la hora de seleccionar un monómero, es su polaridad e influencia en la solubilidad de la resina. Los polímeros de los ésteres acrílicos y metacrílicos, son generalmente solubles en hidrocarburos aromáticos, ésteres, cetonas y ciertos disolventes clorados; no obstante, su solubilidad en disolventes poco polares, puede garantizarse si los ésteres, acrílicos y metacrílicos, se obtienen a partir de alcoholes con cadenas de gran longitud.

Por último, en la tabla-3.3, se recogen los valores de la temperatura de cristalización, Tg, para los polímeros más usados.

Tabla-3.3 Temperatura de cristalización, Tg, de los polímeros más utilizados.

TIPO DE POLIMERO	TEMPERATUA DE CRISTALIZACION Tg (°C)
Poli (acrilato de metilo)	8
Poli (acrilato de etilo)	-22
Poli (acrilato de n-propilo)	-55,5
Poli (acrilato de n-butilo)	-54
Poli (metacrilato de metilo)	105
Poli (metacrilato de etilo)	65
Poli (metaacrilato de isobutilo)	48
Poli (metacrilato de n-butilo)	20
Poliestireno	100

Así, en el sector de tráfico, se recomienda el uso de monómeros del tipo, MMA (metacrilato de metilo) y BMA (metacrilato de butilo), para la obtención del copolímero correspondiente.

De esta manera, se pueden conjugar propiedades tan importantes como, flexibilidad, dureza superficial y ausencia de "tack" superficial (pegajosidad en la superficie de la marca vial).

Dado que éstos ligantes se encuentran totalmente polimerizados, su proceso de secado tiene lugar en una sola etapa, evaporación del disolvente, que además se realiza de forma muy rápida.

Termoplástico de aplicación en caliente.

Estos materiales se formulan con resinas de hidrocarburos alifáticos y ésteres modificados de la colofonia, siendo los basados en las resinas del primer grupo los más utilizados. Normalmente los hidrocarburos alifáticos elegidos para la fabricación de la resina son de bajo peso molecular, generalmente de cinco átomos de carbono, que provienen principalmente de dienos y otros monómeros reactivos de tipo olefínico. Estas resinas de color pálido, sólidas a temperatura ambiente, se caracterizan por poseer elevada resistencia a la humedad, excelente capacidad de adherencia, elevada estabilidad a la radiación UV así como buena solubilidad y compatibilidad con los pigmentos(32).

Las propiedades más importantes que deben reunir estas resinas, para su empleo en señalización horizontal, se recogen en la tabla-3.4.

Tabla-3.4 Propiedades típicas de las resinas de hidrocarburos utilizadas en señalización horizontal.

Punto de reblandecimiento, $^{\circ}\text{C}$	100
(ASTM E-28)	
Color, Gardner.....	7
(ASTM 360-21)	
Viscosidad a 140°C , mPa.....	7000
(ASTM D-3236)	
Peso molecular, Mn.....	1300
Flash point, $^{\circ}\text{C}$	250
(ASTM D-92)	
Peso específico.....	0.97
(ASTM D-71)	

De las propiedades reflejadas en la tabla-3.4 deben hacerse las siguientes consideraciones:

Punto de reblandecimiento. Deberá ser lo más elevado posible ya que, de éste dependerá el comportamiento termoplástico del material. A mayor punto de reblandecimiento, mayor dureza superficial y menor sensibilidad a la temperatura, por lo que el material aplicado no sufrirá deformaciones plásticas ni ensuciamientos por causa del tráfico, cuando la temperatura ambiente sea elevada.

Color "Gardner". Interesa que sea lo más bajo posible, para no contaminar el desarrollo de color de las cargas y pigmentos en el material formulado. Además, en éstos materiales durante su aplicación con el fin de no alterar el valor del factor de luminancia, interesa a su vez que su estabilidad al calor sea lo más elevada posible.

Peso molecular. Debe ser inferior a 1300, para la correcta humectación de las cargas y pigmentos del material. Una buena humectación, favorece, en los pigmentos y cargas, su dispersión, su distribución homogénea en el material una vez fundido, así como evita su sedimentación en el momento de la aplicación. Además, un peso molecular bajo, favorece el desarrollo de la reología apropiada para la aplicación, gracias a una viscosidad baja en el material fundido a su temperatura de aplicación.

Viscosidad. Debe ser baja a la temperatura de aplicación, alrededor de 200°C. Si por el contrario, para conseguir esa viscosidad hubiese que calentar el material por encima de los 250°C y, dado que el "flash point" de la resina es de unos 260°C, durante el calentamiento y hasta el momento de la aplicación, además del peligro de incendio, se perdería contenido en resina, lo que provocaría falta de adherencia al substrato y baja resistencia a la abrasión(33). Por otro lado, esa disminución del contenido en ligante provocaría una falta de humectación de las microesferas de vidrio que se añaden por postmezclado.

Estos materiales, poseen un aspecto fundamental que los diferencia del resto de los que se utilizan en señalización horizontal, el **secado**, que se realiza de forma instantánea por solidificación. Casi todo el calor comunicado al material para su fusión, es cedido al pavimento. Durante la solidificación, los antracenos así como el betún contenido en el aglomerado asfáltico, se fusionan con el material, dando lugar a un anclaje perfecto. El calor cedido por metro cuadrado varía, según la temperatura del pavimento, entre 80 y 115 cal.

Plástico en frío de dos componentes.

Las resinas plásticas formuladas sobre la base de metacrilatos y acrilatos, encuentran gran aplicación como ligantes en pinturas y recubrimientos.

Una propiedad deseada en los ligantes es la capacidad de aglutinar cargas, así como adherirse al substrato de la forma más energética posible. Estas propiedades son exteriorizadas por los ligantes aquí mencionados, una vez en estado polimerizado.

Como monómeros, en estos ligantes reactivos, se utilizan, comúnmente, los ésteres del ácido acrílico y metacrílico. El ligante, se obtiene fundamentalmente, por esterificación de los ácidos con los correspondientes alcoholes, o a través de la transesterificación de ésteres inferiores del ácido acrílico y metacrílico, acrilato de etilo o metacrilato de metilo, entre otros. Otro camino para la síntesis de los ésteres de estos ácidos es la reacción de los mismos con epóxidos, como el óxido de etileno, que en el caso del ácido metacrílico(34), conduce al metacrilato de 2-hidróxietilo.

Dentro de estos ligantes, el elemento constituyente más importante es el metacrilato de metilo (MMA). Este monómero proporciona la reactividad, propiedades mecánicas y resistencia frente a influencias externas, necesarias.

Los polímeros que más se utilizan en la composición de los ligantes reactivos son los saturados. Contienen como elemento constituyente, una gran porción de MMA. Junto a éstos, pueden aparecer otros monómeros, como por ejemplo, acrilatos inferiores (acrilato de metilo, acrilato de butilo), así como metacrilatos inferiores y superiores (metacrilato de butilo, metacrilato de 2-etilhexilo) que son utilizados como plastificantes internos. Su peso molecular se encuentra generalmente comprendido entre los 50000 y los 200000.

Los mencionados ligantes, dan lugar, sin duda alguna, a los materiales base que conducen a las marcas viales de mejor calidad, no sólo por su duración y resistencia, si no por su excelente adherencia a todo tipo de sustrato, incluidos los firmes de hormigón(35).

Sus propiedades mecánicas dependen de la calidad de su proceso de reticulación, la cual se realiza en el momento de la aplicación del material. Normalmente el sistema de dos componentes está formado por un monómero acrílico y un endurecedor o agente de curado, constituido por un iniciador, a base de un peróxido orgánico y un acelerante, amina terciaria. El proceso de curado es una reacción homolítica en la cual, el agente de reticulación genera los radicales libres capaces de atacar al monómero acrílico y dar lugar a la macromolécula que constituirá la marca vial.

La polimerización total se desarrolla aproximadamente en 30 min, aunque dicho período de tiempo está muy influenciado por la temperatura ambiente, así como por la naturaleza y proporción del acelerante en el sistema de curado(36).

En la figura-3.2, se ha representado como transcurre la polimerización de éstos materiales.

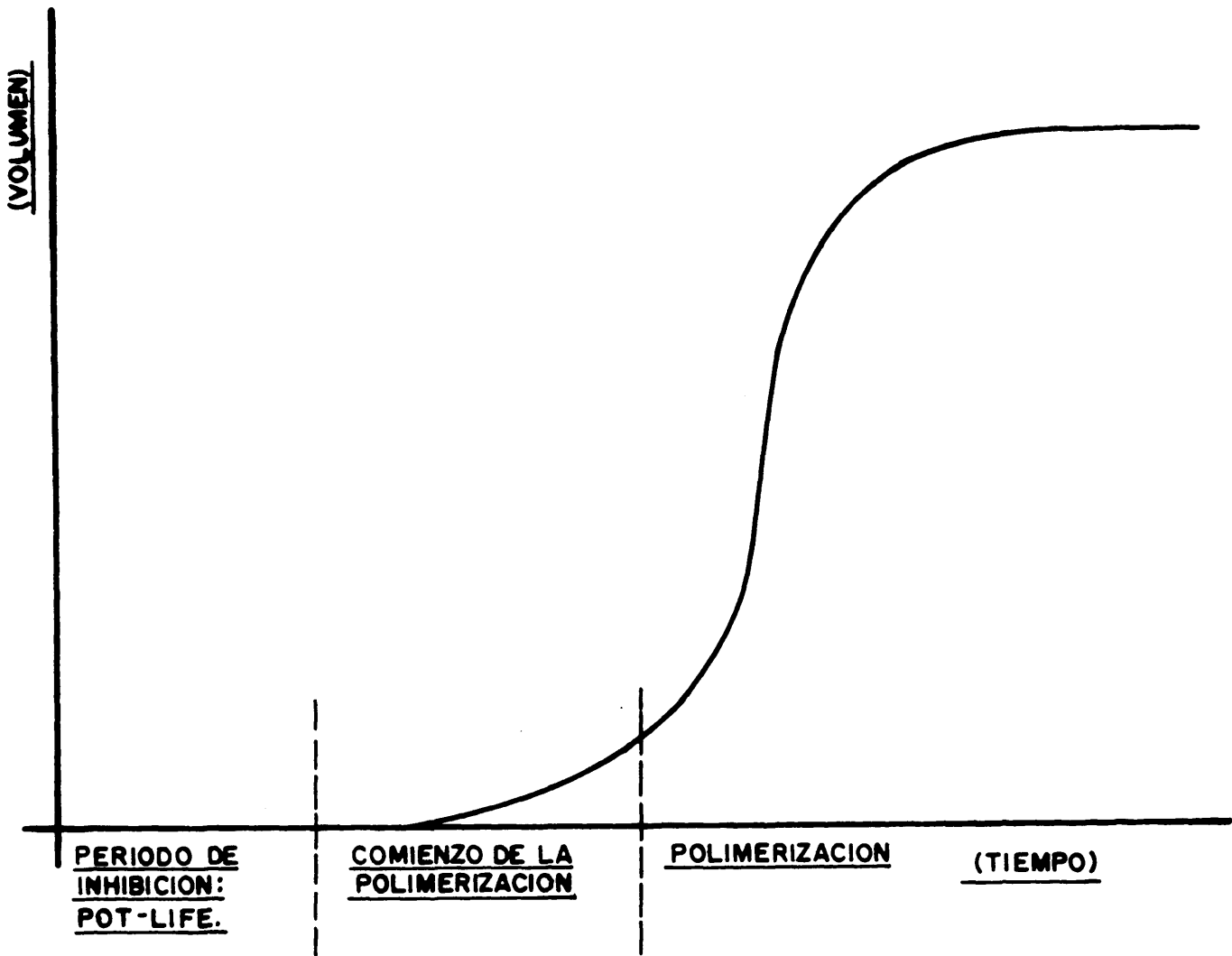


Fig.3.2 Variación del volumen con el tiempo en la formación de polímeros con ligantes reactivos.

Así tras la adición del iniciador, transcurre un período de tiempo sin producirse polimerización. A este intervalo se le denomina "período de inhibición" y se utiliza como tiempo de estado líquido (pot-life o tiempo de gel).

Dicho periodo es susceptible de ser afectado, en su duración, por el oxígeno del aire disuelto en los monómeros así como por los inhibidores contenidos.

Es, fundamentalmente, el oxígeno atmosférico el que intercepta los radicales reactivos que se forman entre el iniciador y activador, e impide el comienzo de la polimerización. Una vez "consumido" el oxígeno del aire y los inhibidores, se obtendrán los polímeros, detectándose esta situación por el aumento de viscosidad y temperatura en la mezcla. Este detalle, marca el final del tiempo de estado líquido.

A continuación, comienza de una manera muy rápida, la polimerización como consecuencia del efecto Trommsdorff, bajo un enérgico autocalentamiento, no pudiéndose detener ahora el proceso(37).

De esto, se deduce que el oxígeno del aire inhibe la reticulación, ya que actúa anulando cada radical de la polimerización. Así, con el fin de obtener superficies totalmente endurecidas, deberá impedirse que el oxígeno atmosférico se difunda dentro de la película para lo cual, se incluyen parafinas en el ligante reactivo, que flotan sobre la superficie del material aplicado, actuando de pantalla protectora.

3.1.2. PIGMENTOS Y CARGAS.

Son un componente fundamental del material base, ya que son los responsables del color y capacidad de cubrición. Por lo tanto, es imprescindible para la obtención de productos de calidad escoger pigmentos de gran estabilidad para que su color no se altere por la acción ni del sol, ni del medio ambiente.

Las cargas dan relleno y abaratan los materiales y de ellas dependen propiedades tan importantes como la resistencia al deslizamiento y a la abrasión.

Pueden definirse como sustancias pulverulentas especialmente preparadas a finura elevada y, prácticamente insolubles en todos los medios normales de suspensión, ligante y disolvente. Su finalidad, es dar cuerpo a la pintura y, a la vez, conferirle opacidad, coloración y, en ocasiones, ciertas propiedades químicas que permiten aumentar la protección dada al soporte(38).

Generalmente, son de tipo mineral, ya que los productos orgánicos, dado su elevado precio, se utilizan más como colorantes que como pigmentos.

La misión de un pigmento es, por su parte, colorear y hacer opaca la película de pintura para cubrir el soporte. Por otro lado, sus propiedades físicas y químicas ayudan a reforzar la misión protectora de la película de pintura, así, el blanco de zinc, se combina con el aceite de linaza para formar jabones de zinc muy resistentes.

Las características generales que deben reunir los pigmentos, son:

Poder cubriente.

Este término se aplica a dos propiedades inversamente proporcionales, cobertura por opacidad y poder cubriente en superficie.

El **poder cubriente por opacidad**, se define como la superficie máxima de un objeto que es posible recubrir uniformemente con la unidad de peso o de volumen de pintura, de tal manera que desaparezca el color propio del soporte sin distinguir contrastes a simple vista; lógicamente, aquí es imprescindible la naturaleza del pigmento.

El **poder cubriente en superficie**, se expresa por el número de metros cuadrados que es posible cubrir con un litro o un kilogramo de producto. Depende, esencialmente, de la viscosidad de aquél y de su tensión superficial, así como de la naturaleza del soporte(39).

Poder colorante.

Se mide por la cantidad en gramos que es preciso emplear por unidad de peso o volumen de pintura para obtener una película comparable cromáticamente con una patrón y, se define, como la propiedad de comunicar a una mezcla, del pigmento en cuestión con otros, un aspecto general que se acerque más a su propio color.

Debe hacerse notar que la finura de molido aumenta el poder colorante, lo mismo que aumenta el poder cubriente.

El poder colorante, determina las características ópticas de los materiales, factor de luminancia y coordenadas cromáticas.

Estabilidad.

La estabilidad de un pigmento frente a la luz depende, por un lado, de factores propios de la pintura, y por otro, del medio ambiente, humedad, existencia de agentes químicos, y constitución espectral de la luz.

Frente al calor, la estabilidad de los pigmentos dependerá del coeficiente de conductividad térmica, del coeficiente de dilatación y de la resistencia a los choques térmicos.

Resistencia a los agentes corrosivos y atmosféricos.

Su influencia es variable según actúen solos o simultáneamente. Por otro lado, la naturaleza de su acción y efectos, se encuentran íntimamente relacionados con el comportamiento de los materiales frente a la acción de la luz.

Finura y mojabilidad .

De la finura de molido no sólo depende el poder cubriente de la película de pintura, sino también su brillo.

Morfológicamente, los pigmentos pueden clasificarse atendiendo a que sus partículas presenten bordes redondeados o angulosos, asimilables a diversas formas geométricas, o bien, según presenten granulometría continua o discontinua. En cualquier caso, interesa que las características morfológicas del pigmento favorezcan su mojabilidad, propiedad que se denomina "absorción en aceite" y que se define como la cantidad de aceite de linaza, expresada en unidades de peso o volumen, que toma una muestra de 100 g, para pasar del estado sólido al fluido.

Los llamados genéricamente "**pigmentos**" pueden clasificarse en dos grandes grupos, pigmentos propiamente dichos, y cargas.

Pigmentos. Cabe destacar en este grupo a los dos más utilizados en la formulación de los materiales base empleados en la señalización horizontal, amarillos de cromo y cinc, para el color amarillo, y dióxido de titanio, para el color blanco.

Los amarillos de cromo, pigmentos a base de cromato de plomo, se obtienen por precipitación a partir del nitrato o acetato de plomo con bicarbonato potásico. Según sea el medio de reacción, ácido o alcalino, se obtiene una gama de colores, que va, desde el amarillo claro al naranja.

Los amarillos de cinc, por su parte, son cromatos dobles de cinc y potasio. Aunque su poder cubriente es inferior al de los de cromo, son más resistentes que éstos a la acción de la luz y de los sulfuros, además de no ser tóxicos.

El dióxido de titanio, es el pigmento blanco por excelencia(40). Este, se descubrió en el año 1897, por William Gregor, dentro de la "Ilmenita" en Cornwall, aunque ya en el año 1875 M.H.Klaproth, había aislado el óxido del mineral rutilo, en Hungría. No fué hasta los años veinte, cuando tuvo lugar la primera producción comercial del pigmento, por reacción de la ilmenita con el ácido sulfúrico, seguido de una hidrólisis. El pigmento obtenido por este proceso, vía sulfato, se presentaba en una forma cristalina denominada **anatasa**.

El primer pigmento del tipo rutilo aparece en los años cuarenta, utilizando todavía la vía sulfato como etapa inicial del proceso. No es hasta finales de los años cincuenta, cuando se introduce la vía cloruro, para la obtención del dióxido de titanio tipo rutilo(41).

La diferencia entre ambas formas cristalinas del pigmento, rutilo y anatasa, radica sólo en su facilidad para "calear", siendo la anatasa la que presenta una mayor capacidad de autolimpieza de la superficie de la película de pintura, "caleo", mientras que el rutilo presenta una mayor resistencia a la abrasión.

Cargas. Por cargas, se entienden aquellos productos o sustancias inertes, de débil poder colorante y cubriente, que se incorporan a las pinturas por razones técnicas y, muy a menudo, económicas(42).

Las cargas más comunes utilizadas en la fabricación de materiales base para señalización horizontal son **productos alcalino-térreos**, tales como el sulfato de bario, natural y precipitado, el carbonato de calcio, natural y precipitado, sustancias aluminosas (como la alúmina hidratada y el caolín), productos silíceos (como el blanco de sílice, el Kieselgur, el asbesto y el talco).

3.1.3. VEHICULO VOLATIL.

Generalmente se le denomina disolvente. Proporciona al material de base la viscosidad adecuada para su aplicación e influye en el tiempo de secado mediante su velocidad de evaporación. Sólo entra a formar parte de los materiales denominados pinturas convencionales. Aunque en la actualidad se utilizan como vehículo volátil determinados disolventes orgánicos, las normativas medioambientales hacen que el uso del agua como disolvente se esté extendiendo cada vez más(43). Sin embargo, y de forma general, cuando se habla de vehículo volátil en materiales base para señalización horizontal, se sobrentienden disolventes orgánicos.

En el caso de aplicarse el material convencional sobre pavimentos bituminosos, el vehículo volátil contribuye a aumentar su adherencia, al favorecer la mezcla íntima de éste con el betún.

Independientemente del disolvente que se utilice en la formulación del material convencional, el vehículo volátil está constituido por el que se incorpora a la resina y por el adicionado a la pintura para ajustar su viscosidad de aplicación.

La influencia del disolvente en este tipo de materiales es decisiva, ya que de él, no sólo depende la calidad final del film seco, si no que es el responsable directo del fenómeno de "sangrado" (oscurecimiento que tiene lugar en la marca vial al ascender, por capilaridad, los aceites modificadores y el propio betún, redisueltos por el disolvente).

Además, el disolvente junto con el ligante, son los responsables del agrietamiento longitudinal que se produce a lo largo de la marca vial en los pavimentos flexibles(44).

3.1.4. ADITIVOS.

Este último grupo de componentes que entran a formar parte de las formulaciones de los materiales base es muy amplio y se utilizan con el fin de conseguir efectos muy

diversos en los mismos(45). Globalmente, pueden clasificarse en tres grandes grupos: agentes de curado, antisedimentantes y agentes estabilizadores.

Estos últimos, a pesar de utilizarse siempre en proporciones muy pequeñas en la fórmula, pueden llegar a ser imprescindibles; por ejemplo, los agentes secantes en las pinturas alquídicas modificadas.

3.2. ELEMENTOS DE RETRORREFLEXION: MICROESFERAS DE VIDRIO.

El fenómeno de **retroreflexión esférica** nace en el año 1933 en Huntigdon, Pensylvania (USA), con el estudio realizado por Edwin(46) a cerca de la retroreflexión producida en microesferas de vidrio.

En la figura-3.3, se ha esquematizado la retroreflexión que tiene lugar en la marca vial, al incidir una fuente luminosa sobre las microesferas de vidrio contenidas en ella, que actúan como catadioptrio.

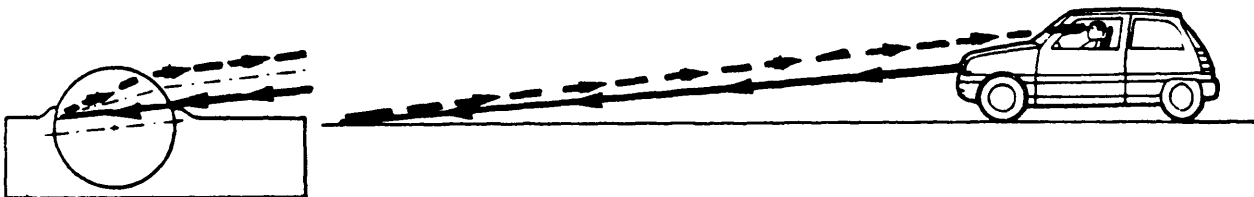


Fig.3.3 Retroreflexión de una marca vial.

La retroreflexión depende(47) directamente del índice de refracción de las microesferas de vidrio, del grado de inmersión de las mismas en la película seca del material base y de su cantidad por unidad de superficie en la marca vial.

El índice de refracción de las microesferas es función de la materia prima empleada en su fabricación, mientras que los otros dos factores, lo son de la cantidad y tipo de vehículo fijo existente en el material base, así como del tratamiento superficial adherente que posea la microesfera.

Además del citado tratamiento convencional hidrófobo, a base de silicona, en la actualidad, y con el fin de mejorar su adherencia al material base de señalización, existen tratamientos superficiales en las mismas, cuyo tipo dependerá de la naturaleza del vehículo fijo.

En las fotografías A1 y A2, puede observarse la distribución de microesferas de vidrio con tratamiento convencional en una pintura alcídica modificada. En las fotografías B1 y B2 por su parte, se observa cómo las esferas tratadas crean verdaderos puentes de unión entre la microesfera y la resina alcídica modificada.

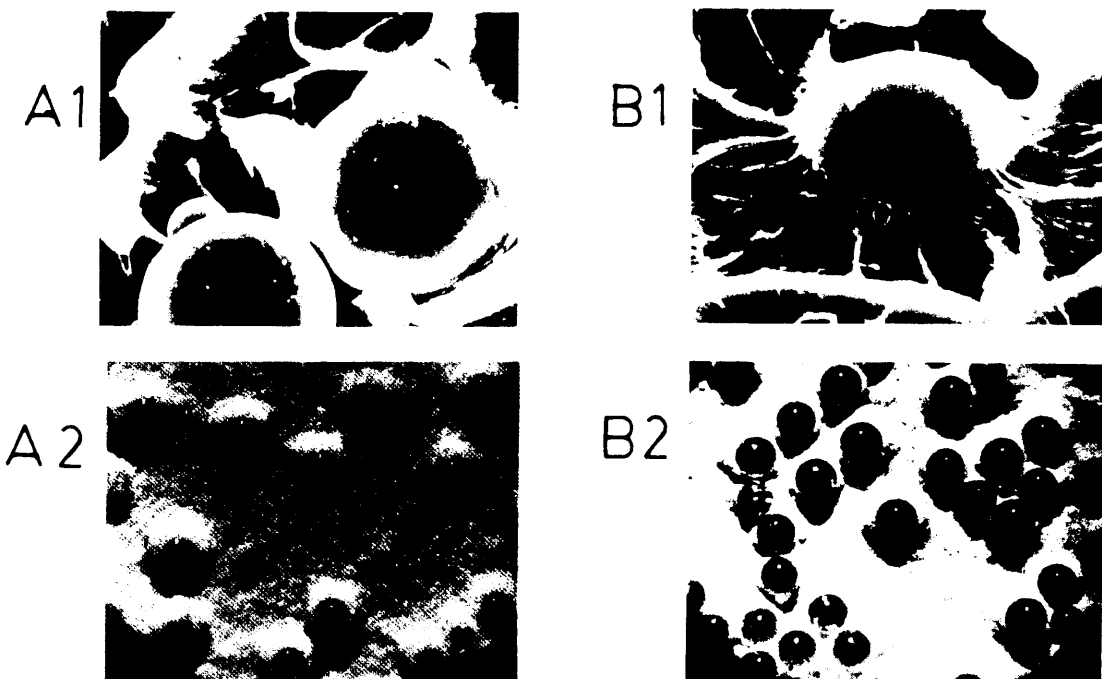


Fig.3.4 Diferencias de adherencia al material base de microesferas tratadas y sin tratar.

Según Steinman y Lowe(48), el empleo de microesferas tratadas conduce a una mejora notable en la retroreflexión de las marcas viales.

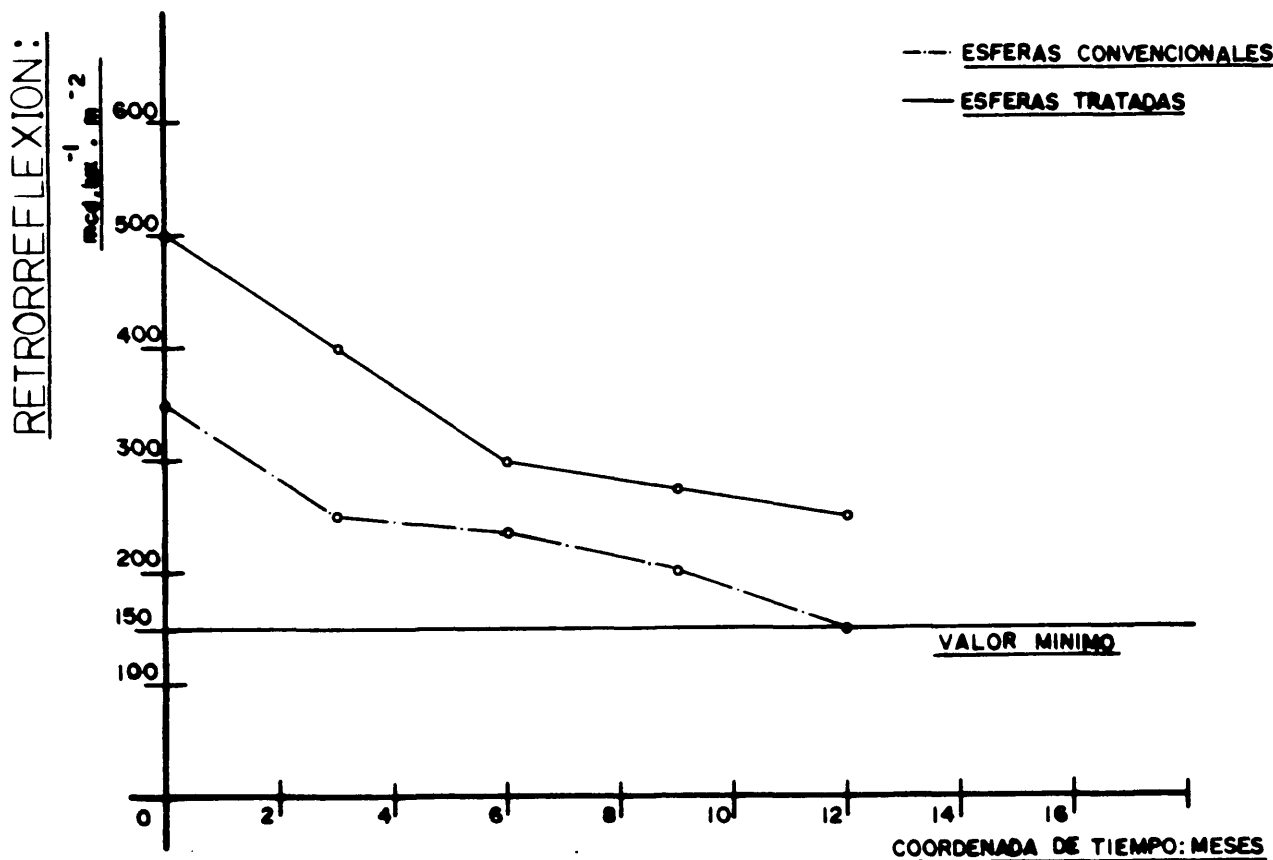


Fig.3.5 Variación con el tiempo de la retroreflexión con esferas convencionales y tratadas.

Las características de las microesferas pueden clasificarse en dos grandes grupos, ópticas o fisico-químicas.

En cuanto a las **ópticas** que, vienen definidas por su "índice de refracción", dependen del tipo de vidrio empleado en la fabricación. Así, las microesferas suelen tener un índice de refracción que varía desde 1.45 hasta 1.90. Para su aplicación en señalización horizontal se consensua que éste debe ser de 1.50.

En la microesfera de 1.50, el punto de retrorreflexión se sitúa casi en el ecuador de la misma y fuera, por lo que la esfera deberá estar sumergida en el material de señalización, entre un 40% y 50% de su diámetro, para ser efectiva.

En la figura-3.6 puede apreciarse como se produce la retrorreflexión en éstas microesferas(49).

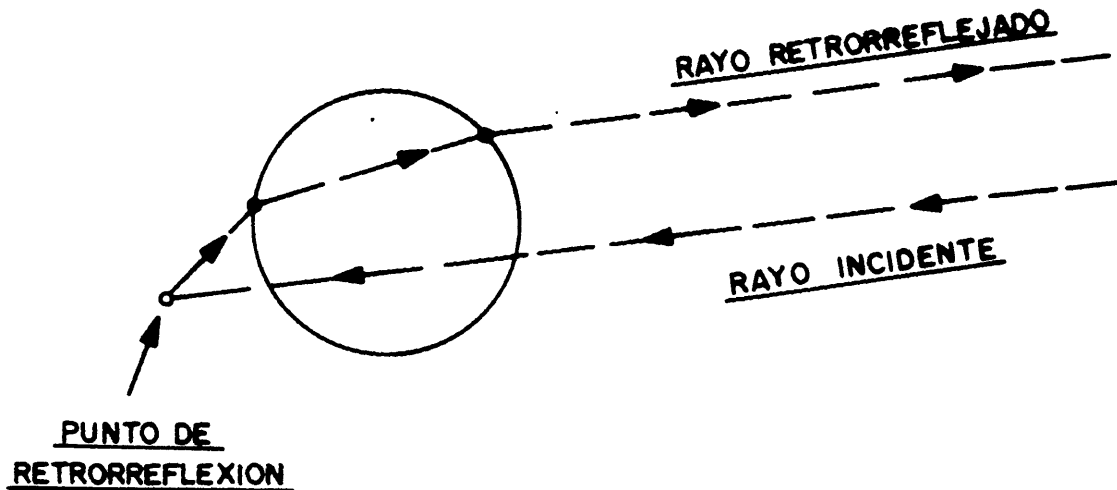


Fig.3.6 Microesfera de índice de refracción 1.50.

A medida que la esfera va emergiendo, consecuencia de la abrasión a que está sometida la marca vial, pierde eficacia de retrorreflexión y, aún en el caso de estar sumergida convenientemente, la superficie del casquete esférico capaz de captar los rayos procedentes de la fuente de iluminación, es relativamente pequeña de acuerdo con los tamaños de microesfera utilizados(50).

En la microesfera de índice de refracción 1.90, el punto de retrorreflexión está situado casi debajo de la misma y en su periferia, por lo que bastará con que éstas se sitúen en la marca vial, con un grado de inmersión comprendido entre un 10% y 20% de su diámetro, para que la retrorreflexión sea efectiva.

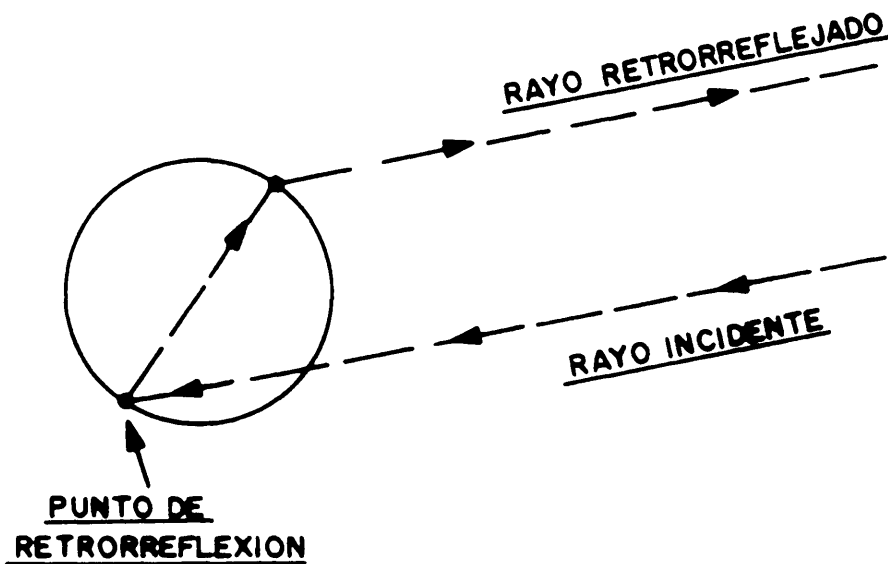


Fig.3.7 Microesfera de índice de refracción 1.90.

Queda claro pues, que éstas, independientemente de su grado de inmersión, siempre serán efectivas, por lo que, desde un punto de vista teórico, el empleo de microesferas de 1.90 frente a las de 1.50 es mucho más aconsejable para obtener una buena retroreflexión.

No obstante, Dale(51), demostró que cuando se usan microesferas de 1.90 en vez de 1.50, el aumento en el coste final de la marca vial, no está recomendado, ya que la mejora de retroreflexión alcanzada no es proporcional a dicho aumento del coste.

RETORREFLEXION:

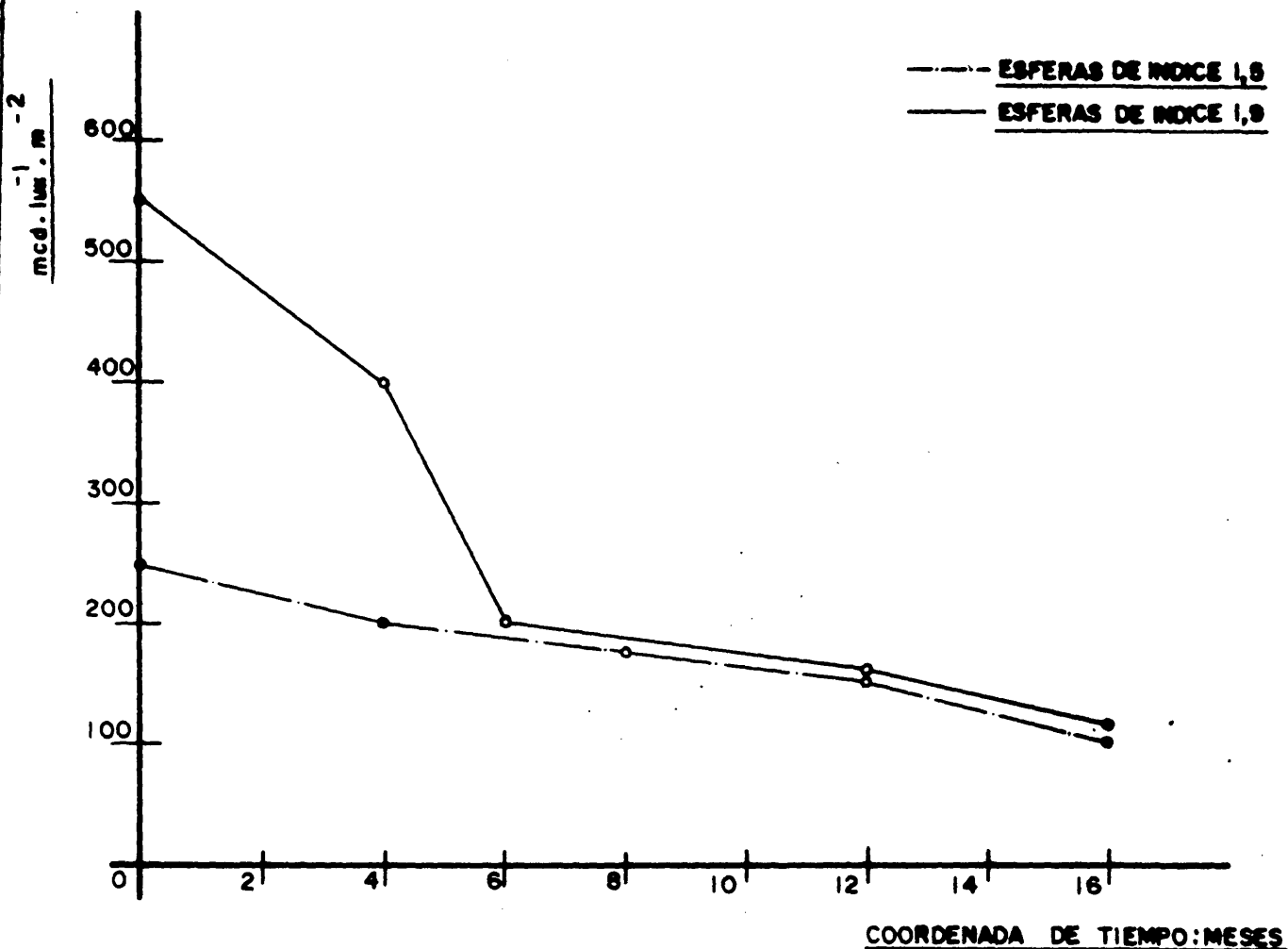


Fig.3.8 Variación con el tiempo de la retrorreflexión con esferas de índice de refracción 1.50 y 1.90.

Por su parte, las características físicas y químicas de las microesferas pueden dividirse a su vez, en tres grupos:

Granulometría. Será tal que permita su distribución homogénea en toda la marca vial, para asegurar no sólo la retrorreflexión inicial, si no a lo largo del tiempo.

Resistencias químicas. Como norma general, las microesferas no deben presentar alteración superficial alguna cuando sean tratadas con, agua, ácidos o cloruro cálcico(52).

Cantidad de microesferas defectuosas. En la actualidad, se toma como valor máximo para este parámetro, el 20%.

La elección adecuada de los distintos componentes que entran a formar parte de la "marca vial", es imprescindible para la obtención de la máxima calidad. Dicha elección, en cuanto al tipo de ligante, cargas y pigmentos, disolventes y aditivos, debe realizarse de acuerdo con unos criterios de comportamiento del material aplicado, básicos para la seguridad vial(53).

Dichos criterios, ordenados de mayor a menor importancia son los siguientes:

1. Visibilidad nocturna
2. Visibilidad diurna
3. Resistencia al deslizamiento
4. Resistencia a la abrasión (desgaste).

Todos están condicionados por la elección de los componentes con los que se formulan los materiales base de las marcas viales, así como por la calidad de las microesferas de vidrio empleadas. Cada uno de los componentes de los materiales de señalización influyen de forma diferente en cada una de estas cuatro propiedades; así, el ligante, es responsable, por un lado, de la visibilidad nocturna, ya que de su cantidad y calidad depende la capacidad de retención de las microesferas de vidrio; por otro lado, además, dependerá también la resistencia a la abrasión.

Las cargas y pigmentos son responsables directos de la visibilidad diurna y también de la resistencia al deslizamiento y, en menor grado, de la capacidad de resistencia al desgaste.

El disolvente, al influir sobre el tiempo de secado, determina la calidad final de la marca vial, ya que, por ejemplo, valores del tiempo de secado muy bajos harán que el material aplicado forme una película superficial que evita

la retención de las microesferas de vidrio; por otro lado, elevados tiempos de secado físico, conducen, sobre todo en pavimentos bituminosos recientemente aplicados, al "sangrado" del firme, lo que se traduce en una pérdida de visibilidad diurna y en una disminución de la resistencia a la abrasión, por contaminación química de la marca vial.

Por último, la elección del tipo de microesferas de vidrio es fundamental para la calidad y duración de la visibilidad nocturna de las marcas viales.

Aunque, individualmente, cada componente tiene mayor influencia sobre determinadas propiedades de las marcas viales, una vez realizada la mezcla, es su equilibrio, lo que determinará la calidad final, ya que todos ellos influyen de forma indirecta en todas y cada una de las propiedades(54).

La elección del material idóneo, en cada caso, no puede realizarse de manera aleatoria, si no a través de ensayos preliminares de laboratorio en los que se estudie la mejor formulación del material, así como su naturaleza, para obtener la máxima calidad en la marca vial.

Dentro de estos ensayos de laboratorio, los más importantes a considerar para cada tipo de material, son los siguientes:

En el caso de pinturas convencionales:

- Sangrado
- Tiempo de secado
- Resistencia a la abrasión
- Color (factor de luminancia)
- Poder cubriente.

Para materiales de larga duración:

-Termoplásticos de aplicación en caliente:

- Resistencia al flujo
- Reología
- Estabilidad al calor
- Punto de reblandecimiento
- Estabilidad al color: resistencia al ensuciamiento.

-Plástico en frío de dos componentes:

- Control del proceso de curado
- Estabilidad del color: resistencia al ensuciamiento
- Dureza superficial.

El amplio abanico de ligantes existentes para ésta aplicación, así como la gran variedad de cargas y pigmentos que se comercializan, ofrecen a los técnicos e investigadores del sector un amplio abanico de posibilidades de elección que les permite mejorar los productos actuales e incluso desarrollar nuevos productos de señalización, teniendo siempre como objetivo fundamental, la "seguridad vial" del usuario(55).

Esta calidad se puede determinar mediante la medida de las propiedades que caracterizan a las marcas viales y que, según lo expuesto hasta el momento, pueden resumirse de la siguiente manera:

Propiedades ópticas:

- Color, responsable de la visibilidad diurna
- Retroreflexión, responsable de la visibilidad nocturna.

Propiedades complementarias:

- Resistencia al deslizamiento.
- Resistencia a la abrasión.

4. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

4.1. PLANTEAMIENTO

Ya que el medio de transmisión de la señalización horizontal es visual, será la **visibilidad** de las marcas viales su propiedad más importante. Esta visibilidad deberá ser efectiva de día y de noche, independientemente de las condiciones climatológicas(56).

Ya se ha apuntado con anterioridad, que las marcas viales son visibles en virtud del elevado valor de la **relación de contraste** definida como el cociente entre el factor de luminancia de la marca vial y del pavimento. Así, las líneas blancas serán más visibles en carreteras de color oscuro que en aquellas de pavimento de hormigón, de color grisáceo.

El factor de luminancia de las marcas viales y del propio pavimento, es el resultado de la reflexión de la luz solar durante el día, o del alumbrado de servicio de la carretera y de los faros de los vehículos durante la noche. Sin embargo, esto no es solamente una cuestión de contrastes de color, sino que depende de las texturas superficiales y de los ángulos de iluminación y observación(57).

La **visibilidad diurna**, por lo tanto, es relativamente fácil de obtener mediante la utilización de colores claros que contrasten con el color del pavimento.

En el caso de pavimentos con tonos de color claro, hormigón o pavimento bituminoso sin asfalto en superficie, el contraste obtenido, con el color blanco, suele considerarse satisfactorio, ya que se utilizan productos con valores elevados del factor de luminancia.

Es preciso señalar, por otra parte, que las esferas de vidrio añadidas por postmezclado disminuyen el valor del factor de luminancia y, en consecuencia, el valor de la relación de contraste con el pavimento así como, la visibilidad diurna(58).

La **visibilidad nocturna**, determinada por el "coeficiente de retrorreflexión" o simplemente "retrorreflexión", sólo se produce en marcas viales con microesferas de vidrio y en ausencia de lluvia ya que bajo esta situación disminuye considerablemente. En este último caso, la película de agua que cubre el material, provocaría la reflexión especular de

la luz incidente, por lo que no existiría retroreflexión. Para evitar éste inconveniente se hace necesario utilizar materiales que den lugar a marcas viales con resaltes que superen el espesor de la película de agua(59).

Así, desde el punto de vista de la **seguridad vial**, la propiedad más importante de la señalización horizontal es, sin duda, su **visibilidad** tanto nocturna como diurna(60).

Tanto la carencia de normativa que regule la calidad de la señalización horizontal en algunos países como la falta de control exhaustivo de su calidad en otros, han conducido a un desconocimiento, casi absoluto desde el punto de vista científico, de estos materiales, lo que se ha traducido en:

19. Ausencia de desarrollo que conduzca a nuevos productos y carencia de calidad en los existentes.
29. Elección aleatoria de los materiales empleados en la señalización, sin tener en cuenta el tipo de sustrato.
39. Desconocimiento de la variación de propiedades ópticas, visibilidad diurna y nocturna.
49. Influencia del medio ambiente en el deterioro de las marcas viales(61).
59. Falta de correlaciones que permitan predecir el comportamiento de los materiales.
69. Falta de criterio a la hora de fijar los valores mínimos a exigir.

4.2 OBJETIVOS.

Por lo expuesto en el punto anterior y como consecuencia de que una buena "seguridad vial" pasa, necesariamente, por una calidad de la señalización horizontal, se tomó como fin primordial del presente trabajo, la determinación de criterios claros que, una vez aplicados, pudieran dar lugar a una marca vial de calidad, basada en una visibilidad buena y duradera, tanto de día como de noche.

Por todo ello, y de acuerdo con las normativas actuales que controlan la calidad de los materiales base así como la de las marcas viales los objetivos básicos del presente trabajo, han sido los siguientes:

1.- Obtención de materiales base:

-Pinturas convencionales: alcídica modificada o acrílica termoplástica.

-Materiales de larga duración: termoplástico de aplicación en caliente o plástico en frío de dos componentes.

2.- Control de las propiedades que determinan su calidad final.

3.- Estudio de la influencia de los agentes externos sobre los distintos materiales.

4.- Estudio del comportamiento del material sobre diferentes substratos, hormigón y pavimento bituminoso, con el fin de sentar las bases científicas y técnicas que permitan realizar la elección del material en función del tipo de firme.

5.- Determinación de la relación existente entre las propiedades ópticas, color y retrorreflexión, con los resultados obtenidos en laboratorio y en campo.

6.- Obtención de unos períodos mínimos de garantía que indiquen la relación de duración existente entre los distintos materiales.

5. PROPIEDADES OPTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN SEÑALIZACION HORIZONTAL.

La determinación de las características ópticas de los materiales de señalización representa el factor determinante a la hora de evaluar su calidad. Las propiedades que determinan estas características son el **color**, medido a través del factor de luminancia y las coordenadas cromáticas, y la **retroreflexión**.

La primera de ellas, el color, es una medida de la eficacia de la marca vial por el día, mientras que la segunda, retroreflexión, determina la calidad de su visibilidad nocturna. Ambas propiedades son fundamentales a la hora de definir la seguridad vial en una carretera. La delimitación de carriles, la ordenación de tráfico, la delimitación de arcones, los cruces, etc, no serían viables de forma segura sin una señalización efectiva y de calidad tanto de día como de noche, cuando el riesgo de accidente es aún mayor (62).

5.1. COLOR. FACTOR DE LUMINANCIA Y COORDENADAS CROMATICAS.

El color de una marca vial tiene como objetivo principal servir de guía al conductor haciendo visible la marca vial además de cumplir una misión informativa. La medida del color se lleva a cabo mediante la determinación del **factor de luminancia**(β) y de las **coordenadas cromáticas**(x, y).

Definir el color es una de las tareas más difíciles que pueden plantearse, por lo que únicamente se tratará de realizar una caracterización del mismo.

Para que la percepción tenga lugar, es necesario que sobre la retina del ojo del observador incida energía radiante, que viene determinada por la **irradiancia** (cantidad de energía recibida por unidad de tiempo y de superficie) y por la **composición espectral** (la energía correspondiente a cada intervalo infinitesimal de longitud de onda a lo largo del espectro). El estudio de las variaciones de estas dos magnitudes en el espacio o en el tiempo y su medida, constituye la **física del color**(63-64).

Además, la percepción a partir de la sensación, será interpretada por el observador constituyendo esta parte del fenómeno de la visión, la **psicología del color**.

El observador interpreta la percepción de un color por medio de tres parámetros psíquicos, **tono, claridad y saturación**.

El tono es el que permite distinguir las sensaciones visuales en rojas, amarillas, verdes, azules, etc. Este atributo tiene una variación continua, es decir, no tiene extremos y sus términos forman un circuito cerrado.

La claridad es fácil de comprender, ya que existen sensaciones simples que no poseen más que éste parámetro, las llamadas **sensaciones acromáticas** que van desde el negro al blanco, pasando por los grises.

La saturación permite distinguir las sensaciones que tienen el mismo tono y claridad por acercarse más o menos al gris correspondiente. Este gris, precisamente, posee la saturación mínima y constituye uno de los extremos de éste atributo. El otro extremo, es la sensación, de la misma claridad y tono, que más se aparte de él.

En lo que respecta a las unidades de medida de cada uno de los parámetros, las más extendidas, son las establecidas por el sistema "Munsell". En éste, cada uno de los parámetros está representado por una variable, pretendiéndose que los pasos sean perceptualmente iguales en cada una de ellas. En la figura-5.1 se esquematiza la esfera de color de Munsell.

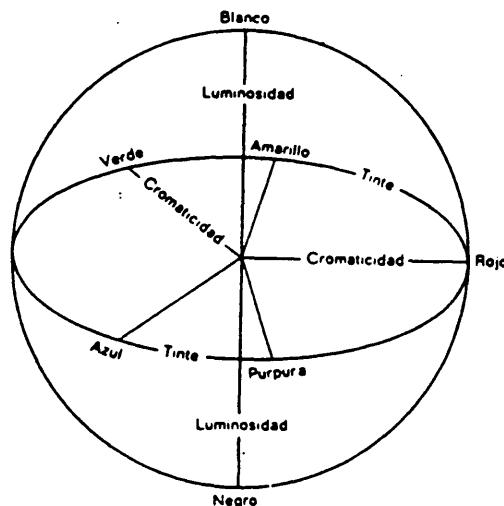


Fig.5.1 Esfera de color de Munsell.

- Claridad (C)**, por valor Munsell (V), que varía de 0 a 10.
- Tono (T)**, por tono Munsell (T), que divide el circuito de tonos en 100 partes.
- Saturación (S)**, por croma Munsell (C), con una unidad de medida tal que llega hasta valores de 18 a 20 unidades.

Así, los tres parámetros de la percepción psíquica de un color son independientes entre sí y constituyen una especificación de éste. A veces, se reúnen tono y saturación, dándoles el nombre de **cromaticidad**; el de claridad, se relaciona con el concepto de **luminosidad**, siendo ésta especificación poco conveniente, ya que presenta la dificultad del establecimiento de escalas por cada uno de los atributos y de tantos sistemas de especificación, como observadores.

Por otro lado, la especificación puramente física por medio de la irradiación espectral, tampoco es conveniente por no tener en cuenta la parte esencial del observador.

Por tanto, el problema quedaría resuelto estableciendo una conexión entre el observador y la irradiancia espectral conocida con el nombre de **psicofísica del color**.

PSICOFISICA DEL COLOR.

Se ha demostrado que las respuestas dadas por el sistema óptico humano varían muy ligeramente entre los individuos considerados con visión "normal". Sin embargo, éstas diferencias, en determinadas personas, pueden ser tales que, para ellas, existan regiones del espectro en las que solo son capaces de distinguir variaciones en la intensidad de la luz percibida y no las que son consecuencia de la longitud de onda. tales individuos, sin sensibilidad para los diferentes colores o para un determinado grupo de ellos, son conocidos como daltónicos.

La psicofísica del color resuelve este problema, al definir un observador patrón, cuyas características derivan de las psíquicas del observador medio. Para establecer el observador patrón, hay que fijar su sensibilidad espectral a la energía radiante. En el año 1924 fue recomendada por la

CIE la curva de eficiencia luminosa fotópica, V_λ , que representa la sensibilidad espectral del observador medio relativa a la sensibilidad máxima en la longitud de onda de 555nm, dada por, $K = 683$ lúmenes/watio (Figura-5.2).

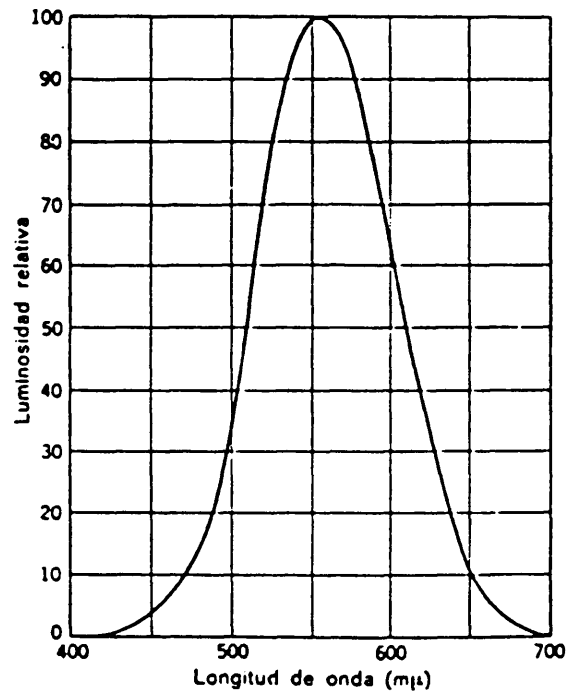


Fig.5.2 Curva de eficiencia luminosa del observador patrón.

ESPECIFICACION DE LOS COLORES A PARTIR DE TRES PRIMARIOS.

De acuerdo con esta definición de observador patrón, se puede especificar de forma directa y mediante una magnitud psicofísica, uno de los parámetros de color procedente de una fuente de energía radiante, la claridad. Esta magnitud, recibe el nombre de luminancia y su medida es el objeto de la fotometría.

Sea una superficie emitiendo energía radiante, determinada físicamente por su irradiancia espectral H_λ . La luminancia de esta superficie, vendrá dada por:

$$L = k \int_0^{\infty} H_\lambda \cdot V_\lambda \cdot d(\lambda) \quad (5.1)$$

La integración puede realizarse por el método de sumatorios, aunque los valores de V_λ se encuentran convenientemente tabulados.

Esta especificación es suficiente para los colores acromáticos. Para los demás, se necesitan otras dos variables, ya que como se ha visto, el color es tridimensional. Las otras dos variables que faltan y que tienen que corresponder en cierta manera a los parámetros de tono y saturación, se reúnen, a veces, con el nombre de **cromaticidad del color**. Su especificación se fundamenta, por un lado, en el hecho de que todo color puede igualarse por la mezcla de otros tres, convenientemente escogidos y, por otro, en las leyes de Grassman. De todo ello, resulta que la especificación de la cromaticidad de los colores puede hacerse a partir de cantidades de tres primarios, verde, rojo y azul, con cromaticidad conocida y que es preciso mezclar para igualar el color a especificar.

Estas cantidades son las **luminancias**, ya que son las únicas variables que quedan libres en los colores primarios con método de medida y especificación. Así, escogidas como ejemplos, una luz roja, otra verde y otra azul como colores primarios designándolas como, R, V y A, respectivamente, un color cualquiera, C, vendrá expresado en función de ellos:

$$C = MR + NV + PA \quad (5.2)$$

donde cada uno de los sumandos del segundo miembro, representa la luminancia que tiene cada primario para que su mezcla iguale al color de la luz dada. Los coeficientes, M, N y P, representan al color del sistema de primarios (R, V, A) y se denominan coeficientes tricromáticos del color en dicho sistema.

Hay que tener en cuenta, que los tres coeficientes tricromáticos, M, N y P, no son independientes entre sí, una vez especificada la luminancia del color dado, L_c , ya que tiene que cumplirse:

$$L_c = MR + NV + PA \quad (5.3)$$

distinguiéndose ésta ecuación de la anterior, por su significado puramente fotométrico; es decir, como relación entre las luminancias solamente. Por eso, únicamente suelen darse las dos variables,

$$m = \frac{M}{M+N+P} \quad ; \quad n = \frac{N}{M+N+P} \quad (5.4)$$

que junto con la L_c , constituyen la especificación completa del color.

No obstante, ésta forma de especificar un color depende del observador, quien decide la igualdad entre el color a especificar y el color de la mezcla que se obtiene a partir de los primarios del sistema.

La forma más sencilla y, al mismo tiempo más completa, de expresar esta dependencia de los sistemas de especificación de tres primarios del observador, es por medio de las llamadas **curvas de mezcla espectrales**. Estas tres curvas, representan la cantidad de cada primario que se necesita para igualar a cada uno de los colores espectrales puros.

En la figura-5.3, se presentan las curvas de mezclas espectrales encontradas por Wright, utilizando también como primarios, luces monocromáticas de, 460 nm, 530 nm y 650 nm. En estas curvas, se pueden observar valores negativos que corresponden a coeficientes tricromáticos negativos; esto se debe a que no es posible encontrar tres primarios con los que se puedan obtener todos los colores del espectro.

Una propiedad muy importante de las curvas de mezcla espectrales, es que una vez determinadas para un observador y un sistema de primarios, no es preciso volver a determinarlas cuando se utiliza otra terna de primarios, manteniendo el observador. Las nuevas curvas de mezcla, se obtendrán, multiplicando cada una de las tres gráficas del antiguo por ciertos coeficientes, positivos o negativos, y sumando los resultados.

También, la curva de eficiencia luminosa de cada observador, tiene que ser una combinación lineal de sus curvas de mezclas espectrales. Los coeficientes por los que hay que multiplicar cada una de ellas, se denominan **coeficientes de luminosidad** de las curvas respectivas(Figura-5.3).

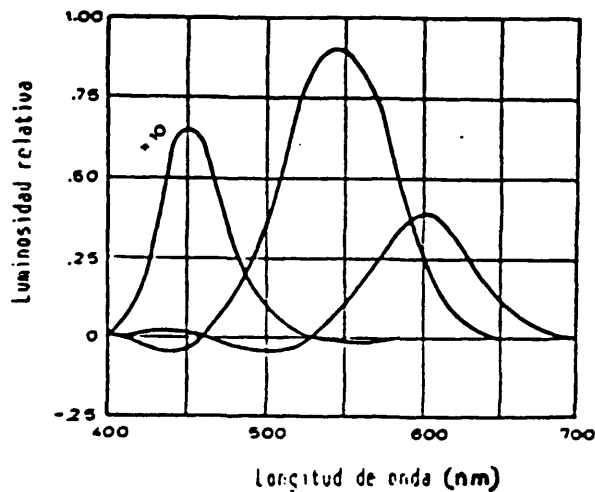


Fig.5.3 Coeficientes tricromáticos del espectro obtenidos por WRIGHT.

OBSERVADOR PATRON Y SISTEMA DE PRIMARIOS CIE.

Establecer el observador patrón de colorimetría, no resulta difícil una vez fijadas sus curvas de mezcla espectrales, análogamente a como se hizo para el observador patrón de fotometría fijando su curva de eficiencia luminosa. Esto, fue lo que se acordó en la reunión de la CIE en el año 1931 donde, basándose en las medidas de Guild (siete observadores) y de Wright (cuarenta y cinco observadores), se tomaron tres curvas de mezcla como definición del observador patrón. Estas curvas, prácticamente coinciden con las de la figura-5.2, ya que, en realidad, se utilizan en la práctica una combinación lineal homogénea de ellas(65).

Las curvas de mezcla del observador estándar, acordadas en la reunión de la CIE en el año 1931, deberán cumplir las siguientes condiciones:

1.- Que una de ellas coincida con la curva de eficiencia luminosa CIE, del año 1924, del observador patrón.

2.- Que ninguna de ellas tuviera valores negativos, de tal forma que, ningún color del espectro y tampoco ningún otro, tuviera coeficientes tricromáticos negativos en el sistema.

Las curvas de mezcla espectrales recomendadas, se dan en la figura-5.4. Para distinguir el sistema patrón de los demás, los coeficientes tricromáticos reciben el nombre de **valores triestímulos** y las curvas de mezcla, el de **curvas de valores triestímulos del espectro**. Por definición, los coeficientes de luminosidad de estas curvas, son, 0, 1 y 0.

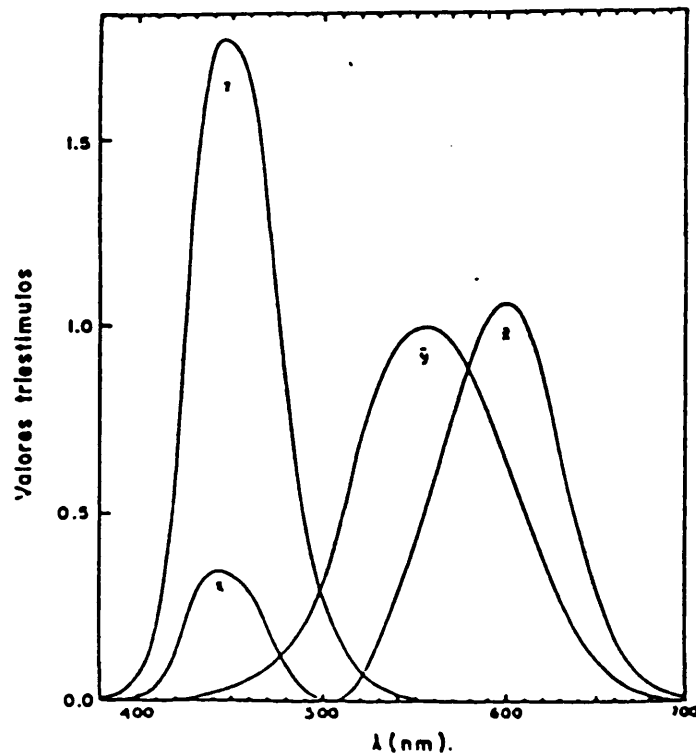


Fig.5.4 Funciones de sensibilidad x_{λ} , y_{λ} , z_{λ} (CIE - 1931).

Los valores triestímulo de los colores espectrales se representan por, x_{λ} , y_{λ} , z_{λ} , siendo los de un color cualquiera, X, Y, Z.

Los valores deducidos a partir de la ecuación-(5.4), son:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5.5)$$

Dichos valores reciben el nombre de **coordenadas cromáticas** y, que en conjunto, puede decirse que están correlacionadas con la **cromaticidad del color**, conjunto de los dos parámetros tono y saturación.

Por otro lado y desde un punto de vista práctico, se ha generalizado el uso del valor triestímulo "Y", como medida de la capacidad del estímulo correspondiente para obtener el parámetro de claridad, que se conoce normalmente como **factor de luminancia o reflectancia luminosa**, según se exprese en tanto por uno o tanto por ciento respectivamente.

Si se representan en un sistema cartesiano los valores de "x" e "y", se obtiene el llamado **diagrama cromático CIE-1931** (Figura-5.5). En él, se ha dibujado la curva lugar geométrico de los puntos representativos de los colores del espectro y la recta que une sus dos extremos, representantes de los púrpuras más saturados.

En la figura-5.5, se observa que los colores primarios del sistema, están representados por los puntos (1,0), (0,0) y (0,1) y, por tanto, caen fuera de la región de los colores reales. Esto, indica que los primarios son colores ficticios imposibles de obtener experimentalmente, lo cual, podía preverse del hecho de que toda la luminancia resida en uno de ellos.

Es importante resaltar, que este diagrama no es uniforme, ya que la distancia entre los puntos representativos de dos colores, no es proporcional a la diferencia de su cromaticidad. Esto, puede verse de forma más clara, en la figura-5.6, en la que se representan las **curvas de perceptibilidad** de diferencias de cromaticidad. La distancia del punto interior de cada elipse a su contorno, corresponde a 100 veces la diferencia mínima perceptible. Con esto se puede tener una idea del gran número de colores que un observador normal puede distinguir como diferentes, que teniendo en cuenta además, los que se obtienen por variación de la luminancia, resultan más de 10 millones.

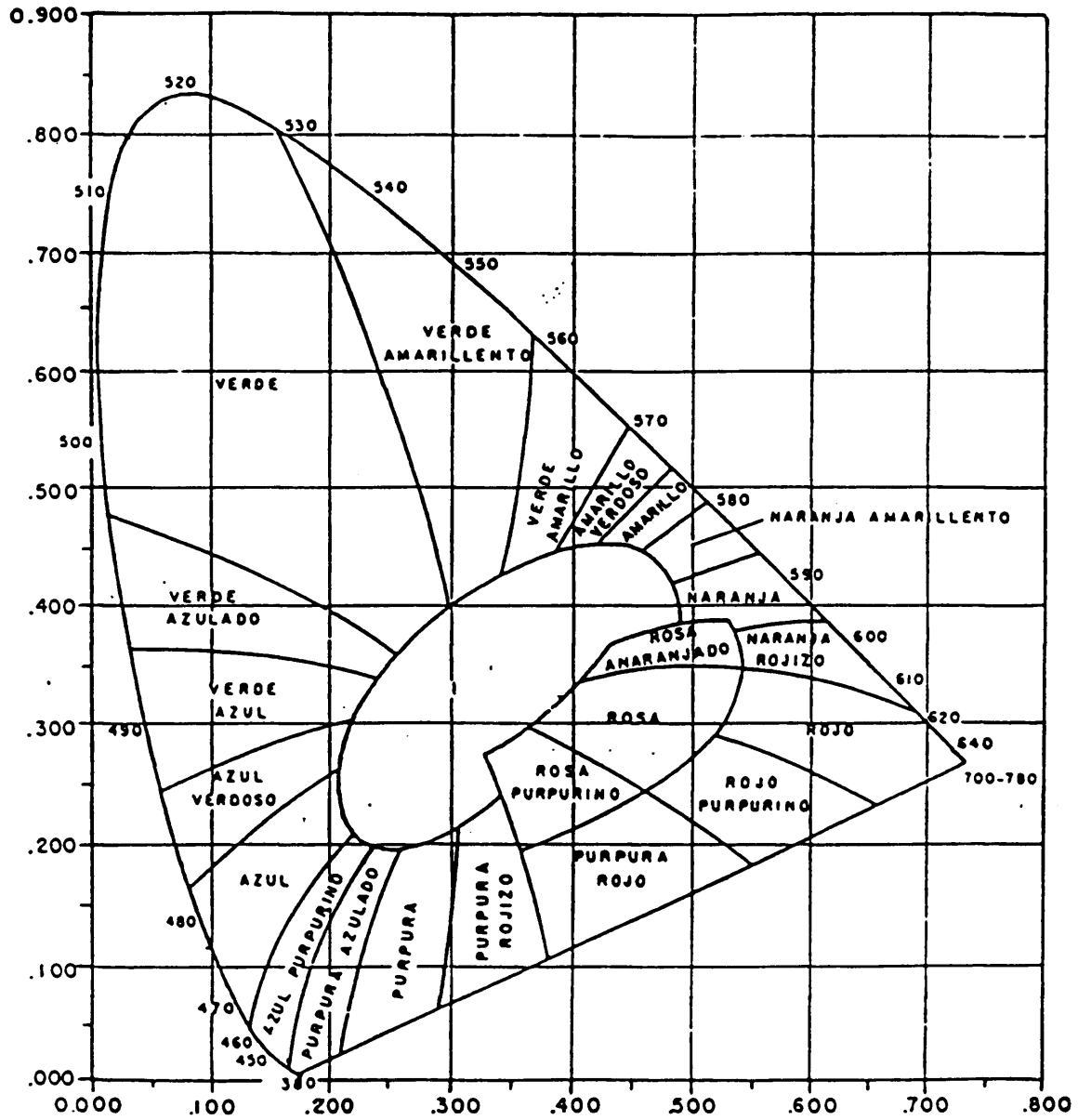


Fig.5.5 Diagrama CIE-1931.

ESPECIFICACION DEL COLOR DE OBJETOS ILUMINADOS.

Las luces pueden provenir de fuentes primarias, materiales emisores de energía radiante, o de fuentes secundarias, materiales que reflejan, transmiten, difunden o esparcen la energía radiante. La mayoría de los que en la vida ordinaria se consideran como objetos, pertenecen a esta segunda clase.

No se debería hablar de color de un objeto, sino del color de la luz que proviene de él; no obstante, se hablará del color de un objeto por comodidad. una superficie no luminosa para que pueda ser percibida, tiene que ser iluminada por la luz de una fuente. Una vez iluminada, puede considerarse como luminosa en sí misma, pero teniendo en cuenta que su irradiancia espectral depende, tanto de sus propiedades espectrofotométricas como de la **irradiancia espectral del iluminante**, energía radiante que le irradia(66).

Las propiedades espectrofotométricas de un material están determinadas, si actúa por transmisión, por su **transmitancia espectral**, T_{λ} (relación entre la energía transmitida y la energía incidente para cada longitud de onda), y si actúa por reflexión, por su **reflectancia espectral**, R_{λ} (relación entre la energía reflejada y la incidente para cada longitud de onda).

Es necesario resaltar, la importancia que tiene el iluminante en el color de los objetos. Una especificación en el color de un material, sin definir al mismo tiempo el tipo de iluminante utilizado, es absolutamente inútil. En los casos en que el material es muy selectivo, los cambios de color, al variar el tipo de iluminante, pueden ser asombrosos. Este, es el fundamento de los pares de muestras denominados, **metámeros**; se trata, de muestras que presentan el mismo color bajo un iluminante, pero que a causa de sus distintas propiedades espectrofotométricas, bajo otro iluminante presentarían otro color.

Por último, en las mediciones del color, tiene una gran influencia la geometría empleada; es decir, las condiciones de iluminación y de observación. Así, cuando se especifiquen las coordenadas cromáticas de un objeto, es necesario adjuntar, las condiciones geométricas de iluminación y de observación, además del tipo de iluminante utilizado.

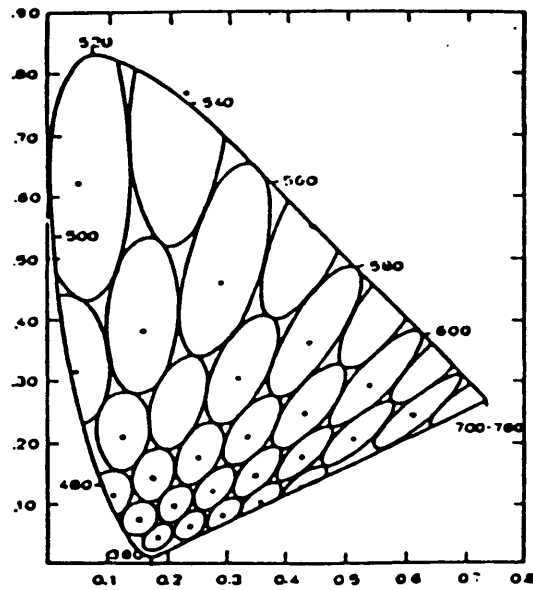


Fig.5.6 Curvas de perceptibilidad de diferencias de cromaticidad.

5.1.1. ILUMINANTES PATRON CIE.

Se entiende por **iluminante** una radiación con una distribución espectral de energía relativa perfectamente definida en el intervalo de longitudes de onda que son capaces de influir en el color percibido de los objetos.

Para facilitar los cálculos y uniformizar los resultados, se ha acordado, internacionalmente, realizar las medidas de color de los objetos y el cálculo de sus coordenadas CIE empleando, siempre que sea posible, uno de los iluminantes patrones siguientes(67-68):

- Iluminante patrón - A**; se define en términos de distribución espectral relativa, como el iluminante colorimétrico que representa la radiación de temperatura de color de 2855.6 K.

-**Iluminante patrón - B**; se define en términos de distribución espectral relativa, como el iluminante colorimétrico que representa la luz directa del sol con una temperatura de color de 4874 K.

-**Iluminante patrón - C**; se define en términos de distribución espectral relativa, como el iluminante colorimétrico que representa la luz del día; presenta una irradiancia o distribución espectral intermedia, entre la luz de un día con cielo cubierto y la luz del cielo norte, con una temperatura de color de 6774 K.

-**Iluminante patrón - D 65**; se define en términos de distribución espectral relativa, como el iluminante colorimétrico que representa la luz del día pero, conteniendo parte de la región UV, con una temperatura de color de 6504 K.

El iluminante D-65 se diferencia de los otros iluminantes, en que presenta radiación UV. Tiene una región espectral de 300 nm a 830 nm, que incluye el UV cercano.

El iluminante CIE A, se consigue con el empleo de una fuente estándar A, que consiste en una lámpara de filamento de tungsteno. Las fuentes B y C resultan de la combinación de la fuente A con una serie de filtros de disoluciones de diferente composición química.

El iluminante D-65 se obtiene mediante el empleo de una lámpara de xenon o de halógeno-tungsteno, las cuales proporcionan luz perteneciente a la región UV.

5.1.2. CONDICIONES DE ILUMINACION Y DE OBSERVACION.

En la publicación CIE nº 15.2 (1986), se recogen las diferentes geometrías empleadas en las mediciones de color:

- 1.- 45º/Normal que de forma abreviada (45º/0º)
- 2.- Normal/45º que de forma abreviada (0º/45º)
- 3.- Difusa/Normal de forma abreviada (d/0º)
- 4.- Normal/Difusa de forma abreviada (0º/d).

El primer término indica la geometría de irradiación o de iluminación, **ángulo de incidencia**, mientras que el segundo indica la geometría de medida, **ángulo de observación**.

1.- 45º/Normal.

La muestra es iluminada por uno o más haces cuyos ejes forman un ángulo de $45 \pm 2^\circ$ con la normal a la superficie de la muestra a medir. El ángulo formado entre la dirección de observación y la normal a la superficie de la muestra, no ha de exceder de 10° . El ángulo formado entre el eje de incidencia o de iluminación y cualquier rayo de iluminación, no puede ser superior a 8° . Esta misma restricción, se exige también a la luz de observación.

2.- Normal/45º.

La muestra es iluminada por un haz cuyo eje, forma un ángulo que no excede de 10° con la normal a la superficie. La muestra es observada, con un ángulo de $45 \pm 2^\circ$ con la normal. El ángulo formado entre el eje y cualquier rayo de luz de iluminación, no puede exceder de 8° . Esta misma exigencia, se debe cumplir en la luz de observación.

3.- Difusa/Normal.

La muestra es iluminada a través de una esfera integradora. El ángulo entre la normal a la muestra y el eje de observación, no podrá ser superior a 10° . El ángulo formado entre el eje y cualquier rayo de luz de observación, no puede exceder a 5° .

4.- Normal/Difusa.

La muestra es iluminada por un haz cuyo eje formará un ángulo con la normal a la muestra, no superior a 10° . El flujo reflejado, es recogido por medio de una esfera integradora. El ángulo entre el eje de luz de iluminación y cualquier rayo de haz de iluminación, no podrá exceder de 5° .

5.1.3. MEDIDA DE COLOR MEDIANTE INSTRUMENTOS.

Los instrumentos utilizados para la comparación y medida del color pueden agruparse en dos categorías fundamentales; aquéllos que precisan de un observador para determinar visualmente cuándo el color de la muestra iguala al del testigo y, aquéllos otros que miden fotoeléctricamente el porcentaje de reflectancia de la muestra testigo.

Los instrumentos empleados para medir el color pueden hacer las mediciones basándose en métodos espectrales, **espectrocolorímetros**, o bien, en métodos triestímulos, **colorímetros triestímulos**.

Los colorímetros triestímulos emplean tres filtros coloreados, azul, verde y ámbar, a través de los cuales se efectúa la medida de reflectancia. Los espectrocolorímetros, miden la reflectancia mediante bandas estrechas sobre la totalidad del espectro, descomponiendo la luz mediante prismas o redes de difracción en bandas de 10 nm a 20 nm, pudiéndose obtener, por tanto, la representación gráfica de un color dado.

Los valores obtenidos mediante el empleo de colorímetros triestímulos, se conocen con el nombre de **valores triestímulos**, y se designan con las letras, X, Y, Z. Como los espectrocolorímetros, descomponen la luz en una serie continua de bandas estrechas, obteniendo de esta forma un número equivalente de valores de difícil manejo en la práctica. Estos, se representan en un gráfico, en el que se ordenan los valores del porcentaje de reflectancia correspondiente a cada una de las bandas del espectro visible, conocido con el nombre de **espectro de color** de la muestra a medir.

A partir de los valores triestímulos, se pueden obtener las coordenadas de cromaticidad (x, y, z) según se indicó en la ecuación(5.5).

Aunque las coordenadas cromáticas pueden obtenerse empleando colorímetros triestímulos o espectrocolorímetros, los valores obtenidos a partir de métodos espectrales son más exactos y reproducibles, hasta el punto de que en la publicación CIE n°15 (1971) se recomiendan las técnicas espectrales. Por eso, en la toma de datos realizada en el presente trabajo, tanto en campo como en laboratorio, se utilizó un método de medida basado en técnicas espectrales.

Los instrumentos de medida del color pueden calibrarse con pastillas de sulfato de bario. Sin embargo, en los colorímetros triestímulos, los filtros no son lo suficientemente parecidos a las funciones de los valores triestímulos CIE, por lo que es necesario calibrar el instrumento con una muestra patrón que posea similares características a las de las muestras que se quieren medir. Por último, los patrones empleados han de calibrarse con la misma geometría de **iluminación-observación** y el mismo iluminante que se vaya a emplear para las mediciones de las muestras problema.

5.1.4. VALORES TRIESTIMULOS.

Cuando se ilumina un objeto con un iluminante determinado, los valores triestímulos (X,Y,Z) de este objeto, obtenidos con un espectrocolorímetro, vienen dados por las siguientes funciones:

$$X = K \int_{380}^{740} R(\lambda) \cdot S_x(\lambda) \cdot x(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (5.6)$$

$$Y = K \int_{380}^{740} R(\lambda) \cdot S_y(\lambda) \cdot y(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (5.7)$$

$$Z = K \int_{380}^{740} R(\lambda) \cdot S_z(\lambda) \cdot z(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (5.8)$$

donde:

$R(\lambda)$, es la reflectancia a la longitud de onda o factor de reflectancia espectral.

$S_x(\lambda)$; $S_y(\lambda)$; $S_z(\lambda)$, son los coeficientes de distribución espectral del iluminante, y,

$x(\lambda)$; $y(\lambda)$; $z(\lambda)$, las funciones de sensibilidad del observador patrón CIE.

La integración de cada curva en la región del espectro visible, de 380 nm a 740 nm, da los valores numéricos para los correspondientes valores triestímulos (X,Y,Z) (69).

5.1.5. COORDENADAS CROMATICAS.

Ya que para determinar un color se requieren tres números, "valores triestímulos", con el fin de representar gráficamente un color, hará falta un diagrama tridimensional (70,71,72,73).

Para evitar esta dificultad, se introducen tres magnitudes, x,y,z, conocidas con el nombre de "coordenadas cromáticas", las cuales se definen a partir de los valores triestímulos, de acuerdo con la ecuación (5.5).

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad ; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (5.9)$$

de tal forma que, $x + y + z = 1.$ (5.10)

Por tanto, dos cualesquiera de estas magnitudes, son suficientes para definir un color; normalmente, se escogen, x e y. Así, un color del espectro queda representado por un punto en un sistema de dos ejes coordenados rectangulares.

Por último, si se realiza el cálculo de "x" e "y" para todos los colores del espectro y se efectuase su representación gráfica, se obtendría la figura-5.5.

5.2. RETRORREFLEXION.

Desde el punto de vista teórico, un material retrorreflectante perfecto es aquél que refleja toda la luz que no ha absorbido, en sentido opuesto y en la misma dirección a la de la luz incidente. No obstante, los materiales retrorreflectantes no son totalmente perfectos, por lo que la luz retrorreflejada se distribuye de una forma aproximada a la de la luz incidente.

Desde hace tiempo, se vienen empleando este tipo de materiales en la señalización horizontal. Estos, son los responsables de la visibilidad nocturna en la carretera por lo que juegan un papel decisivo en la seguridad vial. Además de los dispositivos tradicionales, existen otros, retrorreflexivos, destinados al igual que los anteriores, a aumentar la seguridad vial, como son los captafaros, los conos retrorreflexivos y los dispositivos de balizamiento.

La colorimetría de los materiales retrorreflectantes requiere condiciones de medida especiales debido a que la distribución espectral de la luz reflejada es diferente, dependiendo de que la iluminación sea de día o de noche. Es necesario disponer de unos criterios adecuados para la precisión de las mediciones colorimétricas, así como las de retrorreflexión y elegir los instrumentos más apropiados para determinarlas. Por tanto, la elección de la geometría y de la iluminación, ha de hacerse de forma que simulen, en lo posible, la realidad(74).

De día, la luz que incide sobre los materiales retrorreflectantes es una combinación de la luz difusa, que proviene del cielo y de luz directa, procedente del sol. Estas condiciones de iluminación, varían a lo largo del día, e incluso de un día a otro.

Por tanto, la luz procedente de un material retrorreflectante llega al observador como combinación de reflexión difusa y de retrorreflexión de la luz que incide en la superficie, desde la parte posterior del observador. La temperatura de color de la luz del día, varía de 500 K a 15000 K, dependiendo de las condiciones climatológicas. La mayor parte de la luz que proviene del cielo que incide sobre un material retrorreflectante nunca llega al observador, ya que una parte es retrorreflejada, otra reflejada especularmente y el resto, es reflejada difusamente. La luz solar, sin embargo, es reflejada difusa y especularmente por la superficie del material retrorreflectante en la dirección del observador.

Durante la noche, generalmente, la fuente de luz que incide sobre el material retrorreflectante procede de los faros de los vehículos, presentando una distribución espectral semejante a la del iluminante, CIE- A. Los ángulos de iluminación y de observación varían conforme el observador se va aproximando al material retrorreflectante.

Así, para la determinación en la señalización horizontal del color y de la retrorreflexión es imprescindible definir, previamente, los parámetros que condicionan el valor final de la propiedad medida.

5.2.1. PRINCIPIOS DE REFLECTORIZACION ESFERICA. "RETORREFLEXION".

La retrorreflexión, se basa en la reflexión paralela que tiene lugar al incidir un rayo en una esfera de vidrio perfecta que se encuentra parcialmente sumergida en un ligante pigmentado. A diferencia de la reflexión especular que tiene lugar en un cristal (figura-5.7), el rayo de luz incidente es reflejado de vuelta a la fuente, con una trayectoria paralela a la inicial (figura-5.8).

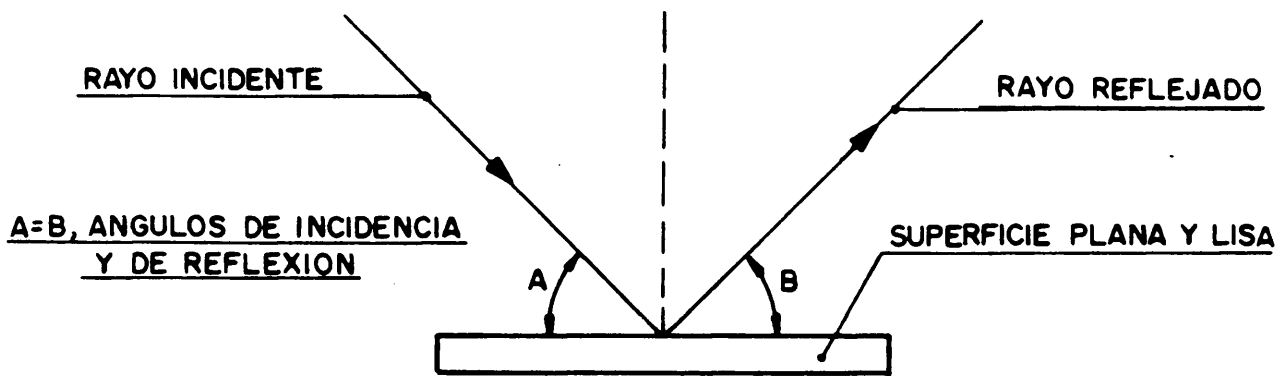


Fig.5.7 Esquema de la retrorreflexión especular.

(A) PUNTO DE RETORREFLEXION.

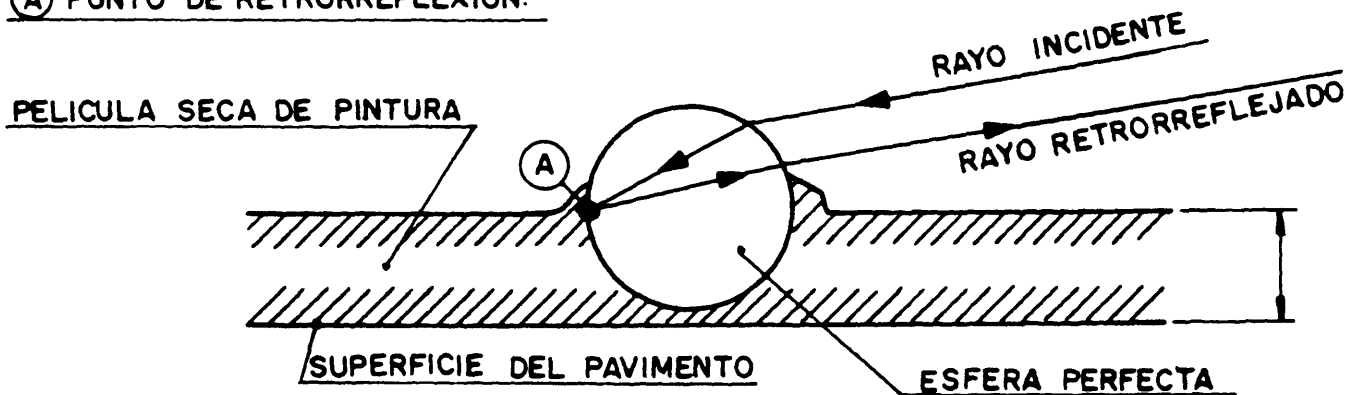


Fig.5.8 Esquema del principio de retrorreflexión.

Como se representa en la figura-5.8, el rayo incidente es refractado en el interior de la microesfera hasta que alcanza el punto de retrorreflexión A, cuya situación dependerá del valor del índice de refracción de la microesfera, para seguidamente ser devuelto, de tal forma que "salga" de ésta, paralelo al incidente. Para un índice de refracción dado, la cantidad de luz retrorreflejada por una microesfera de vidrio depende de su diámetro, del grado de inmersión y de la esfericidad.

Se entiende que la retrorreflexión es función del casquete esférico útil para la misma, por lo que con un mismo grado de inmersión, fijado por el índice de refracción de la esfera, será su diámetro el que fijará la calidad del fenómeno de retrorreflexión.

Para que éste se dé, es necesario una esfericidad perfecta, ya que de lo contrario, cada rayo incidente daría lugar a dos rayos retrorreflejados de trayectoria arbitraria y nunca paralela al incidente (figura-5.9). Uno de los rayos, "S", se debe a la reflexión especular que tiene lugar en la superficie de la partícula no esférica, mientras que el de referencia "R", procede de la reflexión interna.

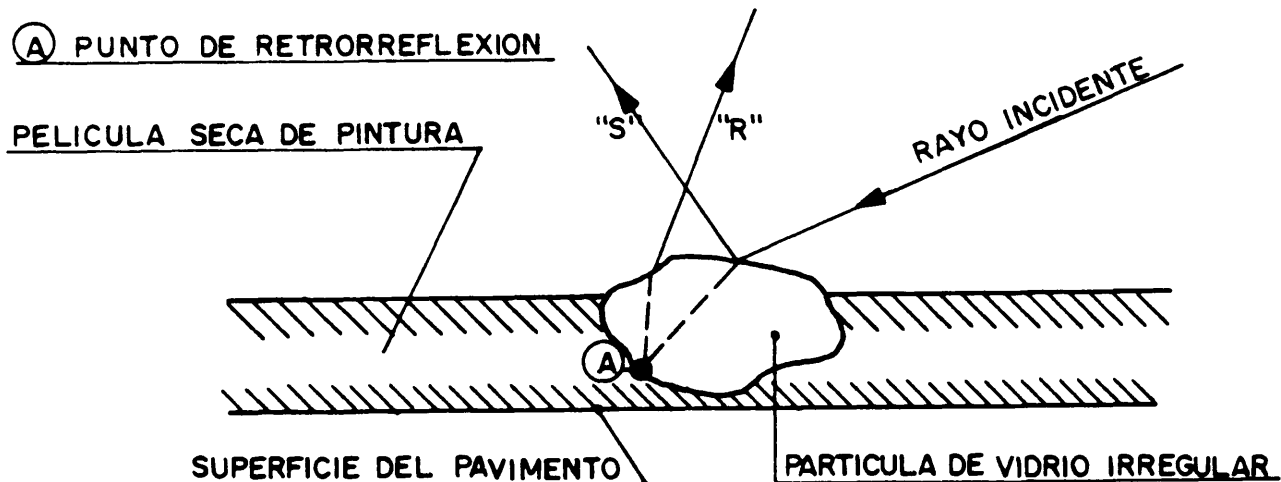


Fig.5.9 Esquema de la reflexión en partículas no esféricas.

Por lo tanto, mientras más se acerque a la esfericidad perfecta el **elemento retrorreflexivo**, mejor será el control de la luz reflejada y por ende, mejor retrorreflexión. Por el contrario, mientras más ovalado e irregular se presente el elemento, se obtendrá una mayor mezcla de rayos reflejados que dan lugar a una reflexión incontrolada y por lo tanto, a una pérdida de retrorreflexión. Así, el grado de esfericidad de los elementos retrorreflexivos es imprescindible para su eficacia(75).

5.2.2. TIPOS DE SUPERFICIES REFLECTORIZADAS.

Como se ha citado anteriormente, el grado de inmersión de una microesfera es fundamental para su eficacia en la retrorreflexión final de la marca vial. Por eso, es imprescindible determinar la relación que existe entre la granulometría de las microesferas a utilizar, siempre con índice de refracción 1.5 y, el espesor de la película endurecida de material base. Desde un punto de vista general, existen dos tipos de superficies reflectorizadas, horizontales y verticales.

La diferencia fundamental entre ambas radica en que las horizontales son aplicadas de forma dinámica sobre superficies rugosas, pavimentos, y las verticales, se aplican de forma estática sobre superficies lisas, generalmente metálicas. Esto, produce variaciones de espesor en las primeras, que conducen, por un lado, a distinta duración y, por otro, a diferente efectividad en la retrorreflexión. No obstante, el fundamento teórico es el mismo en ambos casos.

SUPERFICIES HORIZONTALES RETRORREFLEXIVAS.

La forma más común de señalización horizontal de vías públicas consiste en la adición, por postmezclado, de microesferas de vidrio a un material base que puede contener microesferas de vidrio en su formulación (premezclado). En ambos casos, postmezclado y premezclado, las microesferas deberán escogerse de acuerdo con el espesor de película que vaya a tener el material de señalización una vez endurecido, para así asegurar en todo momento una buena retrorreflexión.

En el momento de la aplicación, solamente las **esferas** con mayor diámetro que la película seca de pintura, serán visibles; por el contrario, las otras más pequeñas, permanecerán sumergidas en el material.

Una vez seca la película de pintura aplicada, solamente las primeras esferas van a dar lugar a la retrorreflexión del material. Al cabo de un cierto tiempo de servicio y, como consecuencia del desgaste producido por el tráfico, las esferas de mayor tamaño han desaparecido, pero a la vez, las más pequeñas aparecerán descubiertas siendo éstas ahora, las responsables de la retrorreflexión.

Teóricamente, la película seca del material base puede desgastarse hasta un espesor de 102 micras, suficiente para retener las esferas de diámetro menor, 220 micras, y ser, todavía, visible durante la noche.

En ensayos de abrasión llevados a cabo sobre materiales convencionales con microesferas de postmezclado(76) se detectó que, a menos que exista un fallo de unión entre las microesferas de vidrio y el ligante del material, la película seca se desgasta antes de que se produzca cualquier pérdida de microesferas; por lo tanto, antes de que desaparezcan totalmente las esferas más grandes, habrán quedado al descubierto, parte de las microesferas más pequeñas.

5.2.3. REFLECTIVIDAD RELATIVA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA SEGURIDAD VIAL.

El valor de la retrorreflexión puede determinarse de forma experimental, en campo o en laboratorio, utilizando el dispositivo adecuado (Figura-5.10). La **reflectividad relativa o retrorreflexión** se expresa, normalmente, mediante la intensidad específica, **i.e.**; ésta, se define como el grado de intensidad de luz reflejada, **I_r**, medida en el punto Y, receptor, situado al lado de la fuente emisora, X, cuando un rayo de luz de intensidad **I_i**, procedente de X, incide sobre un panel de material retrorreflexivo de superficie, **A**, situado a una distancia **L** del foco emisor. Para realizar cada medida de **i.e.**, es necesario definir los ángulos de incidencia y divergencia(77).

$$i.e = \frac{I_r}{I_i} \cdot \frac{L^2}{A} \quad (5.11)$$

Así, las superficies verticales reflectorizadas que se sitúan a los lados de la carretera son visibles desde una distancia tal que, las líneas de visión e iluminación son, prácticamente, perpendiculares a su superficie. La máxima retrorreflexión se conseguirá a la distancia en que todos los rayos incidentes iluminan el área máxima de la señal.

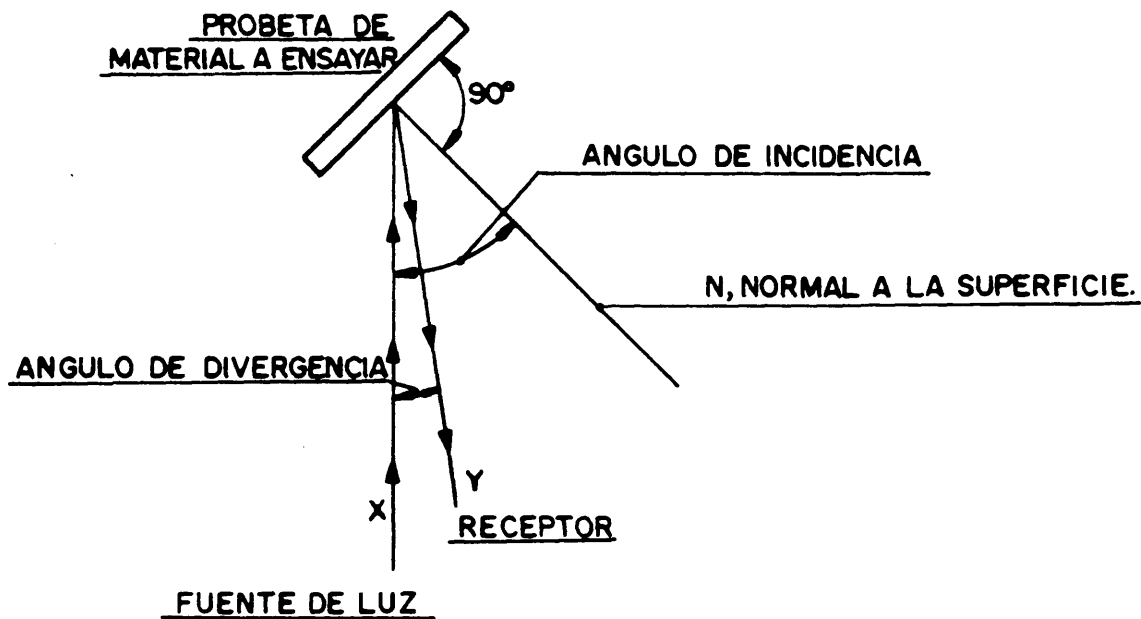


Fig.5.10 Esquema del método de ensayo para la medida de la retrorreflexión.

A medida que el foco emisor se aproxima, el ángulo de incidencia se va haciendo mayor, hasta llegar a ser prácticamente de 90°. Como consecuencia, es fundamental seleccionar el material reflexivo adecuado que permita una buena visibilidad nocturna de los elementos de seguridad vial, desde ángulos de incidencia muy pequeños, hasta el valor máximo de 90° (figura-5.11).

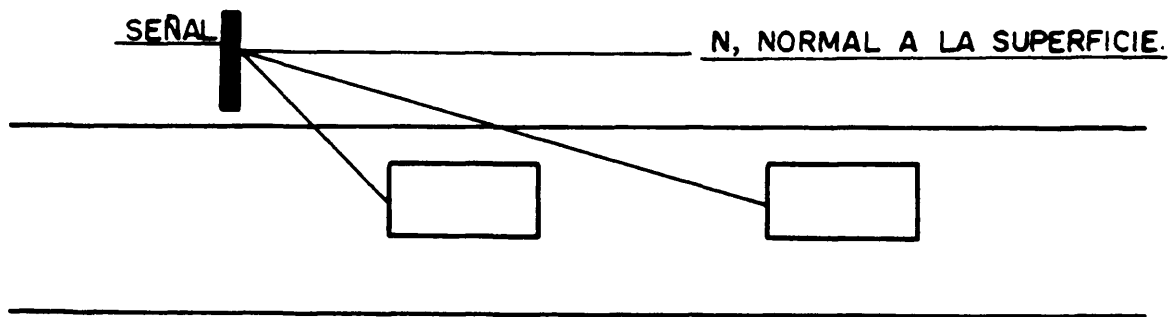


Fig.5.11 Esquema del incremento del ángulo de incidencia al aproximarse el vehículo a la señal.

Por el contrario, las superficies horizontales reflectorizadas se diseñan para ser visibles solamente desde ángulos muy planos y, nunca, con ángulos de incidencia pequeños tal y como ocurre en el caso de la señalización vertical.

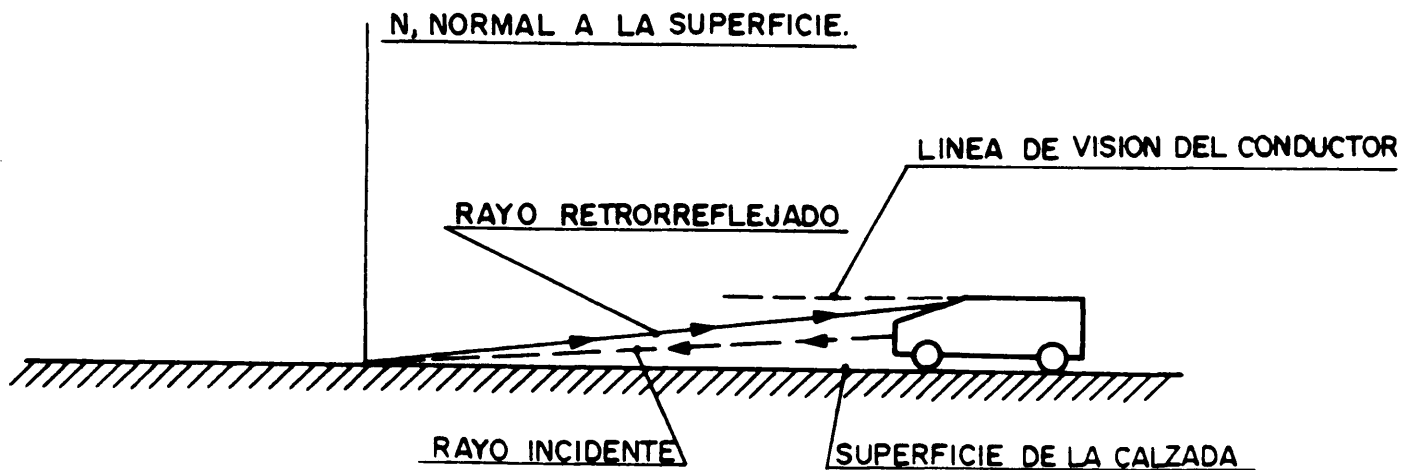


Fig.5.12 Esquema de la visión de una marca vial con ángulos de incidencia grandes.

Tomando una altura estándar para los faros de un coche (60 cm) y una distancia a la marca vial de 150 a 180 m, se obtendría un ángulo aproximado de 0.29 con respecto a la carretera, lo que equivale a un ángulo de incidencia de 89.89 .

Utilizando un espesor de película seca de pintura de 300 micras, a la que se ha añadido, por postmezclado, un 80% en peso, respecto a pintura líquida, de microesferas de vidrio con granulometría comprendida entre 220 y 750 micras, se logra cubrir completamente la superficie de la marca vial, como si de una señal vertical se tratase. Edwin, concluye que se puede llegar a utilizar un 25% en peso de microesferas, con respecto a la dosificación de pintura añadida, cubriendo alrededor del 40% del área total de la raya, ya que, debido al ángulo de incidencia tan elevado, 89.89 , daría la imagen de una perfecta uniformidad y, además, proporcionaría reflexión (Figuras-5.13 a y b).

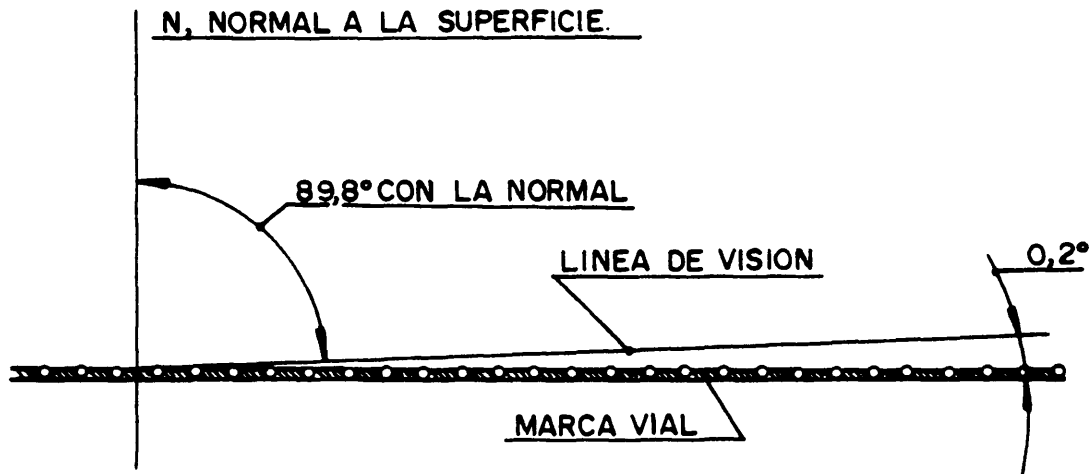


Fig.5.13 a Esquema de la geometría de la visión de una marca vial.

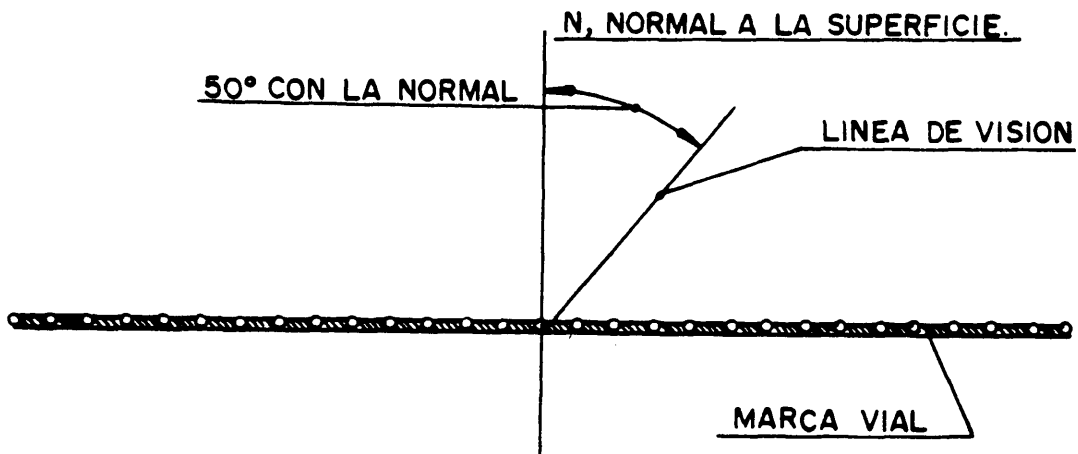


Fig.5.13 b Esquema de la disminución de la retroreflexión con el ángulo de incidencia.

5.2.4. METODOS OPTICOS PARA LA MEDIDA DE RETRORREFLEXION EN SUPERFICIES HORIZONTALES REFLECTORIZADAS.

Las condiciones de retrorreflexión de las marcas viales se corresponden, en general, con grandes distancias. Así, a la hora de efectuar las medidas de retrorreflexión, es necesario reproducir estas distancias. Para ello, se utilizan en la actualidad dos métodos, reducir a escala todas las dimensiones o servirse de lentes, para simular las grandes distancias.

Las características visuales en la conducción nocturna dependen de las reflectancias que posean tanto la superficie de la carretera como la marca vial. Por otra parte, estas reflectancias son consecuencia de las propiedades de iluminación y reflexión de las superficies. Así, ya que las propiedades de reflexión de las marcas viales influyen en sus características visuales, es imprescindible obtener un método para su evaluación(78).

Los convenios establecidos para la medida de la retrorreflexión, considerando una fuente luminosa individual, se han representado en la figura-5.14.

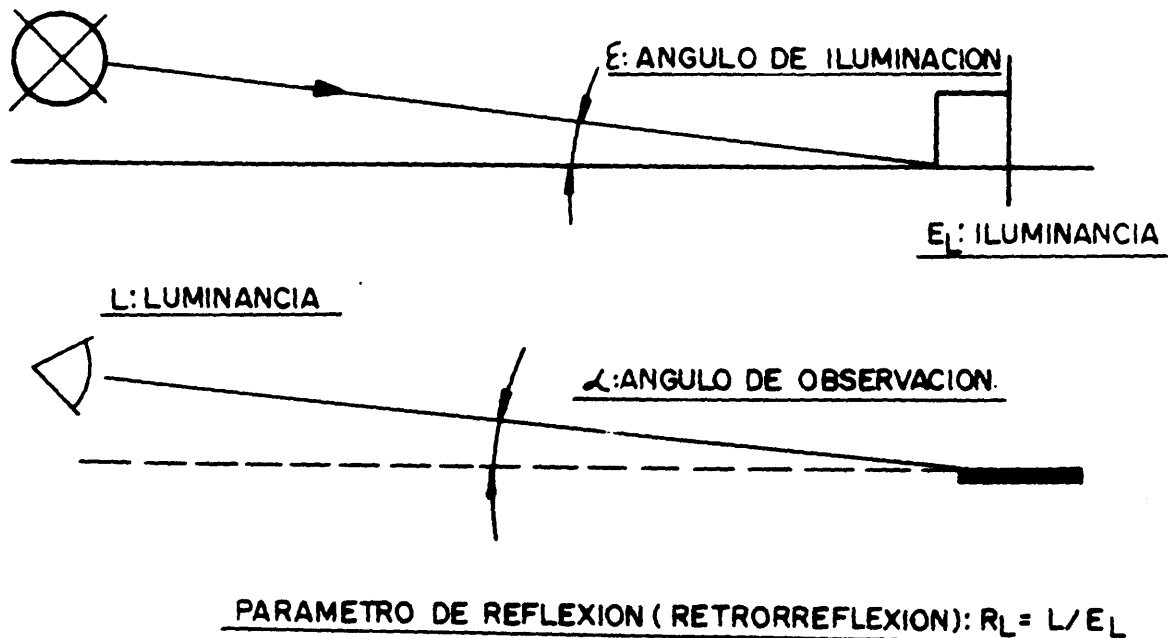


Fig. 5.14 Esquema de los convenios establecidos para la definición del parámetro de reflexión.

equipo de iluminación (lámpara) y un sistema de medida de la luz retrorreflejada (detector).

En términos geométricos, la mayoría de los sistemas de medida se pueden describir tal y como se ha representado en la figura-5.15, mediante dos pausas. La **pausa número uno**, situada en los alrededores de emisor o del receptor, presenta una abertura que da lugar a una superficie sensitiva o luminosa. La **pausa número dos**, que se sitúa en los alrededores de la superficie a medir, delimita mediante su abertura el campo de la superficie que es iluminada en la muestra.

La línea de unión de los centros de ambas aberturas define un **ángulo medio** con el plano de la superficie. Además, entre las pausas, se define una zona alrededor del ángulo medio.

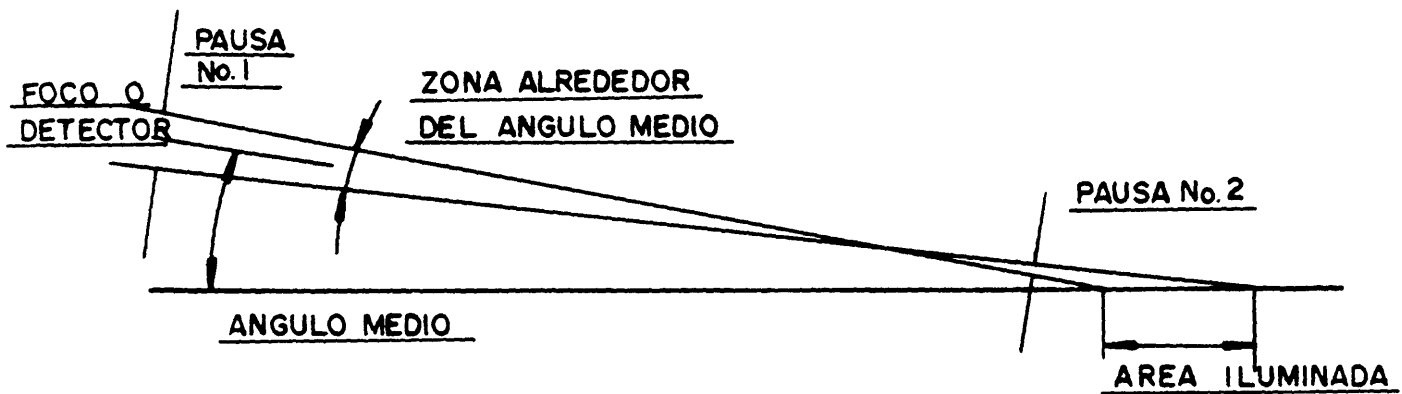


Fig. 5.15 Esquema de la descripción del sistema de medida del parámetro de reflexión mediante dos pausas.

La geometría del sistema se describe mediante dos ángulos medidos desde el plano de la superficie hacia cada dirección; uno, será el de **incidencia**, ξ , siendo el otro, el de **observación**, α . Se supone que ambas direcciones, incidencia y observación, se sitúan en el mismo plano vertical; caso de no ser así, se debe tener en cuenta, además, un tercer ángulo **azimutal**, β .

Se denomina, **parámetro de reflexión o coeficiente de la luminancia retrorreflejada**, R_L , a la relación entre la luminancia correspondiente a una pequeña sección de superficie y la iluminancia del campo. La iluminancia, se medirá en un plano perpendicular a la dirección de iluminación(79).

$$\text{Así, } R_L = \frac{L}{E_L} \quad (5.12)$$

La unidad de medida para expresar el parámetro de reflexión es la **cd/lux.m²**, aunque generalmente, se prefiere un submúltiplo, **mcd/lux.m²**.

El problema fundamental, a la hora de evaluar el parámetro de reflexión, es la geometría de medida, ya que su valor dependerá de la geometría escogida. Para ángulos pequeños, el valor de R_L cambia de acuerdo con la relación $\frac{\xi}{\alpha}$, mientras que en distancias cortas (ángulos grandes) además de la relación anterior, influyen otros parámetros. Bajo este punto de vista, en la actualidad, coexisten dos tendencias para la medida del parámetro de reflexión; una, por razones prácticas, defiende la adopción de distancias de visión cortas, 10 a 15 m, por lo menos en lo que a equipos de medida portátiles se refiere; la otra, defiende la adopción de distancias más largas, 50 m, en un intento de aproximarse más a la realidad.

El primer punto de vista defiende la base de construcción de los sistemas **enfocados**, mientras que el segundo, constituiría la base de los sistemas **desenfocados**.

SISTEMAS ENFOCADOS Y DESENFOCADOS.

DESCRIPCION GEOMETRICA GENERAL.

Independientemente del sistema elegido para la medida del **factor de reflexión**, el equipo diseñado constará de un

Esta descripción es perfectamente admisible cuando se pretenden tener en cuenta, en el sistema de medida, los focos luminosos, los detectores, etc. Como se puede observar en la figura-5.16, todas las pausas cuyas aberturas se ajusten, exactamente, a las distintas superficies luminosas, sensitivas o reflexivas, son perfectamente admisibles.

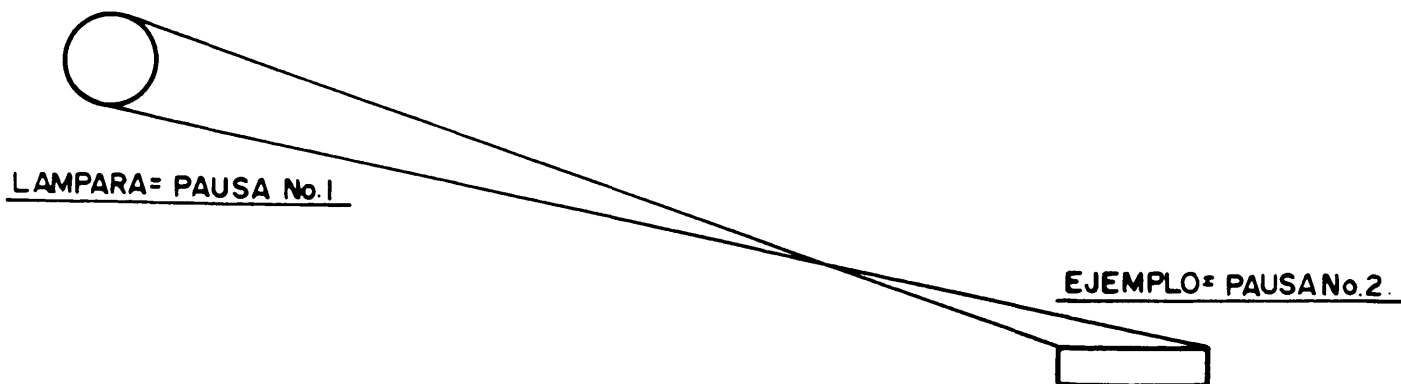
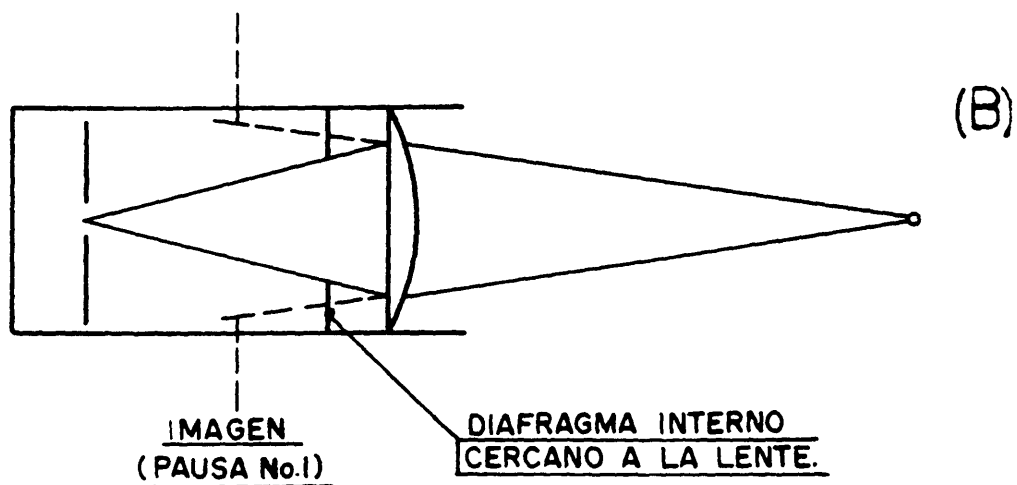
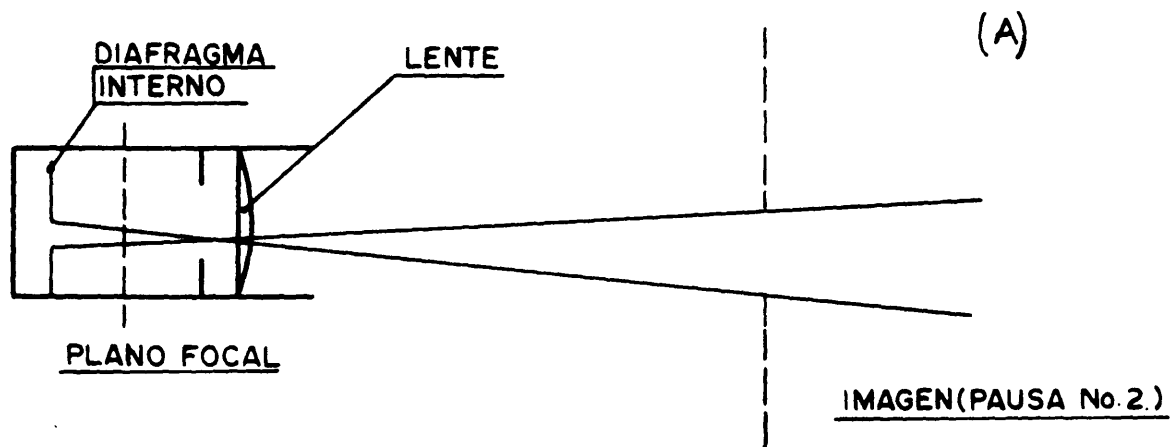


Fig.5.16 Esquema de la descripción del sistema de medida del parámetro de reflexión que incluye faros y detectores.

Por otro lado, aunque no es fácil aceptar pausas que correspondan a imágenes ópticas de diagramas, ésta es la forma correcta de visualizar la configuración geométrica de un sistema óptico(80).

SISTEMA ENFOCADO.

Este tipo de sistema se ha representado en la **figuras-5.17 a y b**. Consta de una lente y dos diafragmas internos.



Figs.5.17 a y b Esquema de un sistema enfocado.

En éstos sistemas, una imagen puede servir de pausa, ya que todo rayo que atraviese uno de los diafragmas y la lente, pasará por la abertura, en la imagen, o presentará la misma dirección que tendría si procediese de esa abertura. Así, un diafragma se situará en los alrededores del plano focal de la lente mientras que el otro lo hace justo detrás de ésta.

El diafragma mencionado en primer lugar se sitúa justo detrás del plano focal de la lente, por lo que su imagen será **real**, situándose en frente de ésta. Esta imagen puede servir de pausa número dos. La imagen del otro diafragma, se encuentra justo detrás del mismo, lo que la convierte en apta para servir de pausa número uno. Esta imagen se denomina, comúnmente, **abertura de entrada**.

SISTEMA DESENFOCADO.

La diferencia fundamental entre éste sistema y el enfocado radica en que el primer diafragma se sitúa en el plano focal de la lente, en lugar de hacerlo en frente de ella o detrás.

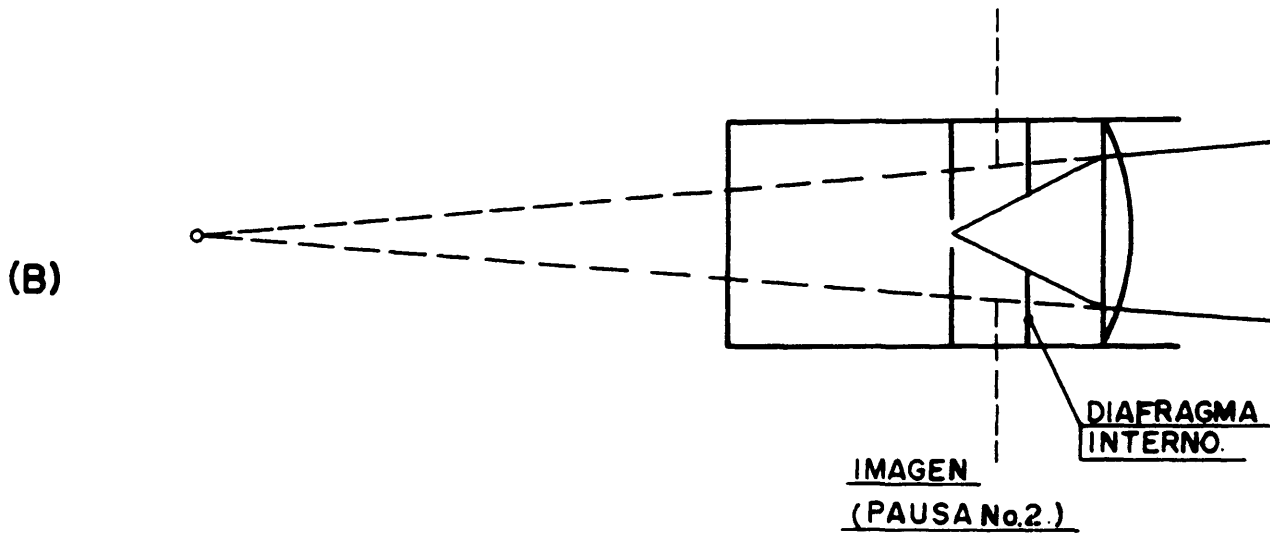
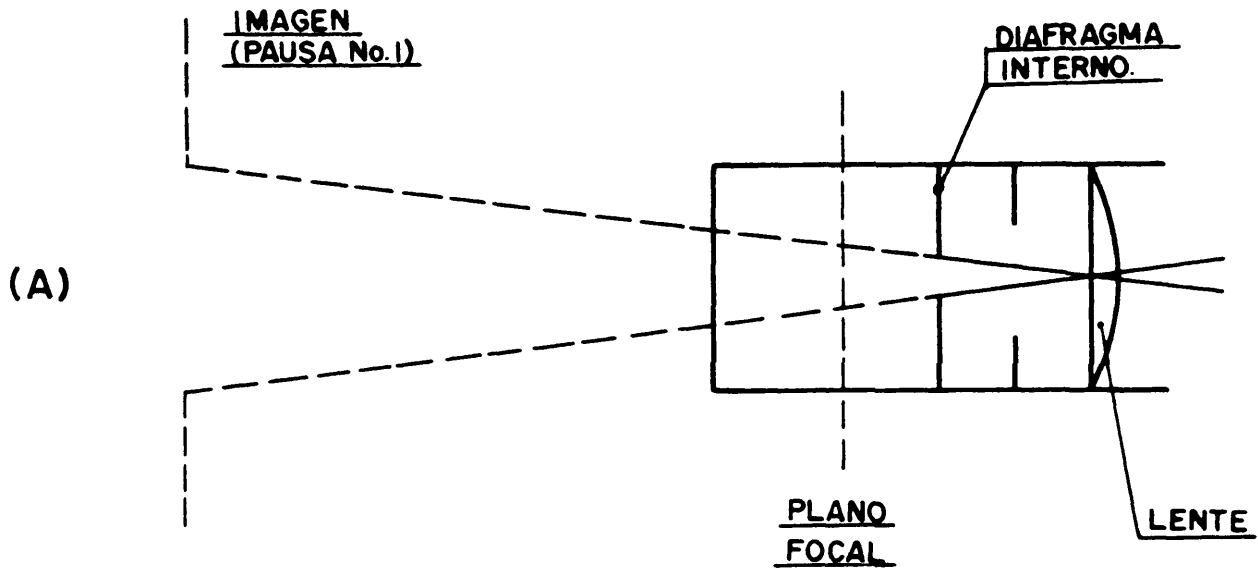
Ya que la imagen obtenida es **virtual** y se sitúa detrás del sistema, se puede utilizar ésta como pausa número uno. De ésta manera, para convertir un sistema de medida del factor de luminancia en desenfocado, bastará con enfocar las lentes al infinito. Si en este equipo la abertura de entrada no puede ser utilizada como pausa número dos, se deberá instalar un nuevo diafragma, más pequeño, en frente de la lente.

REQUISITOS GEOMETRICOS GENERALES DE UN SISTEMA DE MEDIDA.

En la elaboración de un sistema de medida es necesario tener en cuenta(81):

- 1.- La **difusión angular**, que debe mantenerse dentro de ciertos límites.
- 2.- El **campo medido**, que deberá poseer un valor mínimo determinado.

3.- La **señal**, que deberá ser tan amplia como sea posible.



Figs.5.18 a y b Esquema de un sistema desenfocado.

El objetivo del primer requisito es conseguir ángulos bien definidos. Desde un punto de vista práctico es necesario que las difusiones angulares sean tan pequeñas que cualquier variación que se produzca no altere el valor medio. Así, estas difusiones angulares son del orden de minutos de arco de circunferencia.

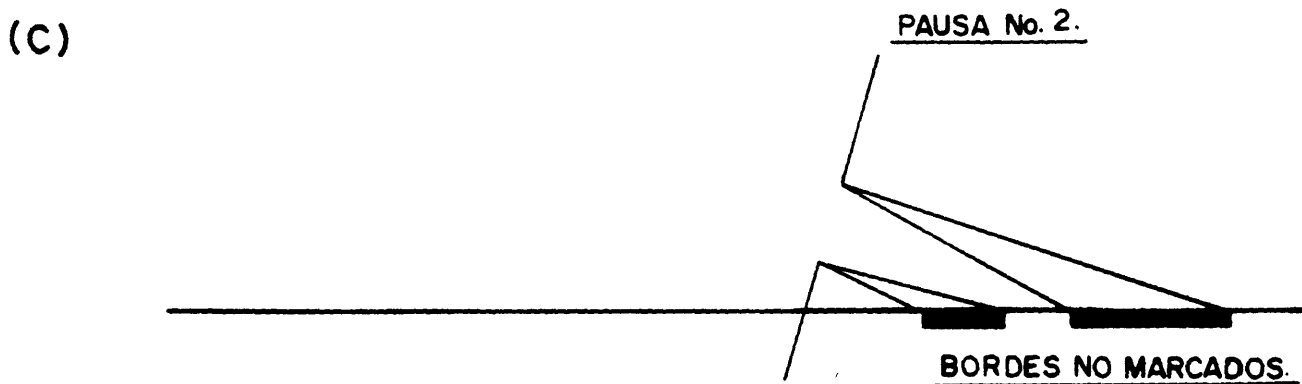
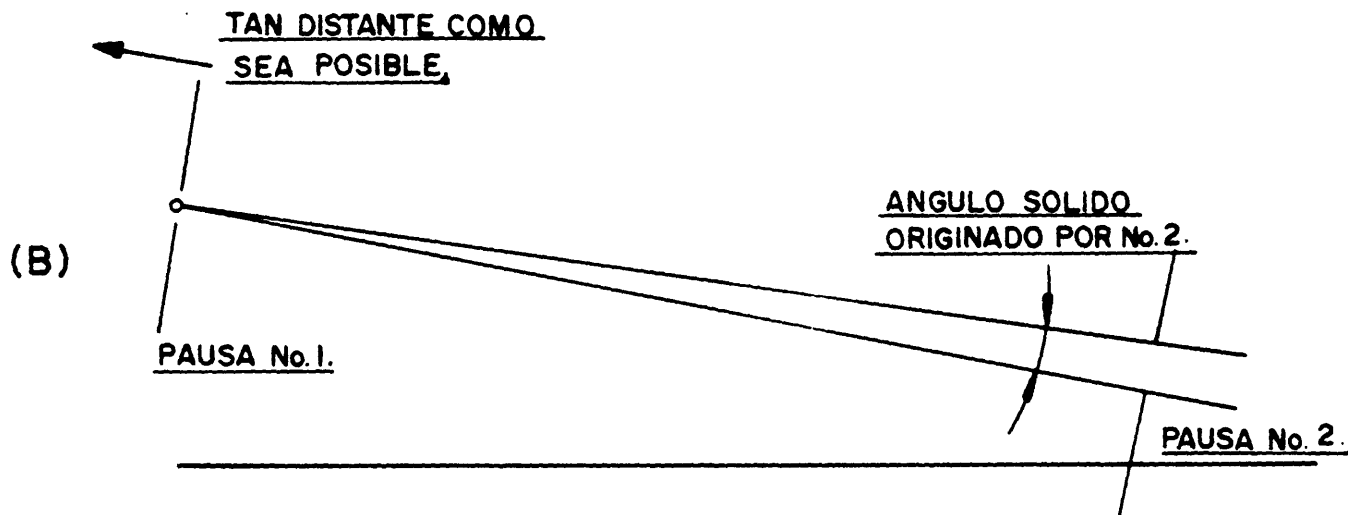
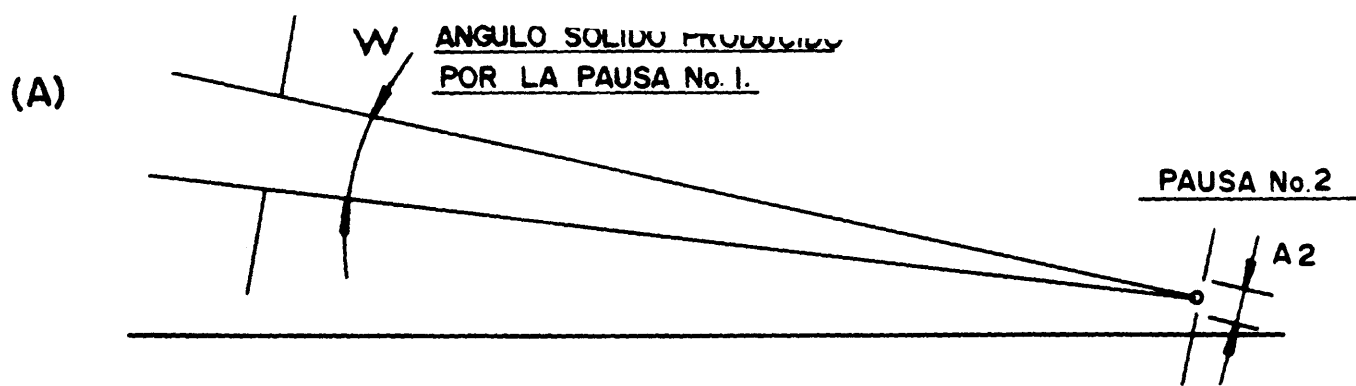
El segundo parámetro se centra en la necesidad de obtener el valor medio del mayor número posible de cambios ocurridos en las propiedades ópticas de la superficie a medir. Tradicionalmente, en el caso de marcas viales, se considera una superficie de 100 cm².

El último parámetro, por su parte, implica una incompatibilidad con los otros dos (figura-5.19a), como consecuencia de la aparición de dos factores, inevitables, en la señal de medida. Un factor es el **ángulo sólido de la difusión, W** , que se origina alrededor del ángulo creado por la pausa número uno. El otro factor es el **área aparente** de la abertura en la pausa número dos, A_2 .

En un estudio realizado al respecto, Obro.P(82) sugiere que lo mejor es colocar la pausa número uno a una distancia lo más elevada posible (figura-5.19b), con lo que se minimiza el valor del ángulo originado por la pausa número dos. De ésta manera, la pausa número uno puede poseer la mayor parte de la difusión angular permisible dando lugar a la señal posible.

Por otro lado, se ha comprobado que la abertura en la pausa número uno aumenta cuando la distancia es considerable, por lo que se tiende a utilizar emisores y detectores de gran tamaño, o bien, grandes imágenes obtenidas a partir de focos y detectores pequeños.

Otro aspecto a tener en cuenta en la disposición geométrica de un sistema de medida del **factor de retroreflexión** es la situación de la pausa número dos. Esta, deberá colocarse lo más cercanamente posible a la superficie a medir, de tal manera, que la difusión angular provocada no difumine los bordes del área de medida (figura-5.19c).



Figs. 5.19 a, b, c Esquema de los requisitos generales de un sistema de medida.

INSTRUCCIONES PARA EL USO CORRECTO DE UN SISTEMA DE MEDIDA.

De acuerdo con la figura-5.20 a, el sistema enfocado debe colocarse en distancias de medida grandes, enfocando su lente al campo. La distancia real debe ser, por lo menos, tal que la difusión angular no exceda los valores máximos tolerados. No obstante, con frecuencia, se seleccionan distancias aún mayores, por motivos prácticos.

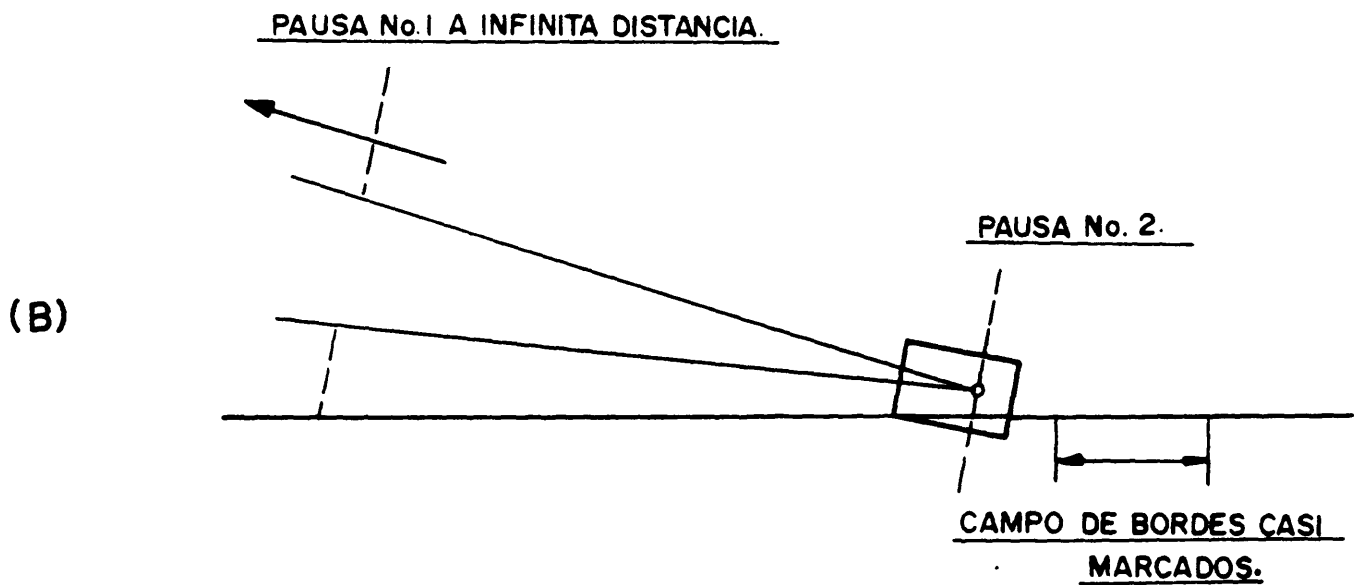
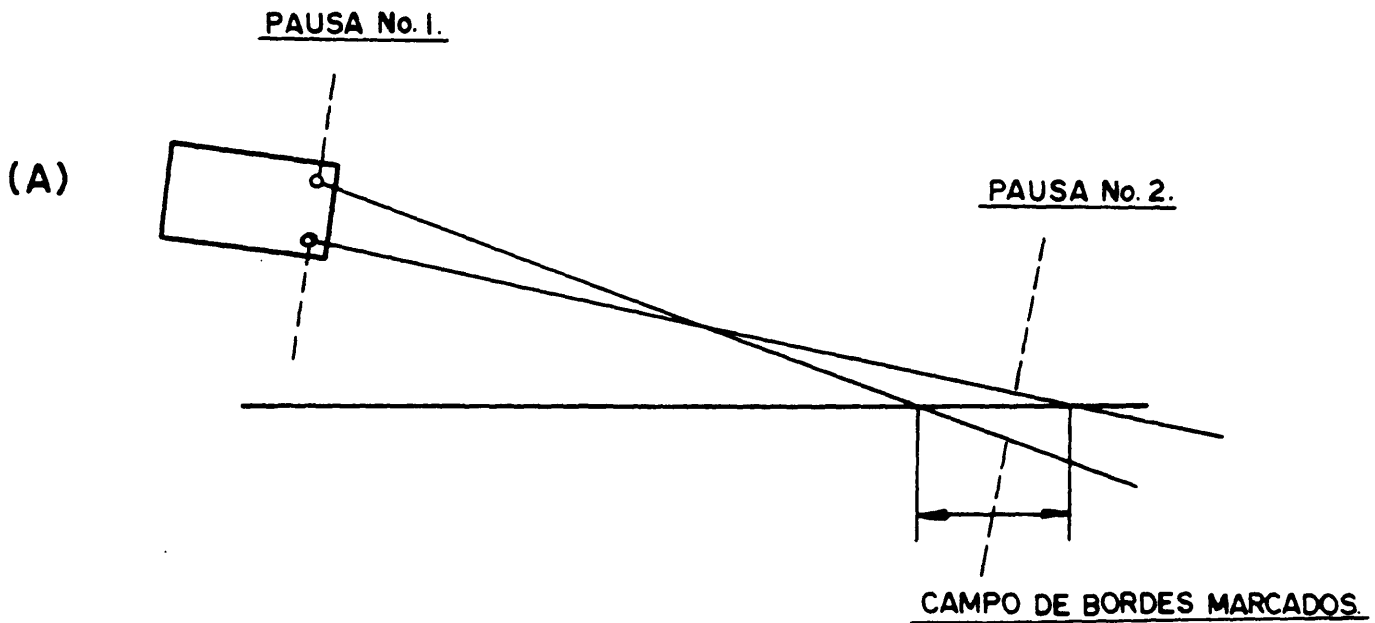
La pausa número dos puede situarse como una imagen en medio de una superficie. Así, con un sistema enfocado, se puede definir el campo sin difuminarlo.

Otra característica del sistema enfocado, aparte de la separación física de la superficie, es la posibilidad de **fijar y verificar su geometría** por métodos ópticos sencillos.

En cuanto al sistema desenfocado (figura-5.20 b), con el fin de acercarse al máximo la pausa número dos ésta debe situarse lo más cerca posible de la superficie de medida, ajustándose las lentes de tal forma que la pausa número uno se encuentre infinitamente distante.

Con éste sistema, el campo no aparece tan definido como en el caso anterior, aunque sin embargo, presenta una geometría más compacta con una difusión angular mínima.

Ambos sistemas son complementarios en sus aplicaciones. Por ejemplo, con el sistema enfocado se requiere mucho espacio, pero se evita el conflicto físico, mientras que en el desenfocado, ocurre lo contrario(83).



Figs.5.20 a y b Esquema de las ventajas de los sistemas enfocado y desenfocado.

6. PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO.

En ocasiones, una simple observación basta para detectar el proceso de degradación natural que sufren los materiales. Es conocido que un material va perdiendo color con el tiempo(84). Sin embargo, en determinadas situaciones, para comprobar ese deterioro es necesario medir las propiedades físico-químicas del material, observándose, entonces, una pérdida de resistencia a la tracción, un cambio dimensional, etc. El conjunto de este fenómeno, recibe el nombre de "envejecimiento".

En términos generales, puede decirse que éste fenómeno está relacionado con diversos agentes, como la luz solar, la lluvia, la humedad, la contaminación atmosférica, el ozono, el calor y la temperatura, etc.

En una primera aproximación, el envejecimiento puede deberse a dos tipos de causas: **naturales o artificiales.**

6.1. ENVEJECIMIENTO NATURAL.

Este tipo de envejecimiento, también denominado "envejecimiento a la intemperie", es provocado por numerosos agentes, entre los que cabe destacar el efecto de las **radiaciones solares.**

Estas radiaciones, junto con los cambios de temperatura, y la acción del oxígeno y del agua, son las responsables de la degradación de los polímeros, no sólo en lo que a la pérdida de brillo superficial o al cambio de color, sino a una grave pérdida de propiedades físicas.

El espectro solar comprende radiaciones de longitudes a partir de los 2000 Å. Sin embargo, las longitudes de onda inferiores a 3000 Å son absorbidas por la atmósfera terrestre casi en su totalidad, quedando solo, a efectos de envejecimiento, las radiaciones comprendidas entre los 3000 y 4000 Å; de ahí, que la radiación más perjudicial sea la **radiación UV(85).**

Además de este tipo de radiación, como agentes del envejecimiento cabe destacar a la **temperatura;** cuanto mayor sea ésta, mayor será la degradación del material. Lo mismo ocurre con los cambios bruscos de temperatura o **choque térmico,** con la **lluvia** y con la **humedad relativa** excesiva.

El choque térmico provoca fisuras de carácter superficial, mientras que la humedad provoca una lixiviación en los plásticos, acelerando su proceso de degradación.

Ya que la degradación es, afortunadamente, un proceso lento, el tiempo necesario que debe transcurrir para obtener unas conclusiones representativas, sería largo.

Con el fin de estudiar los efectos de la intemperie sobre un material, se han desarrollado numerosos métodos de ensayo; así, Ogorkiewicz(86), sugiere colocar las probetas de materiales en diferentes puntos para comparar el efecto de los distintos elementos causantes del deterioro, ciudades de ambiente marino o industrial, climas extremados, etc.

6.2. ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO.

Resulta obvio que la industria no pueda esperar 10 ó 20 años para saber si un material es resistente o no al exterior. Por ello, se recurre a métodos de laboratorio que, de una forma acelerada, permitan en un intervalo de tiempo corto predecir cual va a ser el comportamiento del material. Es decir, se intentan reproducir las condiciones reales que provocan el deterioro de los materiales, endureciéndolas con el fin de obtener resultados representativos lo antes posible.

6.2.1. ENVEJECIMIENTO CON ARCO DE CARBÓN.

Durante muchos años se ha venido utilizando la luz procedente de un arco de carbón para, de una manera acelerada, conseguir el envejecimiento de los materiales. El sistema correspondiente se programa para que actúe de acuerdo con unas condiciones similares a las de la luz del sol, a la lluvia, etc. Como ejemplo clásico de éstos ciclos pueden citarse la siguientes condiciones(87):

- Enfriamiento a -210C.....1.75 h.
- Lluvia.....1 h.
- Luz de arco.....1.5 h.
- Lluvia.....2 h.
- Luz de arco.....16.5 h.

Con el tiempo, se ha pretendido simular lo más realmente posible las condiciones reales que producen el envejecimiento. Así, se desarrolla el envejecimiento artificial acelerado, con **arco de "xenon" o "xenotest"**. Con este nuevo sistema se produce un acercamiento mayor a las condiciones reales, ya que la distribución espectral de esta luz es muy semejante a la solar.

Recientemente se ha desarrollado un método, más crítico, basado en la utilización de **lámparas de luz UV(88)**.

6.2.2. ENVEJECIMIENTO POR CALOR.

Algunos materiales, sobre todo los de tipo elastomérico, suelen envejecer por efecto, únicamente, del calor. Para reproducir esta degradación en laboratorio se utiliza una estufa y temperaturas comprendidas entre 80 y 1250C, estando la duración del ensayo comprendida entre 7 y 14 días.

6.2.3. OTROS TIPOS DE ENVEJECIMIENTO.

Existen situaciones en las que interesa conocer la acción que sobre un material ejercen, la humedad, el frío, etc. Para ello, se definen unas condiciones experimentales adecuadas, comprobándose, al final del ensayo, las variaciones sufridas por las propiedades básicas del material. Así, hoy en día, es posible simular a nivel de laboratorio, condiciones ambientales adversas, tales como las denominadas "atmósferas industriales", creadas a partir de vapores nitrosos y sulfurosos.

Dentro de éste tipo de sistemas, se ha extendido el denominado "envejecimiento por ozono", sobre todo para materiales elastoméricos. El fundamento de este método hay que buscarlo en el hecho de que cuando un caucho está sometido a tensión, una pequeña cantidad de ozono procedente de la atmósfera puede llegar a agrietarlo e incluso a romperlo.

Tal y como se ha expuesto, en la actualidad, existen numerosos métodos de laboratorio para poder predecir el comportamiento de un material ante uno o varios agentes de degradación. Quizás, el problema que se plantea es escoger el método de ensayo más apropiado para cada tipo de material (89).

7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Debido a que una buena "seguridad vial" pasa, necesariamente, por una excelente señalización horizontal, es imprescindible en las marcas viales la utilización de materiales base de elevada calidad, el control de sus propiedades, el estudio de la influencia que sobre los mismos ejercen los agentes externos, el estudio de su comportamiento sobre diferentes substratos y la determinación de sus propiedades ópticas. En este sentido, y con el fin de poder cumplir los objetivos fundamentales anteriormente expuestos, se aplicaron los materiales seleccionados sobre distintos tipos de superficies.

Con el fin de poder llevar a cabo el estudio de la variación de las propiedades ópticas de las marcas viales basadas en los materiales seleccionados, se realizó su aplicación tanto en campo como en laboratorio, sobre dos tipos de substrato (hormigón y bituminoso). Las probetas aplicadas en el laboratorio se sometieron a un envejecimiento artificial acelerado en máquina "Atlas" y "UV". En ambos casos, campo y laboratorio, se realizaron medidas de color (factor de luminancia y coordenadas cromáticas) así como de retrorreflexión.

Sobre firme bituminoso se procedió a la aplicación del material base sobre el eje de una calzada cubriendo con cada uno de los materiales ensayados un tramo de 200 m. Durante la aplicación se controlaron las siguientes características:

- Dosificación del material base y microesferas de vidrio.
- Humedad relativa del aire y temperatura ambiente; y,
- Tiempo de secado.

La toma de datos correspondientes al valor de las propiedades ópticas se realizó trimestralmente, efectuándose una inicial al día siguiente de la aplicación. El período de tiempo cubierto, fue de dieciocho meses.

En cada tramo, se escogieron previamente una cantidad de puntos, 50, con el fin de realizar la toma de datos siempre en la misma zona de la marca vial. Como valor para cada propiedad óptica medida, en cada material, se tomó la media aritmética ponderada de los obtenidos en cada tramo.

Sobre firme rígido se aplicaron los materiales, perpendicularmente a la dirección del tráfico, ocupando toda la calzada (fotografías-7.1 y 7.2).

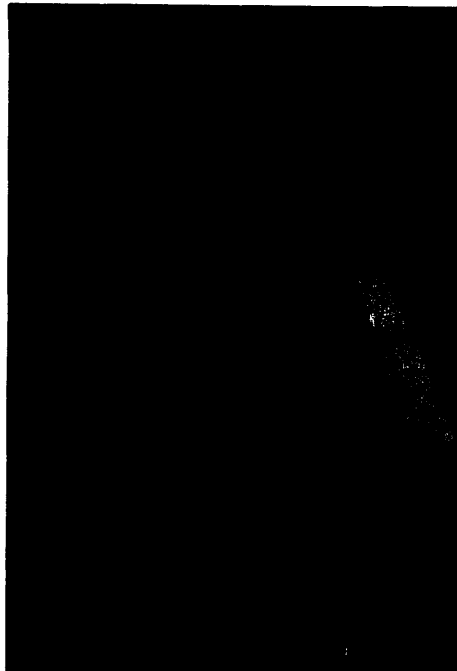


Foto.7.1 Ejemplo de material aplicado sobre firme rígido.



Foto.7.2 Sistema de aplicación sobre firme rígido y bituminoso.

De cada material, se pintaron cuatro líneas de 15 cm de anchura, controlándose durante la aplicación los mismos parámetros que se tuvieron en cuenta en el caso de aplicación sobre bituminoso.

La toma de datos se realizó con la misma frecuencia que el caso anterior; aquí, el número de puntos seleccionados en cada línea fue 10; el valor final se obtuvo a partir de la media aritmética ponderada de 40 valores, por material y propiedad.

7.2. PRUEBAS EN LABORATORIO.

En este caso, se procedió a la aplicación de los materiales sobre probetas estándar de hormigón y firme bituminoso (MELC-12.84), controlándose la dosificación tanto de material base como de microesferas de vidrio.

horas el valor del factor de luminancia, las Coordenadas cromáticas y la retrorreflexión.

7.3. EQUIPOS.

7.3.1. APARATOS PARA LA DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES OPTICAS.

Las medidas de retrorreflexión se realizaron, tanto en campo como en laboratorio, mediante un retrorreflectómetro portátil que poseía las siguientes características fundamentales:

- Tipo de sistema.....Enfocado.
- Tipo de iluminante.....A.
- Angulo de incidencia...86.5º.
- Angulo de divergencia..1.5º.

En la fotografía-7.3 se presenta el aparato utilizado.

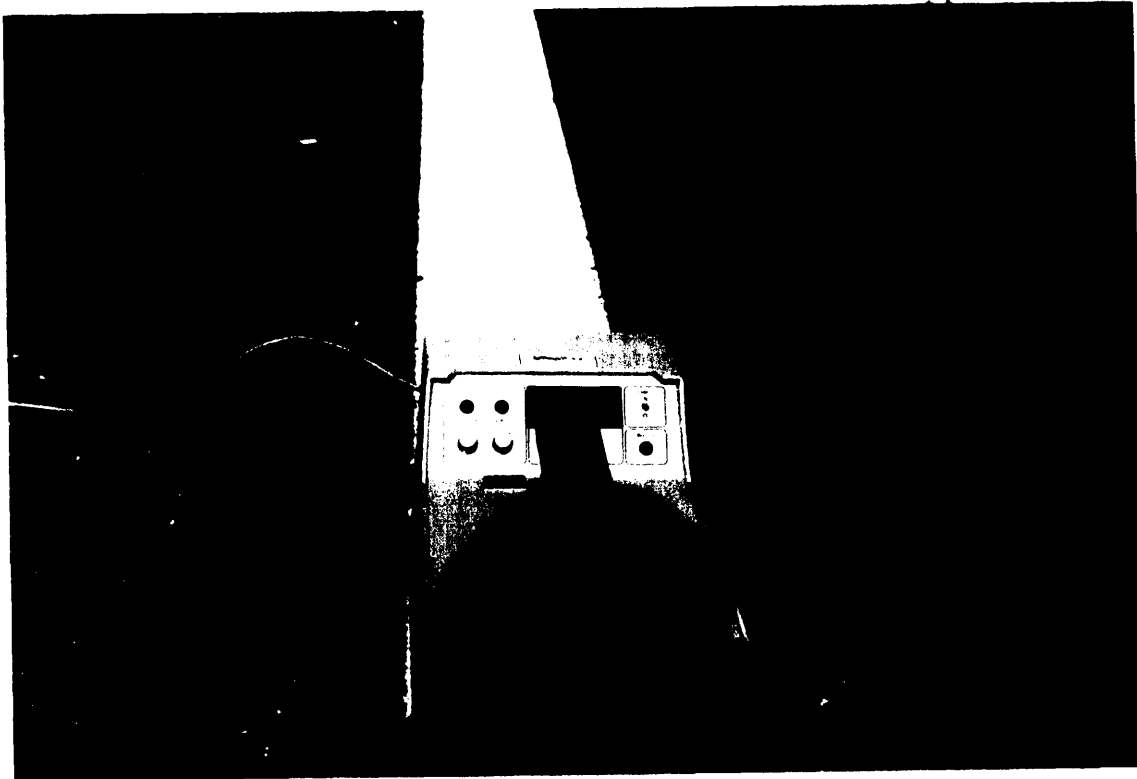


Foto.7.3 Aparato de medida de retrorreflexión.

Por su parte, la determinación de la visibilidad diurna se realizó a través de la medida del factor de luminancia y de las coordenadas cromáticas en los ensayos en laboratorio, y sólo a través del factor de luminancia en el caso de los ensayos en campo.

En las fotografías-7.4 y 7.5 se presentan los grupos utilizados para la determinación del color.

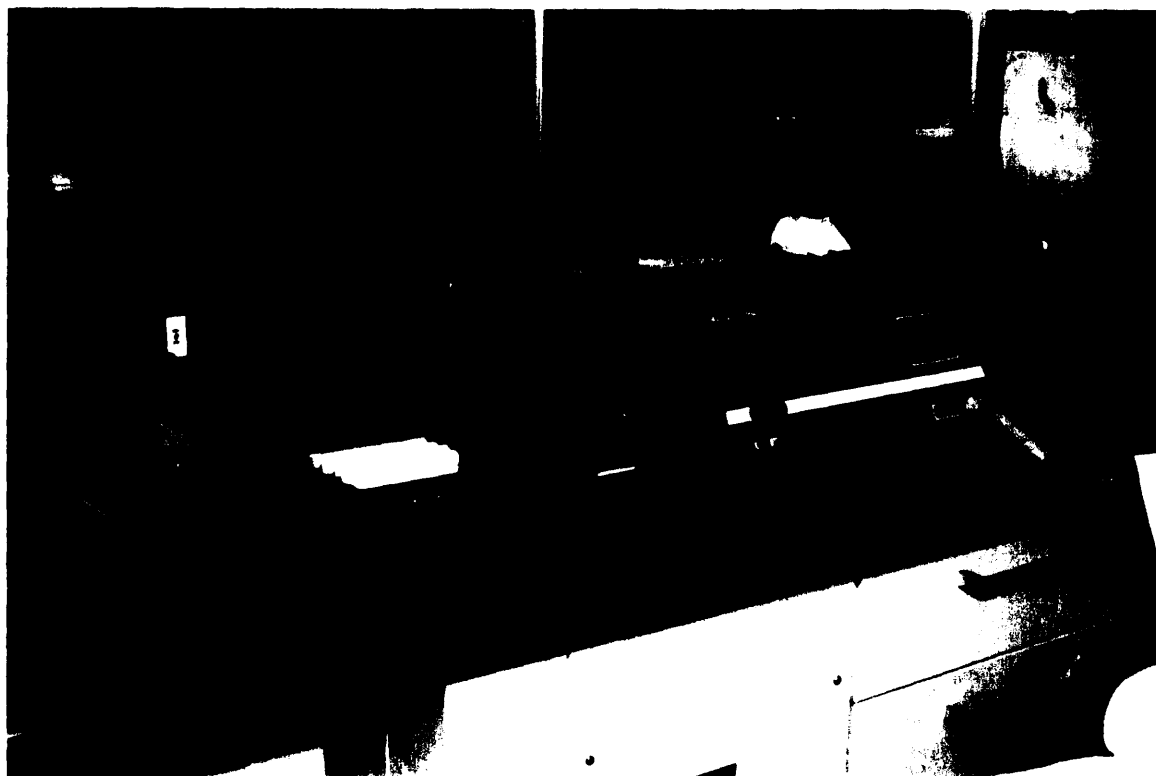


Foto.7.4 Colorímetro de laboratorio.



Foto 7.5 Colorímetro de campo.

Las características técnicas de cada uno de estos equipos, son las siguientes:

- **Para medidas en campo**, iluminante D-65 y geometría d/8.
- **Para medidas en laboratorio**, iluminante D-65 y geometría 45/0.

7.3.2. APARATOS DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO.

Equipo de envejecimiento artificial acelerado y a la acción de la luz (MELC-12.94).

El equipo utilizado para este tipo de envejecimiento fue un "Atlas Weather-Ometer", modelo 65/DMC-WR-123.

Las parámetros de ensayo fueron los siguientes:

- Tipo de ciclo.....9 min de pulverización con agua y 51 sin ella; luz cte.
- Temperatura en el interior del tambor giratorio..... $63 \pm 50C$.
- Velocidad del tambor.....1 r.p.m.
- Posición de las probetas.....Horizontal.
- Duración del ensayo.....600 h.

Equipo de envejecimiento artificial acelerado por la acción de rayos UV (MELC-13.14).

En este caso se utilizó una "Cámara CCI".

Las características fundamentales del ensayo de envejecimiento fueron las siguientes:

- Método utilizado.....Dinámico.

- Situación de las probetas.....Vertical.
- Temperatura del panel negro..... $70 \pm 12^{\circ}\text{C}$.
- Duración del ensayo.....600 h.
- Tipo de luz.....A1, con
(Fig.5.22) lámparas fluorescentes
de 40 watos.

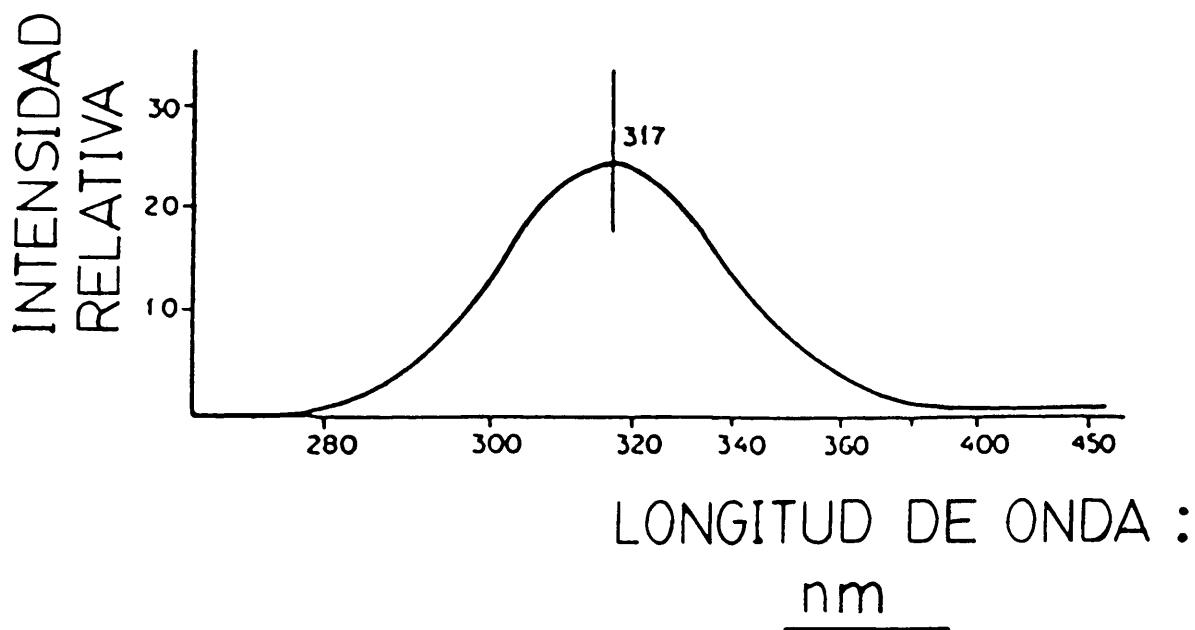


Fig.7.1 Distribución espectral de luz de lámpara tipo A1.

8. RESULTADOS EXPERIMENTALES. INTERPRETACION Y DISCUSION.

8.1. SELECCION DEL MATERIAL BASE.

La calidad de las marcas viales está en relación directa con la de los materiales base y con la de las microesferas de vidrio que se utilizan en ellas.

Dado que las microesferas de vidrio presentan una calidad uniforme en toda Europa, encontrándose además sujetas a patentes, son las pinturas convencionales y los materiales de larga duración los responsables últimos del avance tecnológico relativo a la calidad de las marcas viales.

Con el fin de poder realizar el estudio de la evolución de las propiedades ópticas de las marcas viales se hace necesario la elaboración, para cada tipo de material, de las mejores formulaciones posibles.

En este sentido, los materiales escogidos para los ensayos de campo fueron formulados previamente en laboratorio y corregidas sus composiciones hasta obtener, de acuerdo con la normativa actual española, las mejores propiedades de la película seca en cada caso(90).

8.1.1. PINTURAS CONVENCIONALES.

Para este tipo de pinturas la elección del material se realizó en base a conseguir los mejores resultados en las propiedades más importantes. Dichas propiedades pueden clasificarse en dos grupos, atendiendo a los factores de los que dependen; así, se tienen:

I. Propiedades que dependen del "vehículo fijo" y naturaleza del paquete "pigmento más cargas":

- Poder cubriente (MELC-12.96)
- Factor de luminancia (MELC-12.97)

II. Propiedades que dependen del "vehículo volátil":

- **Tiempo de secado** (MELC-12.71)
- **Resistencia al Sangrado** (MELC-12.84)

Al objeto de obtener los resultados óptimos en los ensayos "tipo I", se investigaron para una misma concentración de pigmento (CPV) del 55% (v/v), diferentes paquetes de cargas, así como distintos contenidos en resina y pigmento (dióxido de titanio).

De esta forma, pudo obtenerse, independientemente del tipo de disolvente utilizado, el paquete de cargas que daba lugar a la película seca con mejores propiedades en cuanto a opacidad, poder cubriente y color.

En relación a los ensayos "tipo II", y con el objeto de conseguir elevados tiempos de película abierta y sangrado nulo, se ensayaron diferentes mezclas de disolventes con diferentes puntos de ebullición, obteniéndose para cada caso el valor de la resistencia al sangrado y el tiempo de secado a la rodadura (no pick-up).

De esta manera, pudo conseguirse la mezcla óptima de disolventes que, para cada tipo de pintura convencional, cumpliera con los objetivos programados.

Todos los ensayos se realizaron de acuerdo con el artículo 278 del PG-3 del Ministerio de Obras Públicas, tomando como criterio de calidad máxima la calificación más elevada en cada uno de ellos.

De acuerdo con lo expuesto, la elección de las pinturas convencionales más adecuadas se realizó en etapas selectivas, tal y como se expone a continuación:

1ª etapa. Manteniendo en cada tipo de pintura convencional la misma CPV, se procedió a modificar los porcentajes de resina y dióxido de titanio, así como el valor de la pigmentación.

2ª etapa. Obtenido el paquete de cargas, la pigmentación y los contenidos en resina y dióxido de titanio más adecuados, se realizó el estudio del mejor sistema de disolventes, de acuerdo con los ensayos del grupo II.

3ª etapa. A partir de los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores se definió el material a utilizar en las aplicaciones de campo y laboratorio.

8.1.1.1. DEFINICION DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS.

La resina se seleccionó de acuerdo con la experiencia obtenida a través de las aplicaciones en campo, que, durante años, se han venido realizando con los diferentes tipos de pinturas convencionales. Las características técnicas de cada una de las resinas ensayadas son las siguientes:

-Resina alcídica (modificada con un aceite de índice de yodo, entre 120 y 150, semisecante)

Contenido en ácidos grasos,%	61
Anhidrido Ftálico,%	30
Contenido en sólidos,%	60
Índice de acidez, máximo	7
Viscosidad a 25°C en un 50% de "white spirit", ps	6-9
Tipo de poliol utilizado	Pentaeritrita
Tipo de disolvente empleado	"white spirit" 100-150
Soluble en:	
-Hidrocarburos aromáticos y alifáticos	
-Esteres y cetonas	
-Dipentenos.	

- Resina acrílica termoplástica:

Índice de acidez	6.5
Punto de reblandecimiento,°C	150-160
Dureza Sward, mínima	35
Densidad relativa	1.11
Contenido máximo en volátiles,%	2
Viscosidad a 25°C, cps:	
30% en xileno.....	75-125
30% en acetato de etilo	40-75
40% en tolueno	300-400
Peso molecular	Medio-bajo
Tipo de copolímero termoplástico	MMA/BMA
Soluble en:	
-Disolventes aromáticos	
-Disolventes clorados	
-Disolventes polares.	

De acuerdo con el esquema de trabajo, la elección del material base más adecuado se llevó a cabo ensayando cinco materiales alcídicos y tres acrílicos termoplásticos. En la tabla-8.1, se presentan las características más importantes de sus formulaciones.

Tabla-8.1 Características de formulación de las pinturas convencionales estudiadas.

REFERENCIA	CARACTERISTICA			
	Resina (%)	TiO2 (%)	Pigmentación	Densidad relativa
Alcídica				
ALC-1	16.8	10.7	1 : 3 . 6	1.49
ALC-2	15.9	13.8	1 : 3 . 6	1.50
ALC-3	17.9	12.9	1 : 3 . 3	1.48
ALC-4	18.5	11.9	1 : 3 . 0	1.43
ALC-5	18.5	15.6	1 : 3 . 0	1.44
Acrílica				
ACR-1	15.1	12.6	1 : 3 . 4	1.46
ACR-2	15.2	16.4	1 : 3 . 7	1.52
ACR-3	23.2	16.6	1 : 2 . 5	1.39

8.1.1.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES EN RELACION A LA SELECCION DE LOS MATERIALES CONVENCIONALES.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el proceso de selección se realizó en tres etapas, cuyos resultados y discusión se exponen seguidamente.

PRIMERA ETAPA

En la tabla-8.2 se recogen los resultados experimentales obtenidos para el poder cubriente y para el factor de luminancia en las películas secas de los materiales descritos en la tabla-8.1.

Tabla-8.2 Poder cubriente y factor de luminancia de los materiales convencionales estudiados.

CARACTERISTICA	MATERIAL							
	ALC-1	ALC-2	ALC-3	ALC-4	ALC-5	ACR-1	ACR-2	ACR-3
Poder Cubriente (MELC-12,96)	0.96	0.98	0.96	0.97	0.98	0.93	0.97	0.98
Factor de Luminancia (MELC- 12,97)	0.83	0.84	0.85	0.85	0.87	0.89	0.89	0.90

De acuerdo con dichos valores y teniendo en cuenta el criterio de selección seguido (máximos poder cubriente y factor de luminancia) para cada tipo de pintura convencional, los materiales seleccionados serían:

- Pintura alcídica modificada, **ALC-5.**
- Pintura acrílica termoplástica, **ACR-3.**

SEGUNDA ETAPA

Una vez seleccionado el vehículo fijo, el paquete de cargas y pigmento, para cada tipo de pintura convencional, se procedió al estudio del mejor sistema de disolventes, a través del valor obtenido en los ensayos de "tiempo de secado" y de "resistencia al sangrado". En la tabla-8.3 se presentan las características de cada una de las mezclas ensayadas.

Tabla-8.3 Composición de las mezclas de disolventes estudiados.

TIPO DE PINTURA	COMPOSICION DEL DISOLVENTE
ALCIDICA (ALC-5)	- Naturaleza - % (V/v)
1	Heptano / Tolueno / Decano 75 / 15 / 10
2	Heptano / Tolueno / 2-Nitropropano 75 / 15 / 10
3	White Spirit (100/150) / Tolueno 85 / 15
4	Heptano / Xileno 85 / 15
5	Heptano / Tolueno 85 / 15
ACRILICA (ACR-3)	Metil Etil Cetona / Tolueno 75 / 25
A	
B	Metil Etil Cetona / Tolueno 25 / 75
C	Metil Etil Cetona / Xileno 25 / 75

Por su parte en la tabla-8.4, se recogen los valores del tiempo de secado y resistencia al sangrado obtenidos para cada material y para cada una de las mezclas de disolventes ensayadas.

Tabla-8.4 Tiempo de secado y resistencia al sangrado de las mezclas de disolventes estudiadas.

CARACTERISTICA	REFERENCIA DEL MATERIAL							
	1	2	3	4	5	A	B	C
Tiempo de secado (min.) "no pick-up (MELC-12,71)	19	15	22	17	15	6	7	11
Resistencia al sangrado (MELC-12,84)	8	8	8	8	8	8	8	8

A la vista de estos resultados puede indicarse, en primer lugar que todos los materiales ensayados son, en principio, aptos para ser utilizados como disolventes en la fabricación de pinturas convencionales, ya que con tiempos de secado relativamente altos no se produce sangrado en ningún caso.

Dichos tiempos se sitúan entre los 6 y los 22 min, lo que implica que el tiempo requerido para la protección del material aplicado no es muy elevado y por lo tanto no debe interrumpirse el tráfico.

Por otra parte, las mezclas más volátiles (pinturas alcídicas 5, 2 y 4) son las que conducen a tiempos de película abierta más cortos, mientras que a mayores puntos de ebullición (mezclas 1 y 3) se obtienen tiempos de película abierta más elevados.

Hay que resaltar que todas las mezclas de disolventes que den lugar a tiempos de película abierta en pinturas alcídicas de hasta 25 min, no producirán sangrado, siempre que el contenido en aromáticos de las mismas no supere el 15% en volumen (referido al total de la mezcla de disolventes empleados). En pinturas acrílicas termoplásticas, y debido a su proceso de secado, además de dar lugar a tiempos de secado muy cortos, no se produce sangrado, aunque en su formulación se empleen disolventes muy enérgicos.

En el caso de pinturas acrílicas termoplásticas, la libertad de elección del disolvente viene restringida por la capacidad que posea para disolver el copolímero que constituye la resina. Siempre, se tratará de mezclas con un elevado contenido en cetonas, completándose el resto con aromáticos.

Como consecuencia del tipo de disolventes que es necesario utilizar en el caso de pinturas acrílicas termoplásticas, los tiempos de película abierta, generalmente, son cortos, por lo que se hace imprescindible tener especial cuidado a la hora de la aplicación de éstos materiales, sobre todo, a elevadas temperaturas.

TERCERA ETAPA

De acuerdo con las recomendaciones obtenidas a partir de los resultados experimentales correspondientes a las dos etapas anteriores, en ésta última etapa, se procedió a seleccionar el material más adecuado para cada uno de los tipos de pintura convencional considerados, de acuerdo con los criterios de calidad ya mencionados.

Así, para la pintura alcídica modificada se seleccionó la de referencia "ALC-5", utilizando como disolvente la mezcla número 1.

Como pintura acrílica termoplástica se seleccionó la de referencia "ACR-3", utilizando como disolvente la mezcla tipo A.

En la tabla-8.5 se exponen las características de formulación de estos materiales, así como sus propiedades más importantes, tanto de película seca como húmeda.

Tabla-8.5 Características y propiedades de las pinturas convencionales seleccionadas.

TIPO DE PINTURA	CARACTERISTICA							
	Naturaleza del ligante	Resina %	TiO ₂ %	Pigmentación	Mezcla de disolventes % Volumen	Poder Cubriente	Factor de Luminancia	Tiempo de Secado (min.) "no pick-up"
Alcídica	Alcídica modificada con aceites Insaturados	18,5	15,6	1:3,0	Mezcla de disolventes Heptano/Tolueno/Decano 75 / 15 / 10	0,98	0,87	19
Acrílica	Acrílica Termoplástica Copolímero: MMA/BMA	23,2	16,6	1:3,0	Mezcla de disolventes Metil Etil Cetona/Tolueno 75 / 25	0,98	0,90	6

8.1.2. MATERIALES DE LARGA DURACION.

8.1.2.1. TERMOPLASTICO DE APLICACION EN CALIENTE.

Siguiendo el mismo esquema de trabajo del punto anterior, en esta fase del estudio se pretendían obtener los criterios necesarios para lograr la formulación más adecuada en éste tipo de materiales.

1ª etapa. Partiendo de lo que corresponde a una formulación patrón de estos materiales, se realizó el estudio de las mejoras en las propiedades mediante la adición de polímeros. Los objetivos perseguidos en este caso trataron de dar una respuesta a aquellos problemas más comunes. Así, como objetivos básicos en esta etapa pueden citarse los siguientes:

- Temperaturas de aplicación bajas
- Elevadas durezas superficiales en los materiales aplicados para lograr menores ensuciamientos, mayores resistencias al flujo y mejora de la flexibilidad a bajas temperaturas.

2ª etapa. Una vez obtenida la composición óptima del ligante en la formulación patrón ensayada, se estudió la influencia del paquete "pigmento más cargas" en el material, con el fin de elegir aquel que resultara adecuado. Además se evaluó la influencia de la adición del estearato de aluminio, como agente antisedimentante, en la mezcla final.

PRIMERA ETAPA

Como formulación patrón, de acuerdo con la experiencia que a lo largo de los años se ha venido adquiriendo para este tipo de materiales, puede citarse la siguiente:

A. LIGANTE:

Resina.....17%
Aceite mineral..... 3%

B. CARGAS Y PIGMENTOS:

PIGMENTO:

Dióxido de titanio..... 6%

AGREGADO:

Carbonato cálcico.....15%
Cristobalita.....39%-36%

MICROESFERAS DE VIDRIO..... 20%

C. ADITIVOS 0%-3%

A partir de esta formulación se estudió el efecto que tiene la adición de polímeros sobre la viscosidad a la temperatura de fusión, sobre el punto de reblandecimiento, sobre la humectación de cargas y pigmentos y sobre la flexibilidad a bajas temperaturas, con el fin de intentar mejorar las propiedades químicas y físicas del producto final.

A continuación se exponen los cambios deseados y, como consecuencia, las mejoras que se pretendieron conseguir con la adición de polímeros en las propiedades de los termoplásticos de aplicación en caliente:

CAMBIOS DESEADOS.

- 1.- Menor viscosidad.
- 2.- Mayor punto de reblandecimiento.
- 3.- Mejor humectación de pigmentos y cargas.
- 4.- Mejora de la flexibilidad a bajas temperaturas.

MEJORAS PRETENDIDAS.

- 1A.- Mejor humectación de pigmentos y cargas.
- 1B.- Mayor homogeneidad de la mezcla, conseguida en menor tiempo.
- 1C.- Temperatura de aplicación baja.
- 1D.- Líneas de menor espesor.
- 1E.- Adherencia física al soporte, al penetrar mejor en los poros y huecos del firme.

- 2A.- Superficie del material aplicado más dura.
- 2B.- Resistencia al ensuciamiento mayor.
- 2C.- Resistencia al flujo más elevada.

- 3A.- Desarrollo del color en pigmentos y cargas de forma más rápida y homogénea.
- 3B.- Reducir la tendencia a sedimentar del agregado, durante el proceso de calefacción del material.
- 3C.- Aumentar la cohesión del material aplicado y, por lo tanto su resistencia al desgaste.
- 3D.- Mejorar su adherencia química al soporte.
- 3E.- Mejorar la retención de las microesferas de vidrio añadidas por postmezclado.

- 4A.- Aumentar la resistencia a la aparición de grietas, en el material aplicado.
- 4B.- Mejorar la resistencia al impacto del material.

Para llevar acabo esta etapa de la investigación se probaron cinco formulaciones, todas ellas con el mismo paquete de cargas y pigmentos, aditivos y contenido en ligante, de acuerdo con la formulación estándar ya descrita, pero con distintas mezclas de ligante, variando el contenido de cada componente y su naturaleza química. De esta forma, desde un punto de vista cualitativo, podía obtenerse la alternativa más idónea.

En la tabla-8.6, se recogen las cinco mezclas ensayadas. Como puede verse, se seleccionaron polímeros de "punto de reblandecimiento" similar, pero con diferentes viscosidades, presentando ambos el mismo peso específico.

Tabla-8.6 Definición de las mezclas de ligante ensayadas.

CARACTERISTICA	MATERIAL				
	A	B	C	D	E
Cambio efectuado con respecto a la patrón	Mezcla patrón	Disminución del contenido en aceite	Cambio por otra resina (R ₁) de mayor PR	Adición de Polímero: P ₁	Adición de Polímero: P ₂
Tipo de ligante	Resina patrón Aceite mineral -	Resina patrón Aceite mineral -	Resina: (R ₁) Aceite mineral -	Resina patrón Polímero: P ₁ Aceite mineral	Resina patrón Polímero: P ₂ Aceite mineral
porcentajes de mezcla en el ligante:	17	18	17	15,5	15,5
Contenido total en fórmula: 20%	3	2	3	1,5	1,5
	—	—	—	3	3

En la tabla-8.7, por su parte, están recogidas las características de las resinas y los polímeros ensayados.

Tabla-8.7 Propiedades de los materiales estudiados.

CARACTERISTICA	MATERIAL			
	Resina patrón	Resina R ₁	Polímero P ₁	Polímero P ₂
Punto de Reblandecimiento (°C) ASTM - E - 28	100	115	115	112
Color (Gardner) AMS - 360 - 21	7	8	No es importante para los polímeros	
Viscosidad (m Paa) ASTM - D - 3236	700 a 140 °C	14000 a 140 °C	27 a 121 °C	590 a 121 °C
Flash point (°C) ASTM - D - 92	250	250	No es importante para los polímeros	
Peso específico ASTM - D - 71	0,97	0,98	0,95	0,95

En la figura-8.1, se encuentran representados los valores correspondientes al punto de reblandecimiento (MELC-12.128) y a la viscosidad Zahn a la temperatura de fusión de los materiales estudiados (180°C) para las mezclas A, B, C, D y E. El ensayo de viscosidad con copa Zahn se encuentra descrito en el anexo de esta memoria.

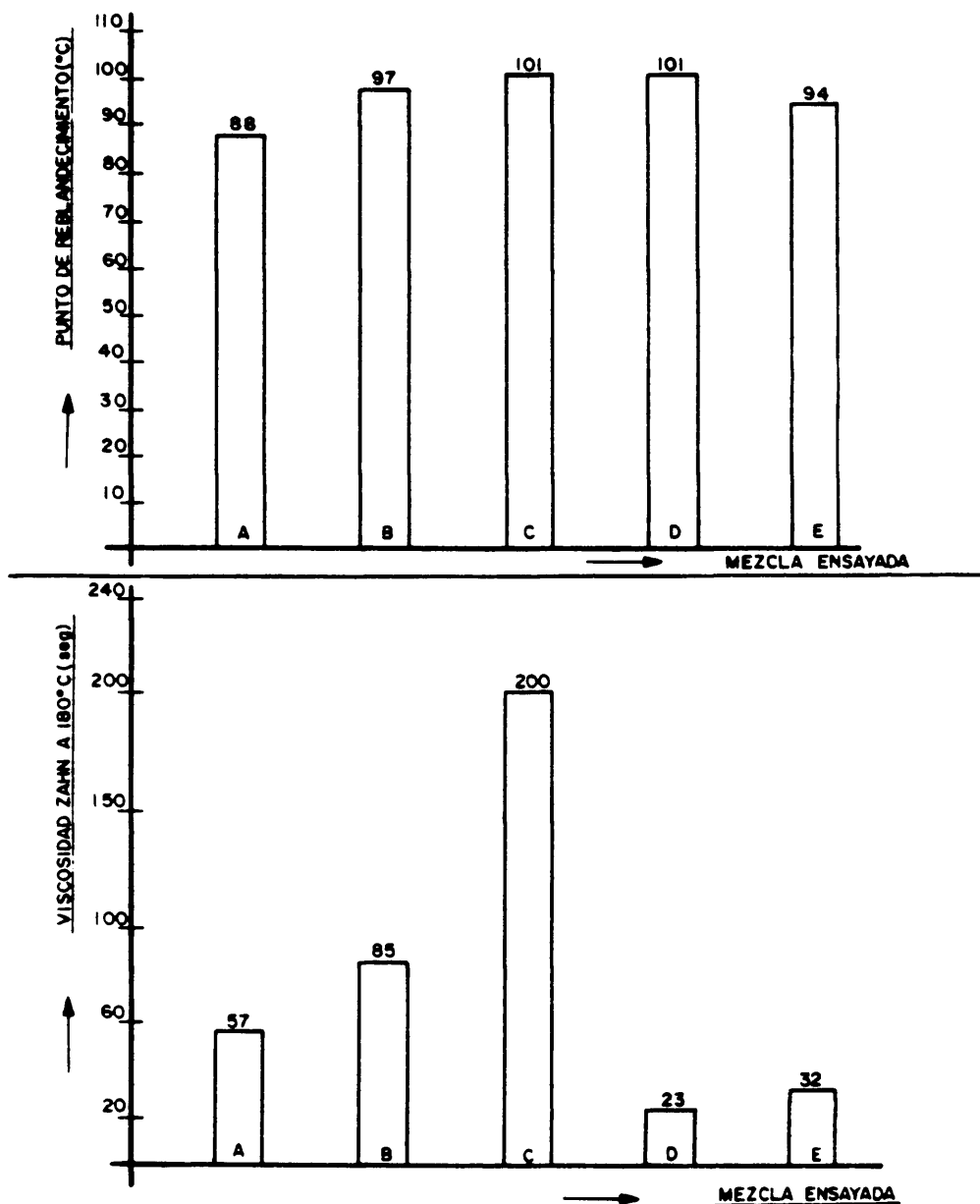


Fig.8.1 Variación del punto de reblandecimiento y de la viscosidad tipo Zahn de las mezclas ensayadas.

A la vista de estos resultados puede indicarse que el aumento de resina en el ligante, en ausencia de polímeros, provoca, por un lado, el aumento del punto de reblandecimiento y, por otro, el de la viscosidad del material a la temperatura de fusión.

Al sustituir la resina estándar por otra de mayor punto de reblandecimiento, sin adición de polímeros en el ligante, se produce un aumento brusco del punto de reblandecimiento, aumentando la viscosidad cuatro veces, aproximadamente, con respecto a la patrón. Esta solución, a pesar de dar lugar a elevados puntos de reblandecimiento, no es válida ya que el valor de viscosidad que se obtiene es excesivamente alto, lo que implicaría elevadas temperaturas de aplicación, teniendo que calentar incluso por encima del "punto flash" de la resina.

De las opciones ensayadas, las más adecuadas resultan ser la D y la E ya que, además de conducir a un aumento del punto de reblandecimiento, disminuyen a la mitad el valor de la viscosidad con respecto al que se obtenía con la formulación patrón. También, puede apreciarse que el valor final de la viscosidad no es independiente del tipo de polímero elegido.

La forma más eficaz de aumentar el punto de reblandecimiento, disminuyendo además la viscosidad del material termoplástico, es la adición de polímeros. De acuerdo con los resultados obtenidos, el ligante óptimo sería aquél que tuviera las siguientes características:

- Resina (equivalente a la patrón).....15.5%
- Aceites minerales..... 3.0%
- Polímero de modificación..... 1.5%

Una vez observado que el resultado óptimo se consigue mediante la sustitución de parte de la resina por un polímero, se procedió a la determinación de cuál era el compuesto más adecuado para este fin.

En este sentido, a efectos de este trabajo de investigación se han seleccionado cinco polímeros de modificación con las siguientes propiedades:

-Punto de reblandecimiento.... > 90°C

-Estabilidad al calor..... Muy buena

-Compatibilidad con resinas
de hidrocarburos..... Muy buena.

Además de estas propiedades se optó porque dichos polímeros convencionales estuvieran modificados a fin de poseer funciones polares para conseguir una mejor humectación de las cargas y pigmento y, por lo tanto obtener un producto homogéneo. En la tabla-8.8, se han recogido las propiedades más representativas de éstos polímeros.

Tabla-8.8 Propiedades más importantes de los polímeros seleccionados.

CARACTERISTICA	MATERIAL				
	Polímero: POL-1 Cera de Polietileno	Polímero: POL-2 Cera de Polietileno	Polímero: POL-3 Cera de Polietileno	Polímero: E-1 Copolímero EVA	Polímero: E-2 Copolímero EVA
Viscosidad (mPas) a 121 °C ASTM - D -3236	27	27	590	990	990
Viscosidad (mPas) a 180 °C ASTM - D -3236	12	12	160	250	250
Punto de rebland. (°C) ASTM - E - 28	112	115	112	102	88
Penetración (dmm) a 25 °C ASTM - D - 1321	3	5	6	5	15

Con el fin de llevar a cabo esta fase del trabajo, se tomó como formulación base la patrón ensayada en la primera etapa, utilizando como ligante el de la mezcla tipo A descrita en la tabla-8.6.

Las propiedades que se determinaron, de acuerdo con los métodos de ensayo descritos en el anexo, fueron las siguientes:

- Punto de reblandecimiento.
- Resistencia al flujo.
- Viscosidad Zahn.
- Mínima temperatura de "no rotura" a flexión.
- Propiedades ópticas: factor de luminancia e índice de amarilleamiento que se define por:

$$I.A = \frac{100}{Y} (1.277 X - 1.06 Z)$$

donde X,Y,Z, son los "valores triestímulos".

Los resultados experimentales obtenidos con las cinco formulaciones estudiadas, se encuentran recogidos en las figuras- 8.2 a 8.7.

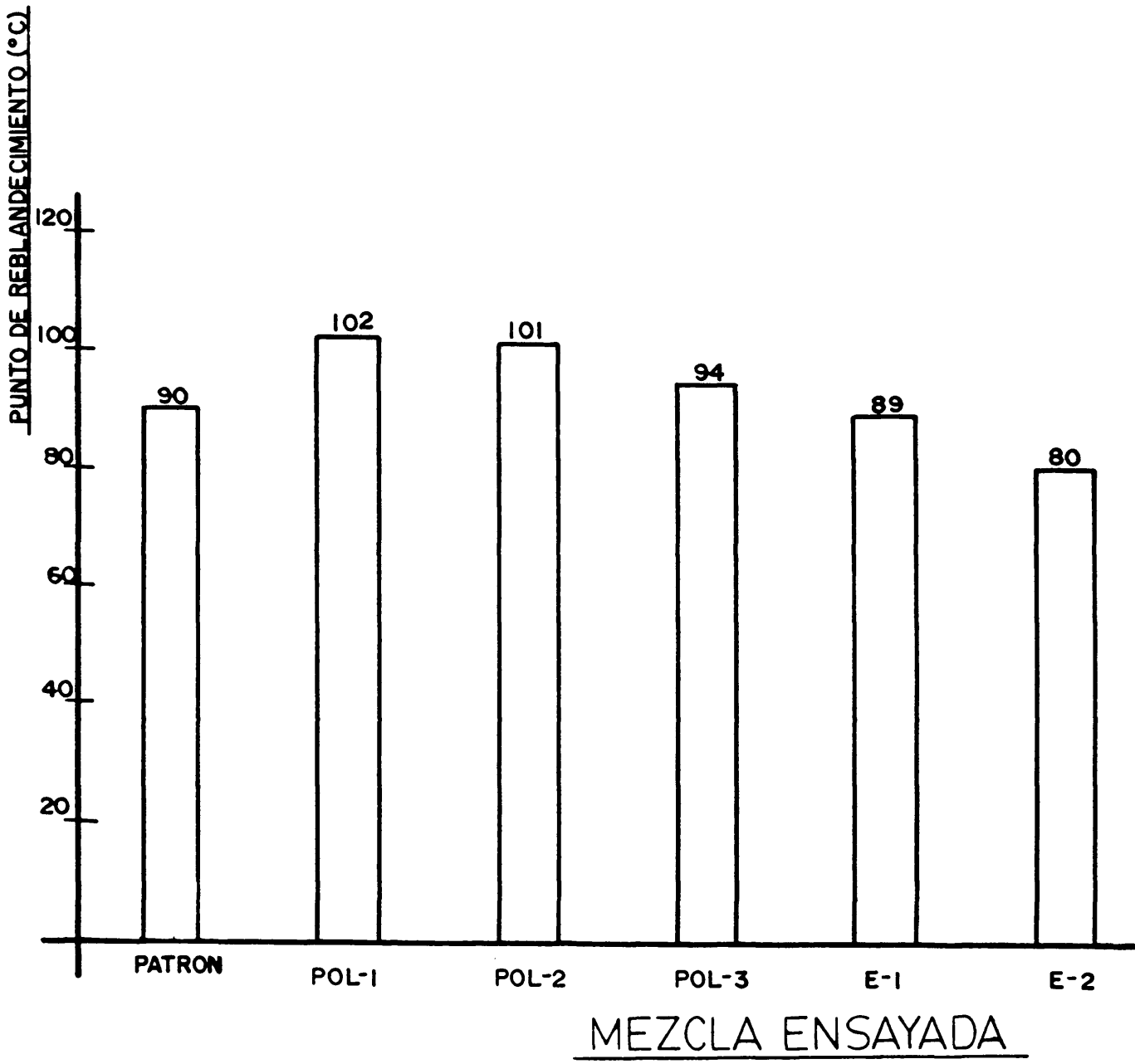


Fig.8.2 Punto de reblandecimiento de los materiales ensayados (BS-3262).

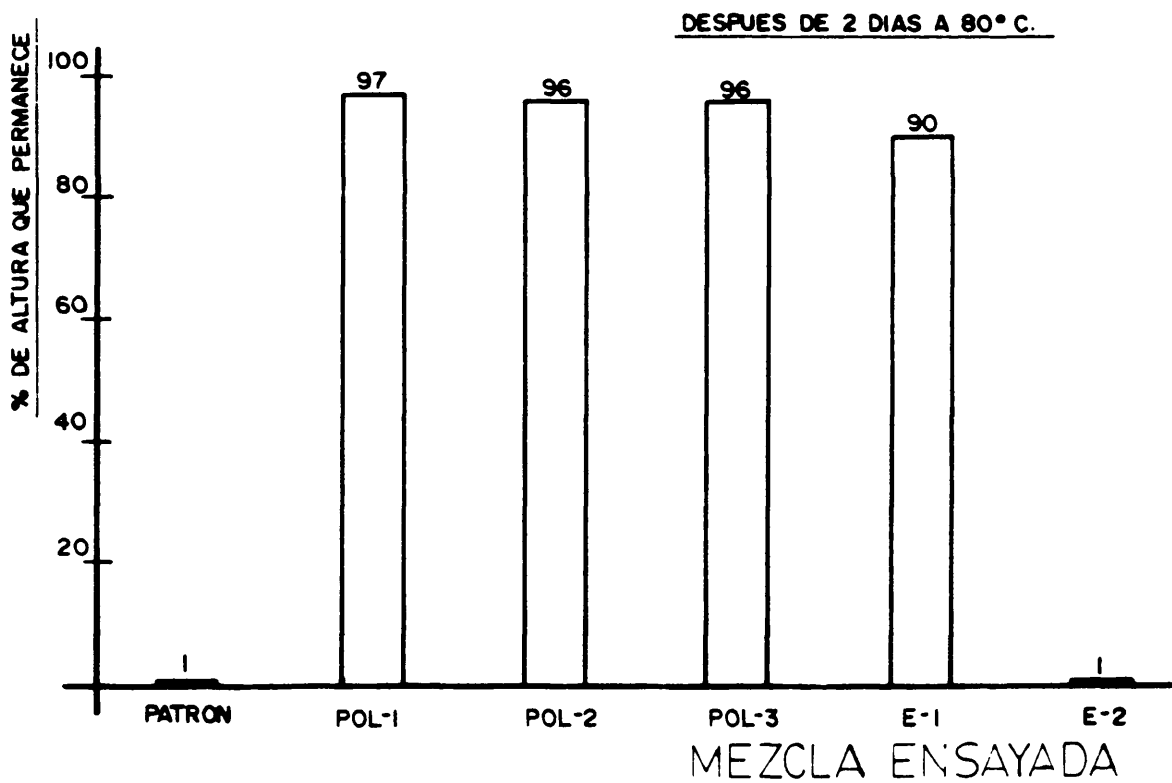
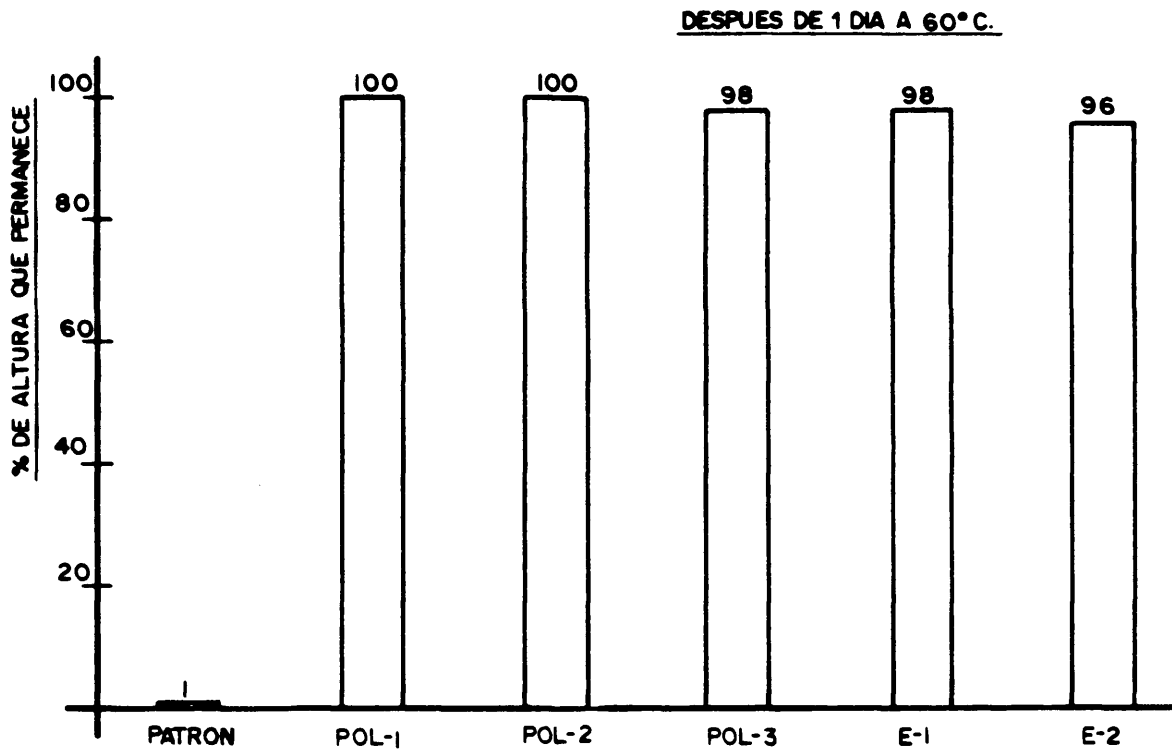


Fig.8.3 Resistencia al flujo de los materiales ensayados (BS-3262).

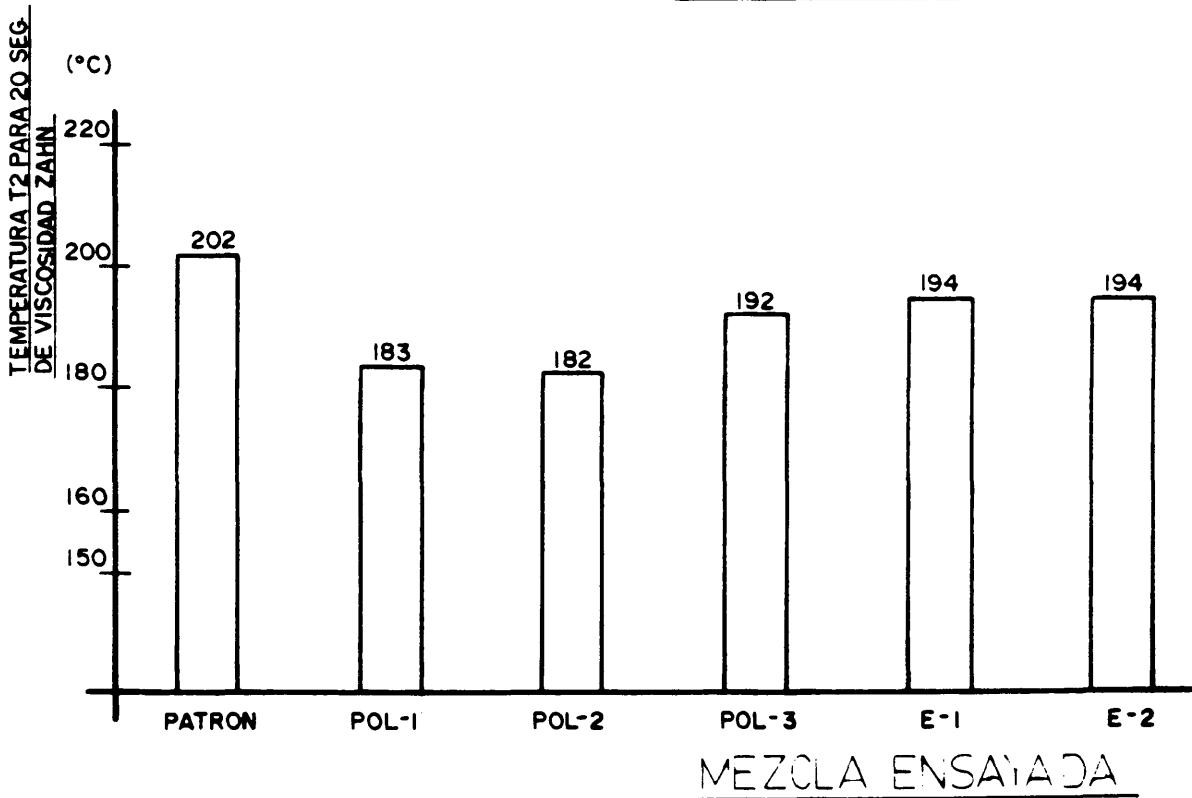
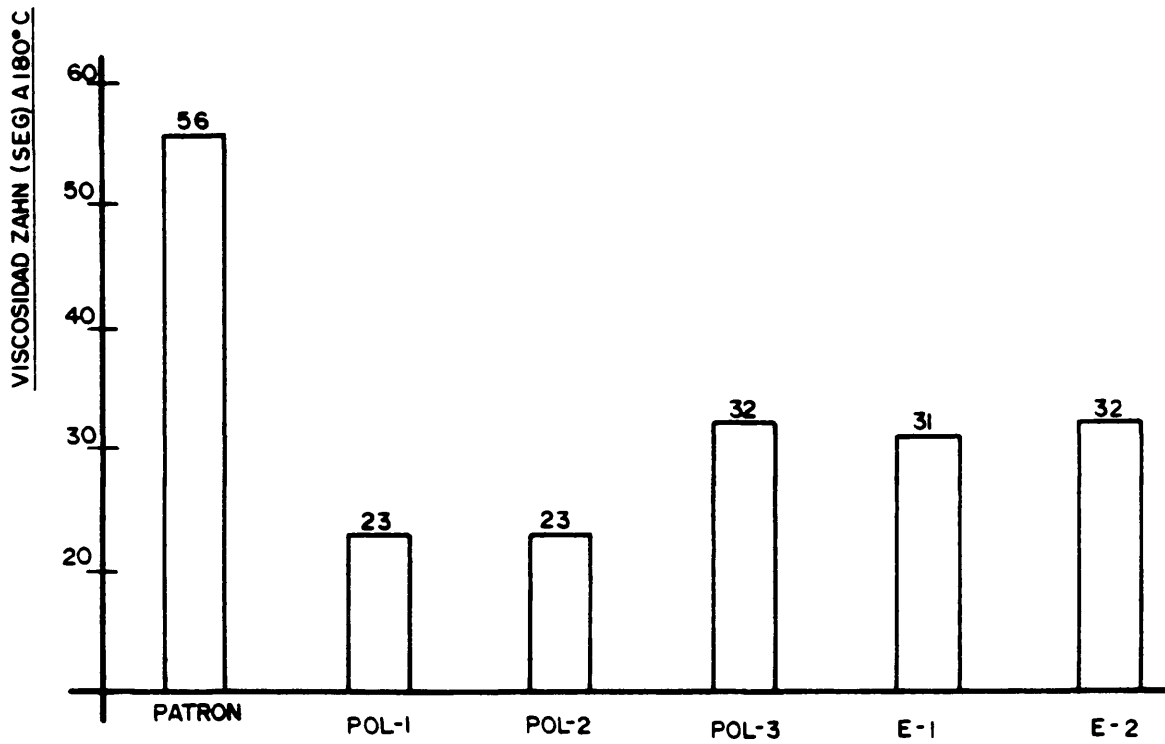


Fig.8.4 Viscosidad "Zahn" de los materiales ensayados (anexo).

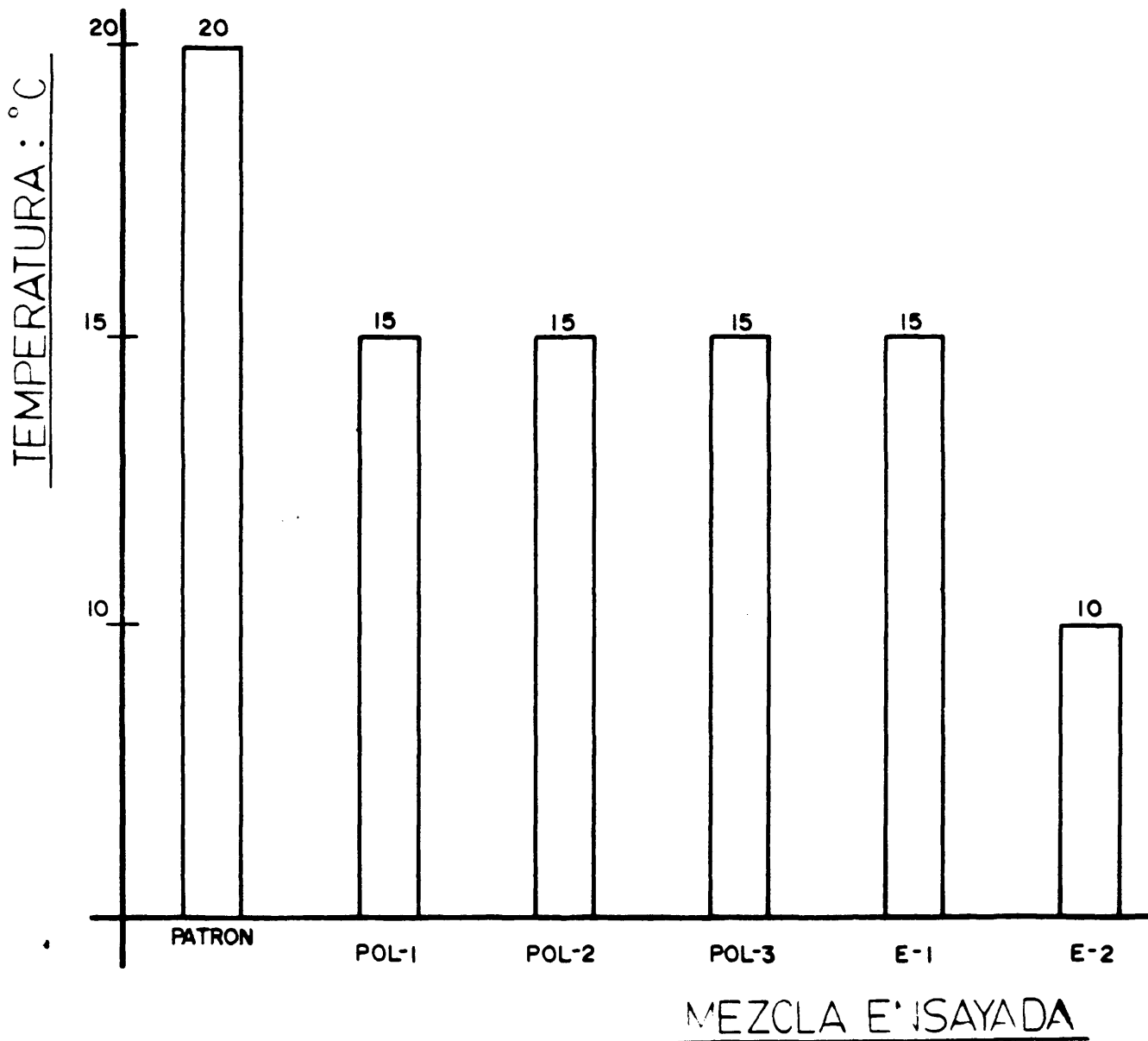


Fig.8.5 Mínima temperatura de "no rotura" a flexión de los materiales ensayados (anexo).

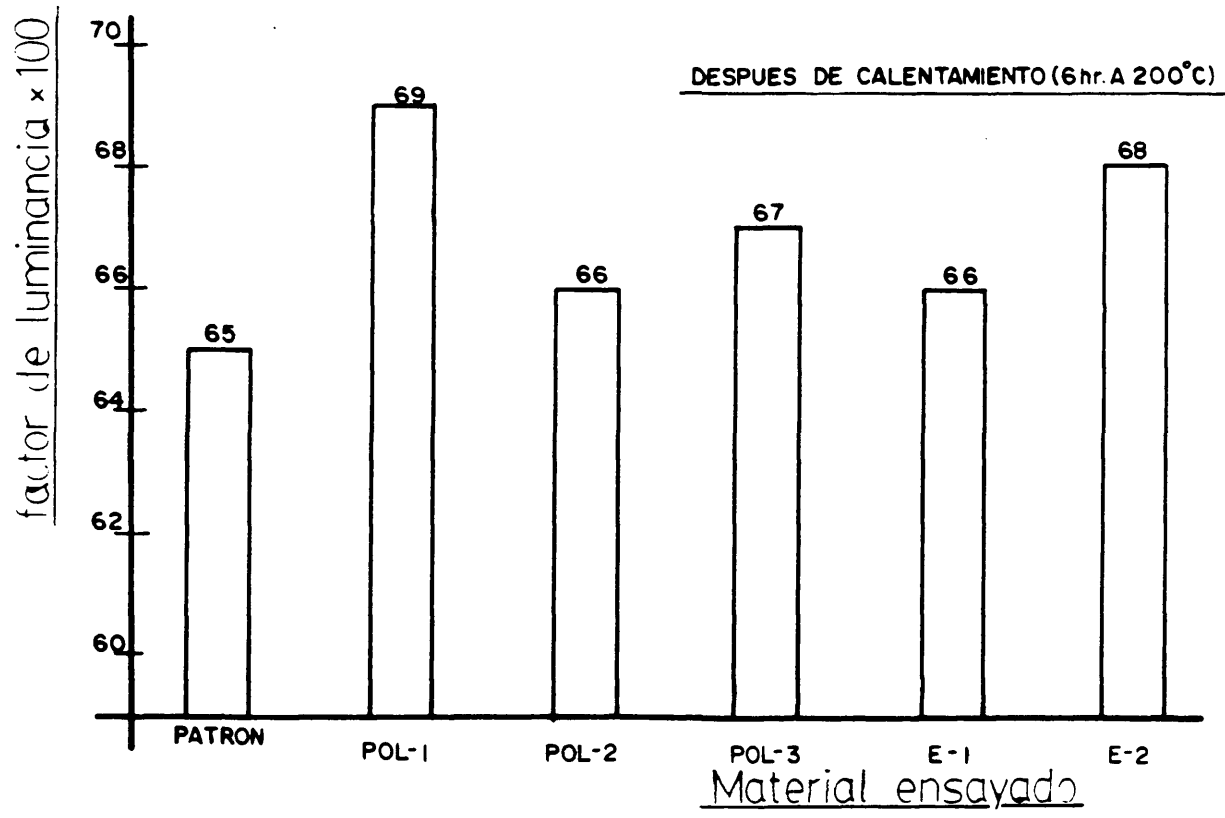
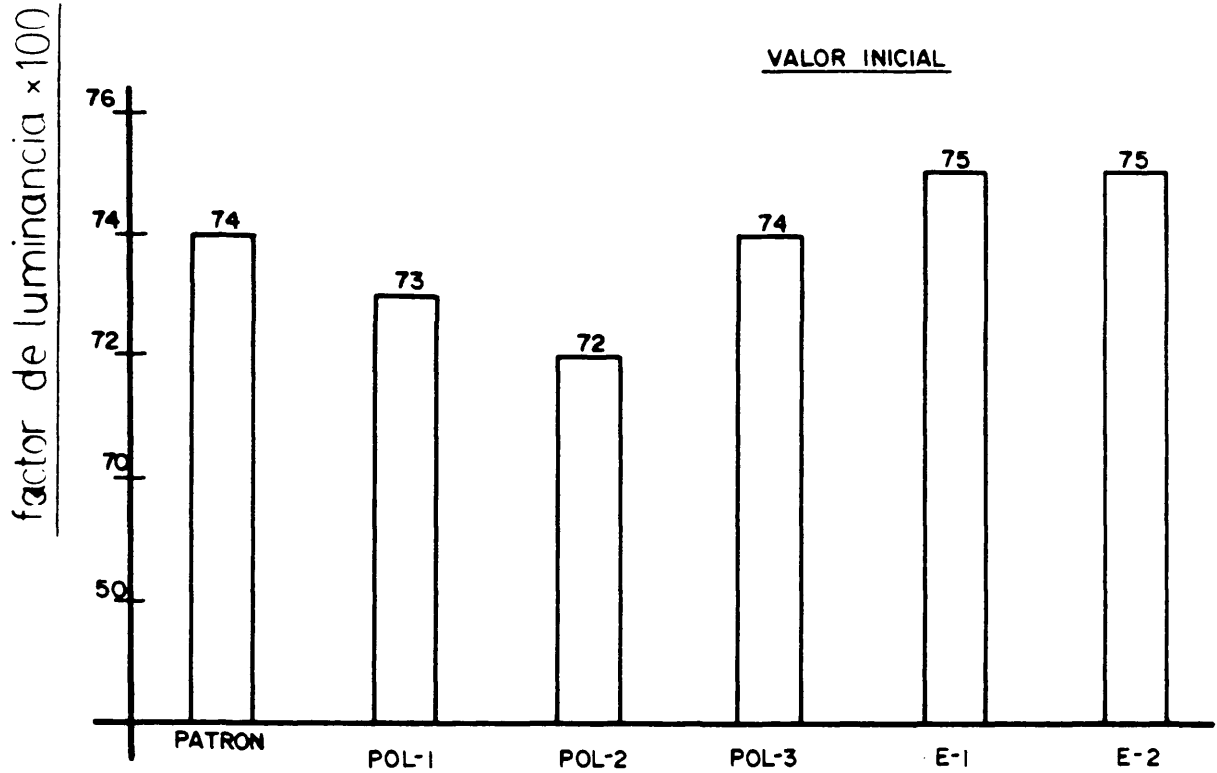


Fig.8.6 Factor de luminancia de los materiales ensayados (BS-3262).

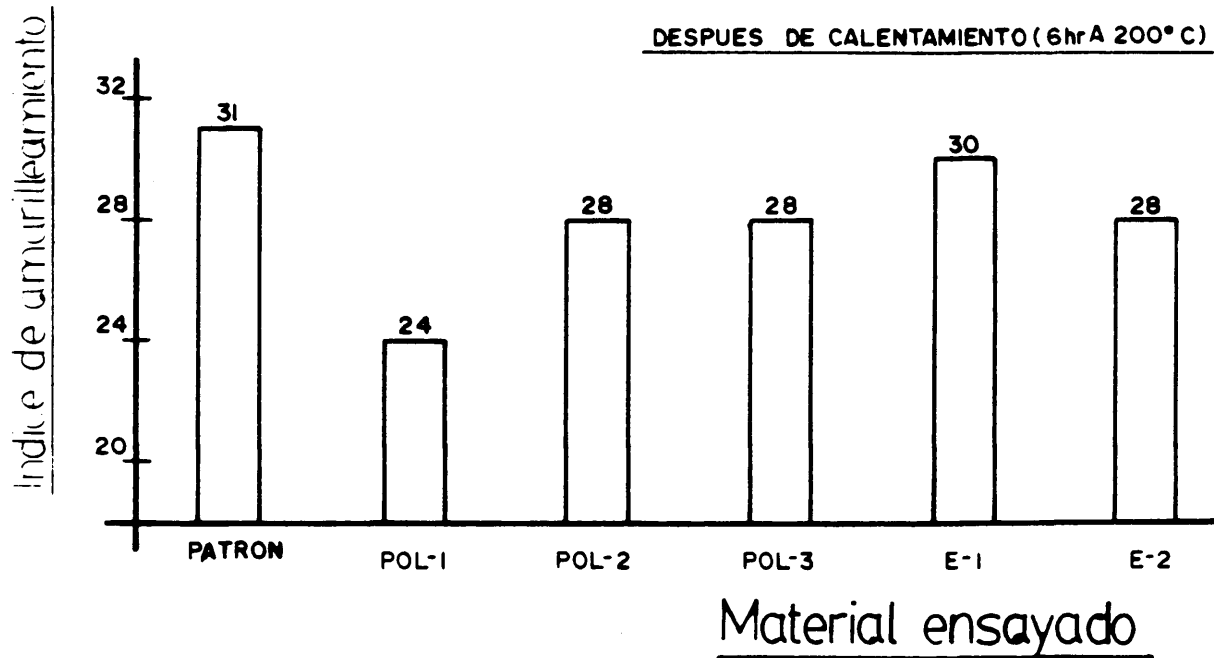
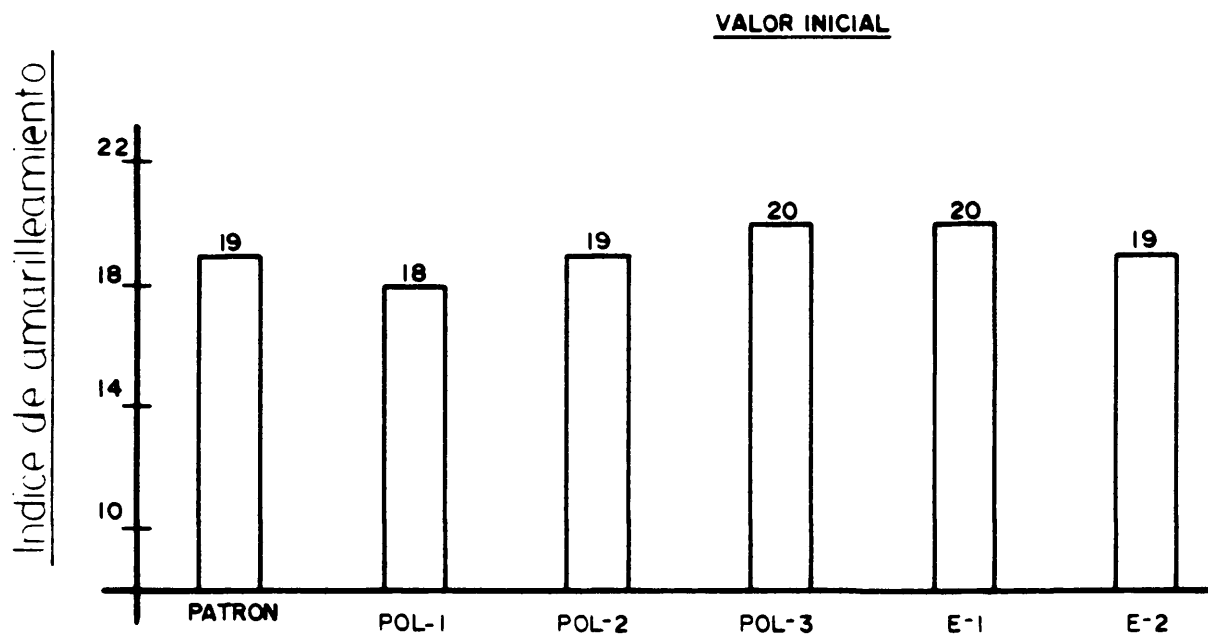


Fig.8.7 Indice de amarilleamiento de los materiales ensayados (BS-3262).

A la vista de estos resultados puede afirmarse que la adición de polímeros modifica sustancialmente las propiedades del material, siendo dicha modificación cualitativamente más importante en el caso de polímeros de baja viscosidad.

Por otra parte la adición de polímeros de baja viscosidad y elevado punto de reblandecimiento posee un efecto positivo en la mejora de las propiedades, sin influir en la flexibilidad del material. Cualquiera de los ensayados, POL-1 ó POL-2, serviría a este efecto ya que ambos dan lugar a resultados similares.

Sin embargo, elevados puntos de reblandecimiento en el producto final no siempre conducen a elevadas resistencias al flujo, tal y como se pone de manifiesto en los resultados obtenidos para estas dos propiedades en la fórmula patrón y con el polímero E-2, aunque siempre, la adición de un polímero mejorará la resistencia al flujo, influya o no en el punto de reblandecimiento.

Por último, en la tabla-8.9, se han esquematizado las conclusiones correspondientes a esta fase del trabajo.

Tabla-8.9 Resumen de las conclusiones obtenidas en el estudio de adición de polímeros de modificación en el ligante.

CARACTERÍSTICA DESEADA	TIPO DE POLIMERO				
	POL-1	POL-2	POL-3	E-1	E-2
Aumento del PR	+++	+++	++	+	0
Mejora de la resistencia al flujo	+++	+++	+++	++	+
Disminución de la viscosidad a la temperatura de fusión	+++	+++	+	+	+
Mejora de la flexibilidad	0	0	+	+	++
Propiedades ópticas	NO SE APRECIA MEJORA ALGUNA				

+++ mejora importante
 ++ mejora aceptable
 + incremento modesto
 0 comportamiento constante.

SEGUNDA ETAPA

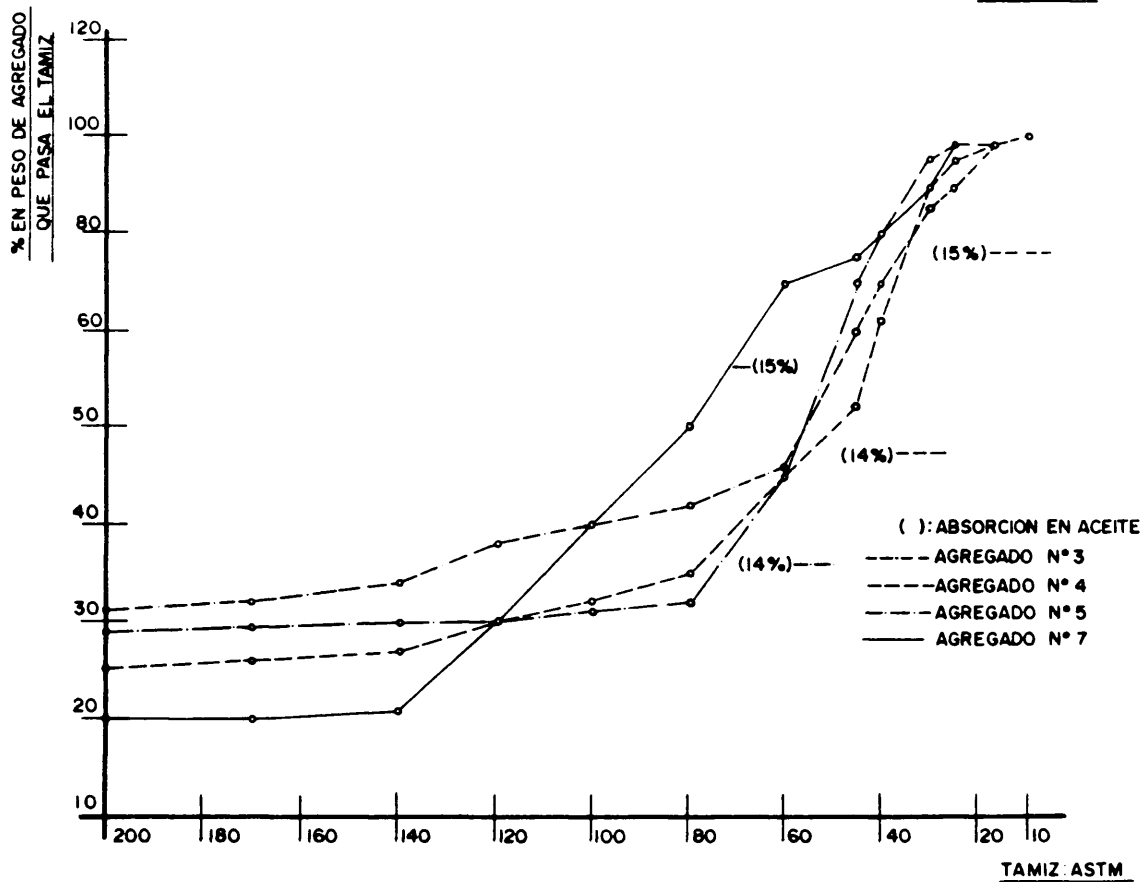
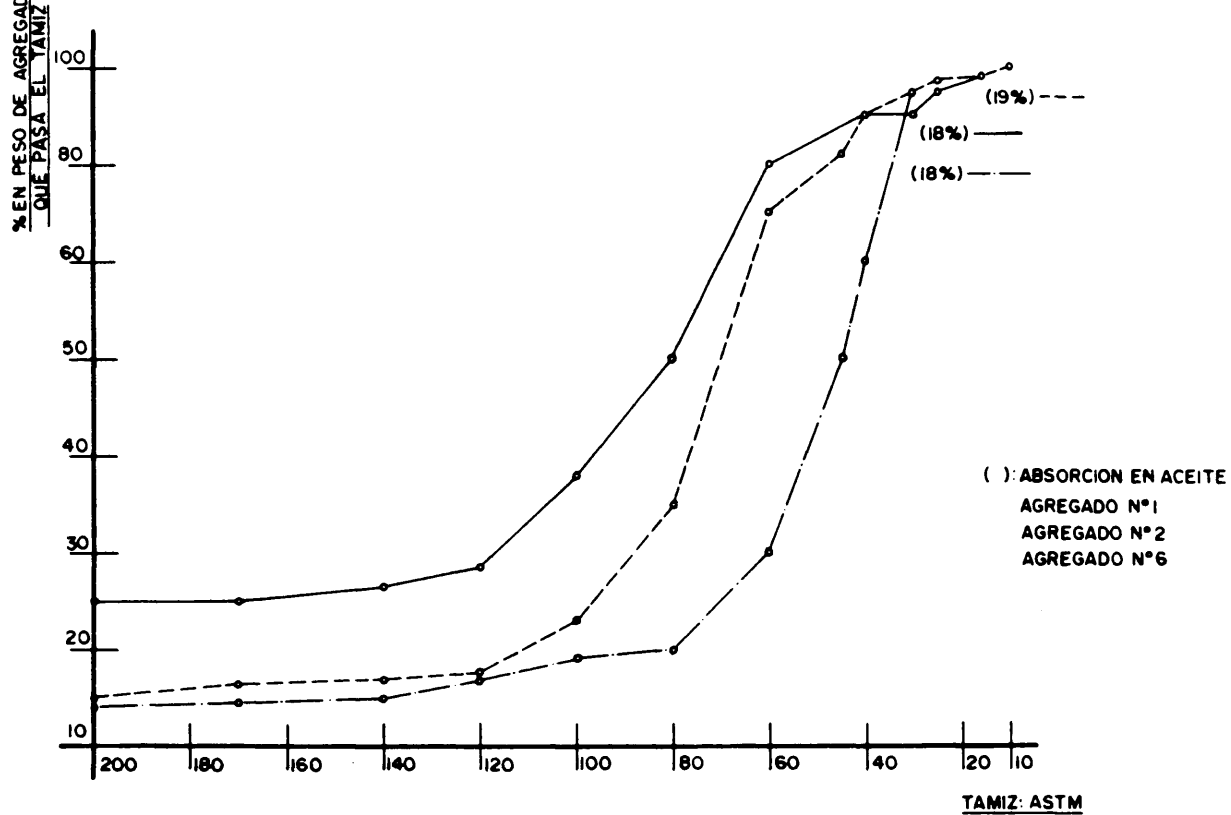
Como ya ha quedado reflejado, el objetivo de esta etapa consiste en observar la influencia que tiene el agregado elegido para la formulación del material, con el fin de poder predecir el comportamiento del mismo una vez aplicado.

Para ello, se escogieron siete materiales de la misma naturaleza (caliza cristalina) si bien diferían en cuanto a su absorción en aceite y distribución de tamaño de partícula.

Se seleccionó como fórmula de trabajo la patrón modificada de acuerdo con las conclusiones que se habían ido obteniendo en la etapa anterior, incorporando ahora al ligante un polímero de baja viscosidad.

Las características de los agregados ensayados están reflejadas en las figuras-8.8 y 8.9. Las propiedades medidas y los métodos de ensayo utilizados se encuentran explicados en el anexo de esta memoria. Se determinaron, en cada material, las propiedades que representan la facilidad de aplicación de los mismos y que son directamente proporcionales a la calidad de la formulación: viscosidad en copa Zahn (a 180°C) e índice de tixotropía. En éste último ensayo, la máxima variación de temperatura admitida era de 30°C.

Por último, se procedió al análisis de la influencia del estearato de aluminio, que añadido en pequeñas cantidades evita la segregación de los componentes, en el material fundido. De este aditivo se añadió en la fórmula de ensayo hasta un 2%, referido al total. La cantidad de estearato de aluminio añadida se descontó de la de carbonato cálcico.



Figs.8.8 y 8.9 Distribución del tamaño de partícula de los agregados ensayados.

Las figuras-8.10 y 8.11 recogen los valores de viscosidad Zahn a 180°C y tixotropía, de los siete materiales ensayados.

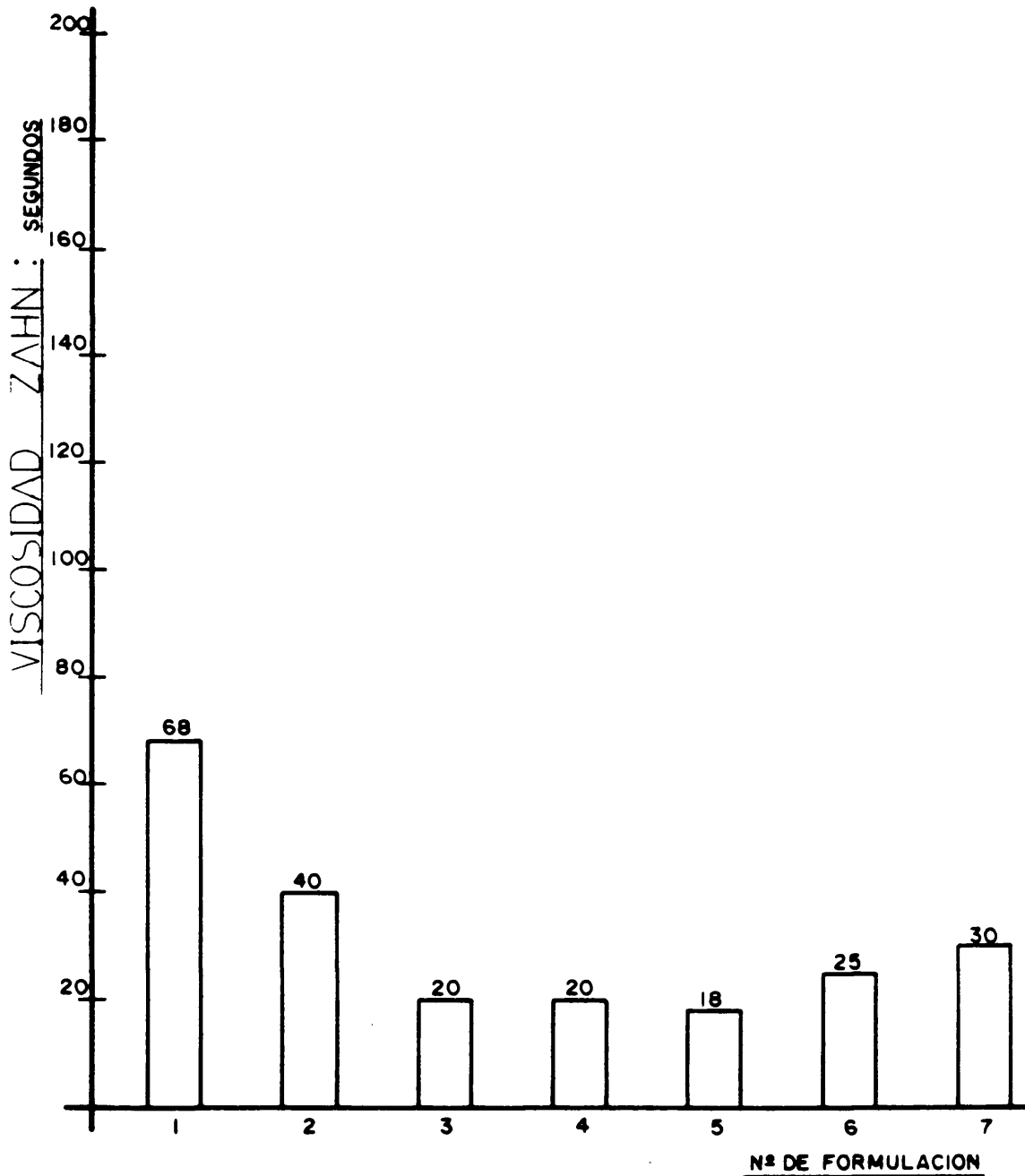


Fig.8.10 Viscosidad "Zahn" de los materiales ensayados (anexo).

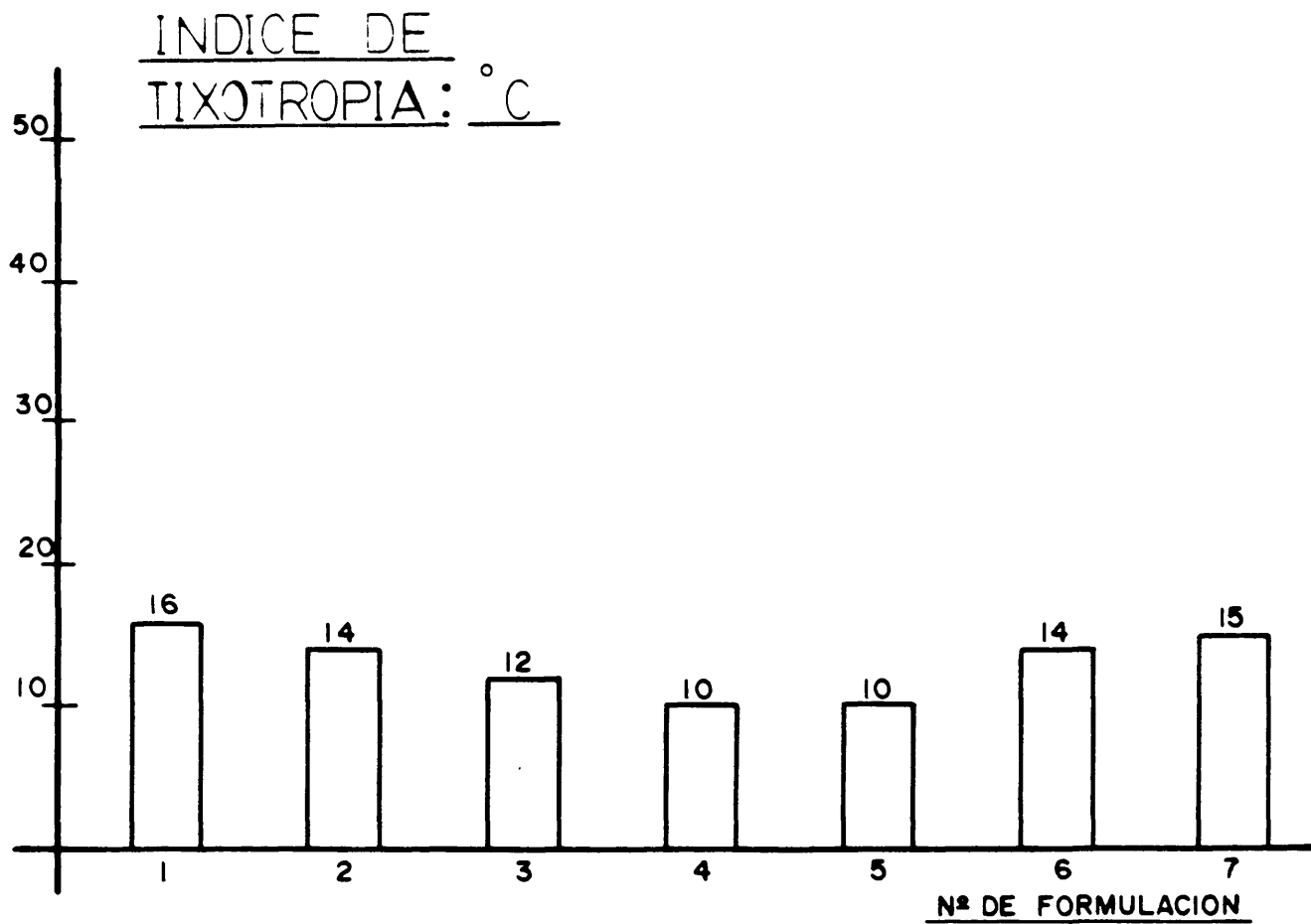


Fig.8.11 Índice de tixotropía de los materiales ensayados (anexo).

Se deduce que la utilización de granulometrías continuas, en general, produce viscosidades menores. Por tanto mediante la utilización de este tipo de granulometrías puede favorecerse la fluidez del material a su temperatura de aplicación.

Por su parte el índice de tixotropía sigue una ley semejante a la de la viscosidad, pero en éste caso, la influencia del agregado es menor.

Por último, y dado que tradicionalmente en estos materiales se viene utilizando como agente antisedimentante el estearato de aluminio, en éste apartado, se estudió la influencia que sobre la viscosidad del material y su tixotropía, tiene este aditivo, con el fin de determinar su cantidad óptima en la formulación y concretar su influencia sobre la viscosidad y tixotropía.

Se utilizó como fórmula de trabajo la patrón ya modificada con el polímero de baja viscosidad antes seleccionado, aumentándose la cantidad de estearato de cinc hasta un 2% en peso de fórmula.

Los resultados experimentales obtenidos se han representado en la figura 8.12.

De ésta figura puede deducirse que el el estearato de aluminio no afecta a la tixotropía del material, por lo que no debe ser considerado un agente tixotropante.

Además, su influencia en la viscosidad, sigue una tendencia diferente dependiendo de la cantidad de aditivo añadido.

Así, hasta un 0.25%, la viscosidad disminuye para luego, a partir de este valor, ir en aumento.

El efecto antisedimentante del estearato de aluminio se debe a su influencia sobre la viscosidad, sobre todo a partir del 0.5% en peso de fórmula, cantidad a partir de la cual la viscosidad aumenta casi de forma exponencial.

La cantidad óptima de aditivo se situaría entre el 0.125% y 0.5%, destacando el valor 0.25%.

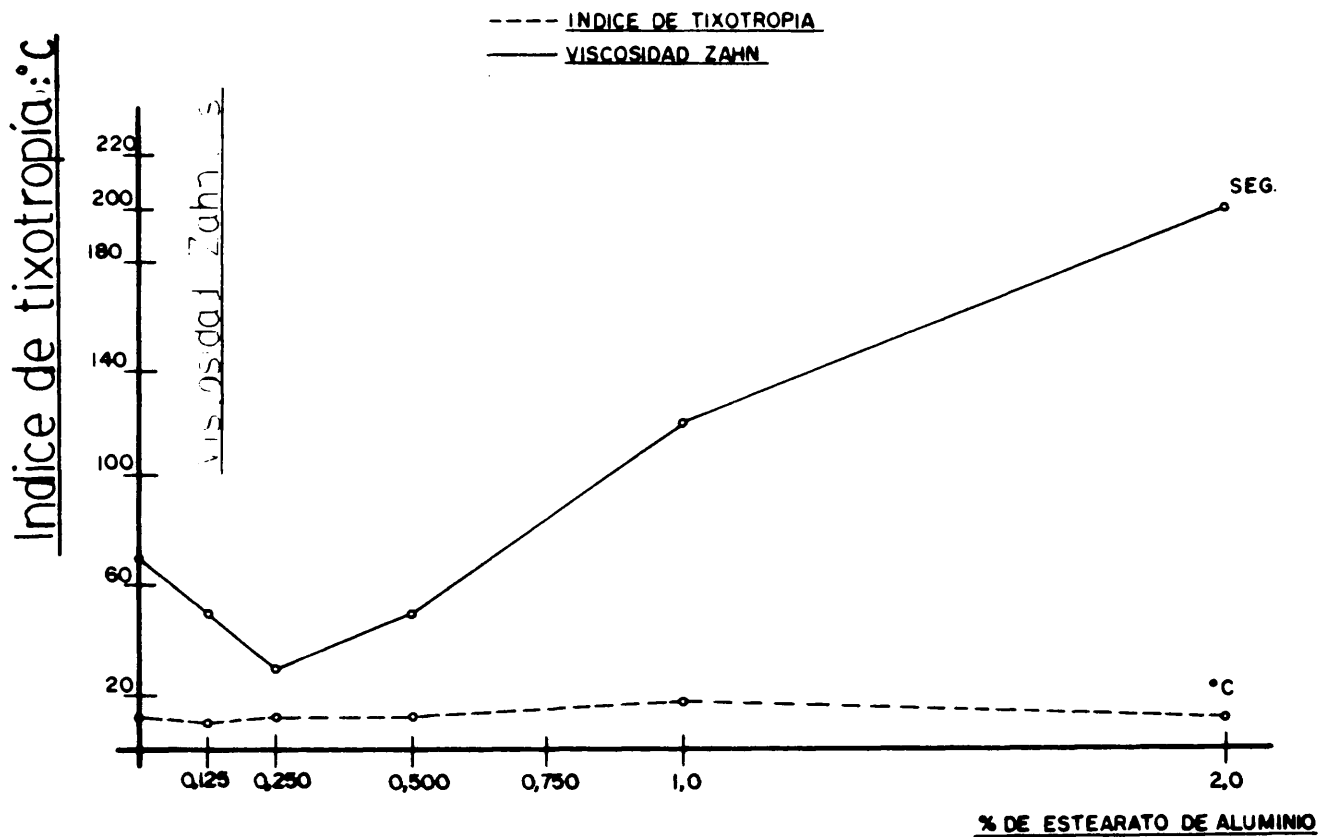


Fig.8.12 Influencia del contenido en estearato de aluminio en el material termoplástico de aplicación en caliente estudiado sobre la viscosidad y la tixotropía.

De acuerdo con los resultados y conclusiones obtenidas en las dos etapas anteriores, se seleccionó como formulación del termoplástico de aplicación en caliente la que se da a continuación:

-LIGANTE:

Resina patrón.....15.5%
Polímero de baja viscosidad.....1.5%
Aceites minerales.....3.0%

-CARGAS Y PIGMENTOS:

-Agregado:

Dolomita.....36.75%
Carbonato de calcio.....17.0%

-Pigmento:

Dióxido de titanio.....6.0%

-Microesferas de vidrio.....20.0%

-ADITIVOS:

Estearato de aluminio.....0.25%

8.1.2.2. PLASTICO EN FRIO DE DOS COMPONENTES.

La selección del material más adecuado para los ensayos a realizar posteriormente, tanto en campo como en laboratorio, al igual que en los dos casos anteriores, se realizó en base a la obtención, primero, de la mejor formulación del material base (tipo de resina, paquete de pigmentos más cargas y pigmentación), y , segundo, a realizar un control de la reticulación, eligiendo el mejor sistema de curado.

Así, las propiedades que se controlaron, en base al objetivo citado, fueron las propias del material polimerizado y el control de la reticulación.

En lo que se refiere a las propiedades del material polimerizado, las controladas en este caso fueron:

- Color (MELC-12.97), medido a través del factor de luminancia.
- Estabilidad a la radiación UV, estudiando el paquete de cargas y pigmentos más adecuado para obtener la menor variación de color, el menor envejecimiento del ligante y la máxima resistencia a la abrasión.

En cuanto al control de la reticulación, se realizó a través del seguimiento de la calidad de la polimerización del material, escogiendo el sistema de curado más adecuado, con el fin de controlar el "tiempo de gel" (ASTM-D-562-52), medido a través de la variación de viscosidad del material, y el tiempo y calidad de la polimerización, medido a través del valor de la dureza "Persoz" (INTA-160225), que además corresponde a una medida de la capacidad de ensuciamiento del material.

De acuerdo con estos dos apartados, la selección del material se realizó en dos etapas de trabajo.

1ª etapa. Para el tipo de resina escogido y con la pigmentación habitual en estos materiales, se eligió el mejor paquete de pigmentos y cargas, en base a los resultados obtenidos.

2ª etapa. Definido el material base, se estudió el mejor sistema de curado, con el fin de obtener una cómoda puesta en obra del mismo, y una suficiente calidad en el material polimerizado, de forma que su capacidad de ensuciamiento sea mínima.

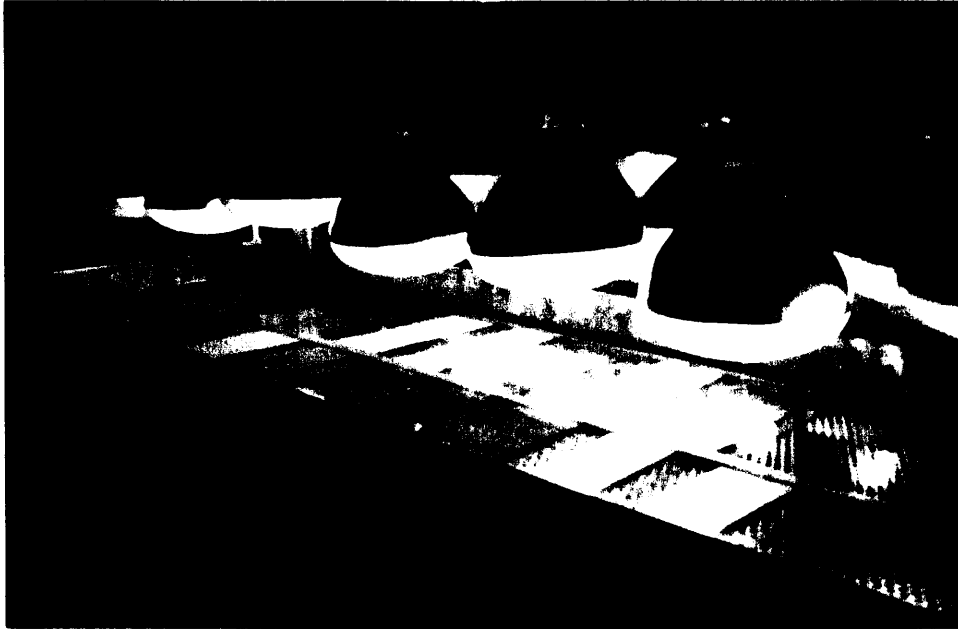
PRIMERA ETAPA

Para esta fase del trabajo se escogió una resina comercial al 50% en terpolímero, MMA/BMA/HMA, utilizando como diluyente reactivo, BMA.

En relación al estudio de la influencia del paquete de pigmentos más cargas empleado sobre la resistencia a la abrasión producida por la radiación UV, se procedió a la determinación, para cada uno de los materiales ensayados, de la resistencia a la abrasión, medida a través de la pérdida

diación UV al cabo de 1000 h de envejecimiento, y del color, medido a través de las coordenadas cromáticas y del factor de de luminancia antes y después del envejecimiento (MELC-12.97).

Para la realización del ensayo correspondiente, se utilizó un equipo de envejecimiento artificial acelerado por acción de la radiación UV estático, en el que las probetas se encuentran sumergidas en agua durante el ensayo (Fotografías- 8.1, 8.2).



Fotos-8.1 y 8.2 Detalle de la máquina de envejecimiento.

El equipo consta de dieciséis lámparas con una potencia 310 ± 10 w/m² y una radiación principal de 317 nm. Previamente a su instalación en el aparato, cada lámpara se calibró por separado, obteniéndose su potencia real. De acuerdo con el valor de potencia obtenido se escogió su altura, con respecto a la superficie de probeta la probeta, la cual estará siempre comprendida entre 13 cm y 18 cm (figura-8.13). El tipo de luz utilizado en el ensayo, fue el A1 (MELC-13.14).

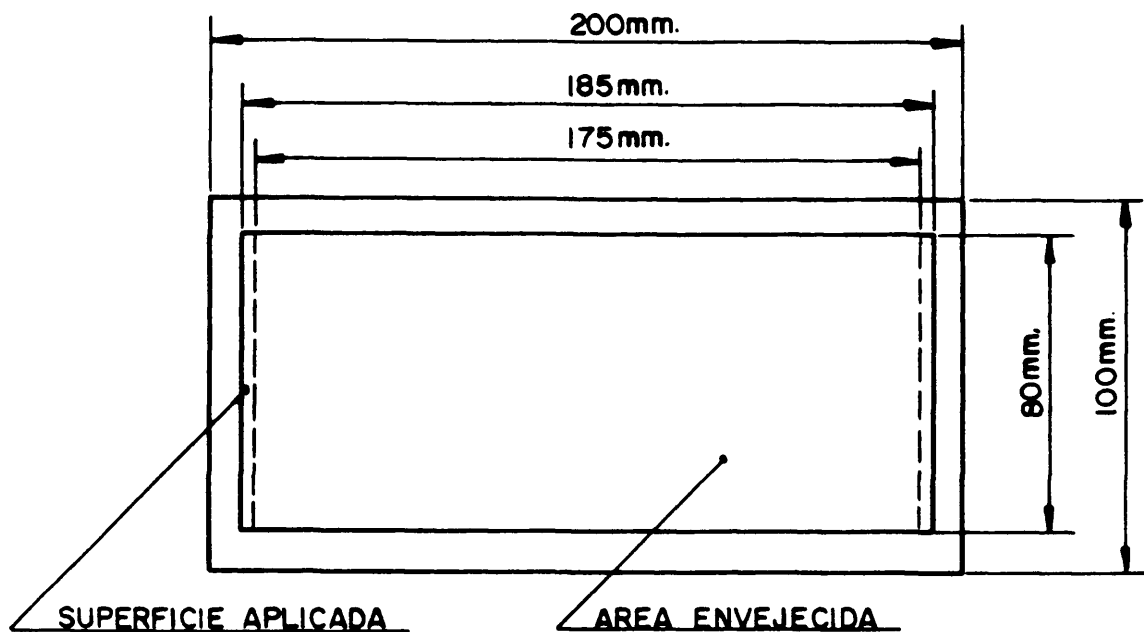


Fig.8.13 Detalle de las probetas ensayadas.

Dado que las lámparas concentran su potencia y energía en el punto de la probeta que se sitúa en la vertical de las mismas, para evitar zonas o puntos de máximo desgaste en éstas, las lámparas realizan, de manera constante, un desplazamiento horizontal de 4 cm sobre su eje vertical, en un periodo de tiempo de 1 min. De esta manera se evitan recalentamientos puntuales y se consigue que la radiación UV se distribuya por igual en toda la superficie de la probeta (figura-8.14).

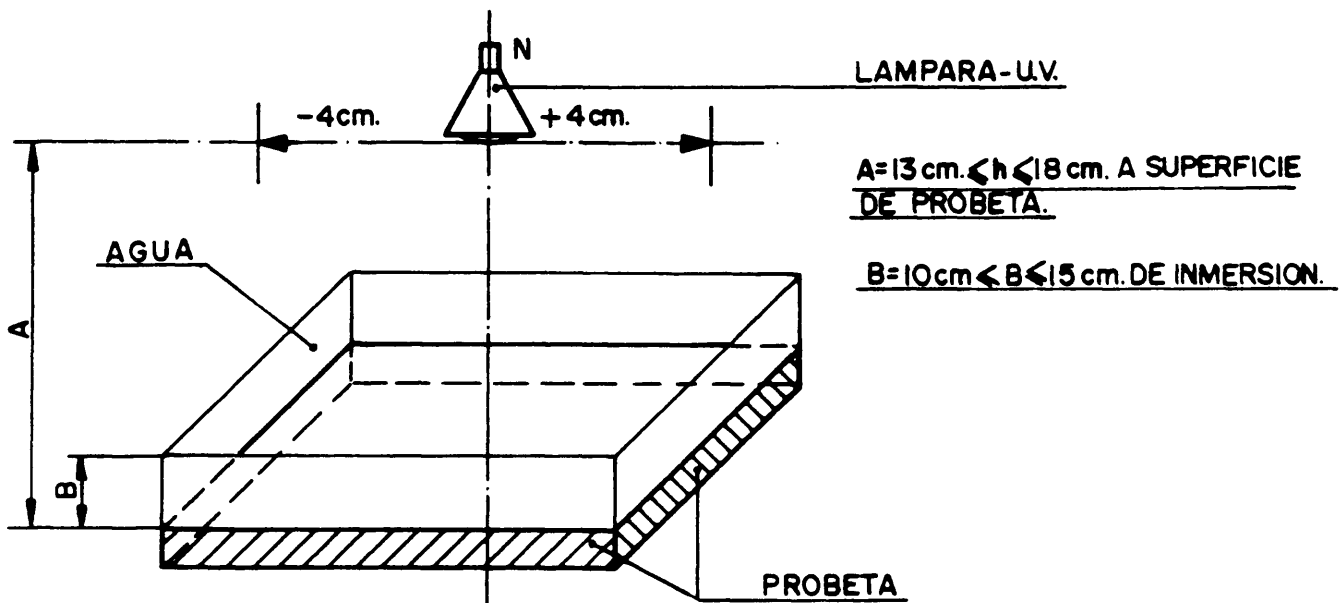


Fig.8.14 Detalle de situación de una probeta y lámpara en el equipo de envejecimiento.

Las probetas de cada material, formuladas con el ligante reactivo estándar y reticuladas con el sistema de curado **peróxido de benzoilo/N,N-dihidroxietil-p-toluidina** (1/1 en base a resina) se aplicaron con un espesor de 3 mm sobre una superficie transparente. Tras 24 h de curado a temperatura ambiente se introdujeron en la máquina de envejecimiento situándose de forma aleatoria, tal y como se ha representado en la figura-8.15.

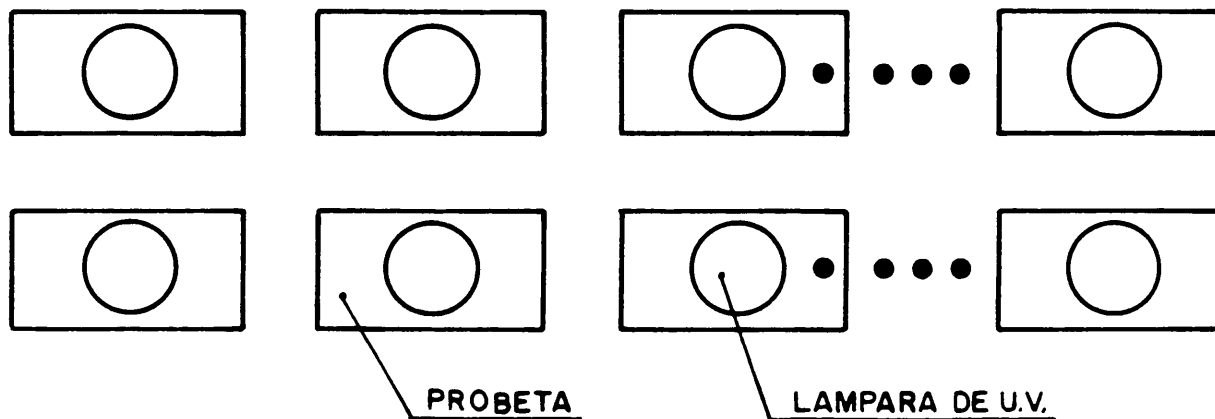


Fig.8.15 Representación en planta de la situación de las lámparas y de las probetas ensayadas en el equipo de envejecimiento.

A continuación, se sometieron a un período de envejecimiento, durante 1000 h, utilizando ciclos de medidas de 50 h. Finalizado dicho período, las probetas de los materiales seleccionados se introdujeron en una estufa durante 50 h a 80°C, procediéndose a su pesada final, así como a la determinación de su color, de su factor de luminancia y de sus coordenadas cromáticas.

Las formulaciones de los ocho materiales ensayados en esta fase del trabajo se recogen en la tabla-8.10.

Tabla-8.10 Formulaciones de los materiales estudiados.

COMPONENTES	MATERIAL -COMPOSICION-							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
	Cuarzo + Anatasa	Cuarzo + Rutilo	Cuarzo + Litopón	Cuarzo + Sulfato de Bario	Carbonato de calcio + Anatasa	Carbonato de calcio + Rutilo	Carbonato de calcio + Litopón	Carbonato de calcio + Sulfato de Bario
Resina: Ligante Reactivo	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Acelereante: EPT	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Microesferas de vidrio	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
Cristobalita (Cuarzo)	50.0	50.0	50.0	50.0				
Carbonato cálcico					50.0	50.0	50.0	50.0
Dioxido de titanio, tipo "Anatasa"	5.0				5.0			
Dioxido de titanio, tipo "Rutilo"		5.0				5.0		
Litopón			5.0				5.0	
Sulfato de Bario				5.0				5.0

Los valores obtenidos en cuanto a pérdida de masa y variación del color, se analizan en dos apartados:

I. Resistencia a la abrasión.

II. Cambio de color.

I. Resistencia a la abrasión

Los resultados obtenidos se recogen en la figura-8.16.

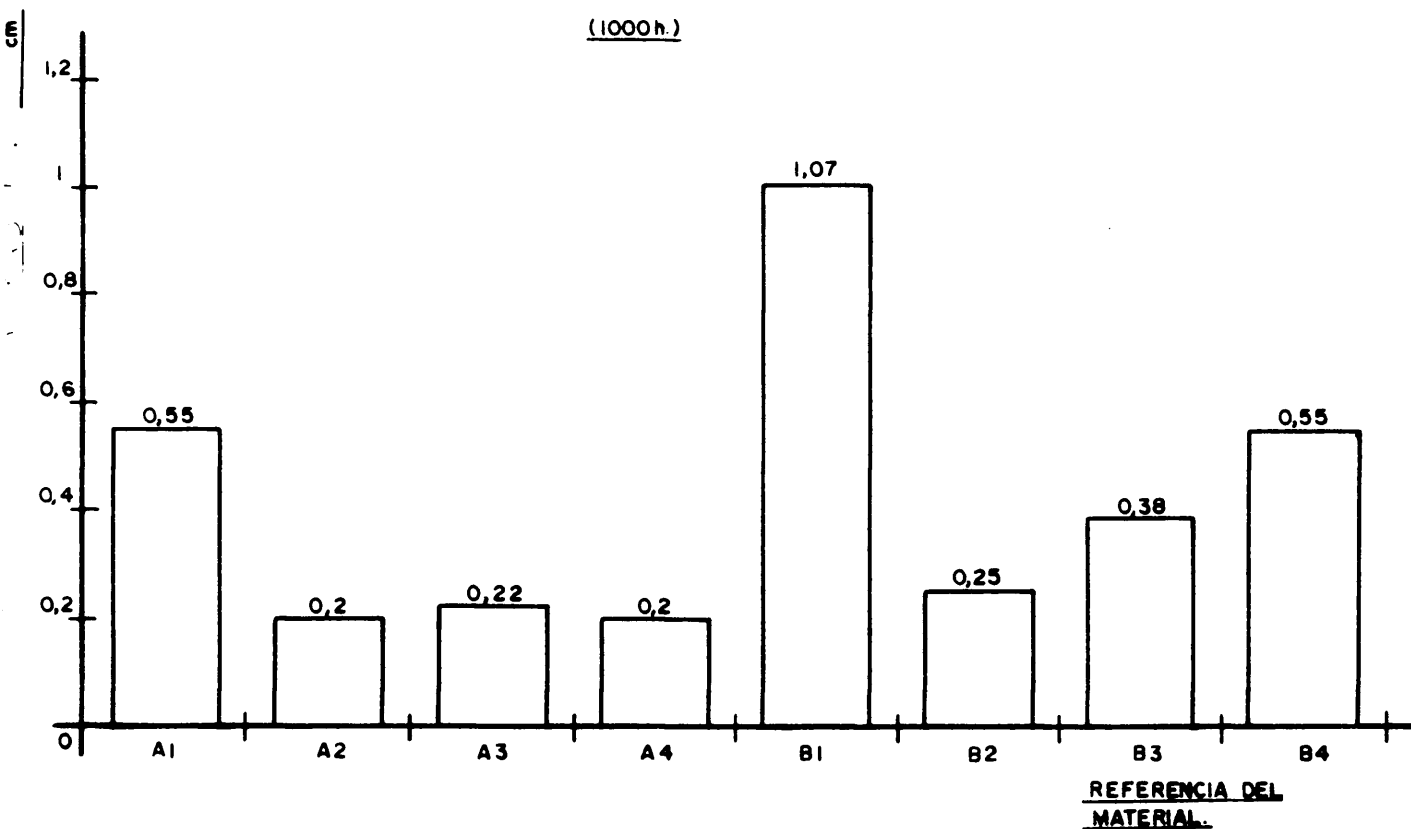


Fig.8.16 Pérdida de masa debida a la abrasión producida por la acción de la radiación "UV" en los materiales ensayados.

La abrasión debida a la radiación UV se calculó como la pérdida de masa por unidad de superficie de probeta (28 cm²).

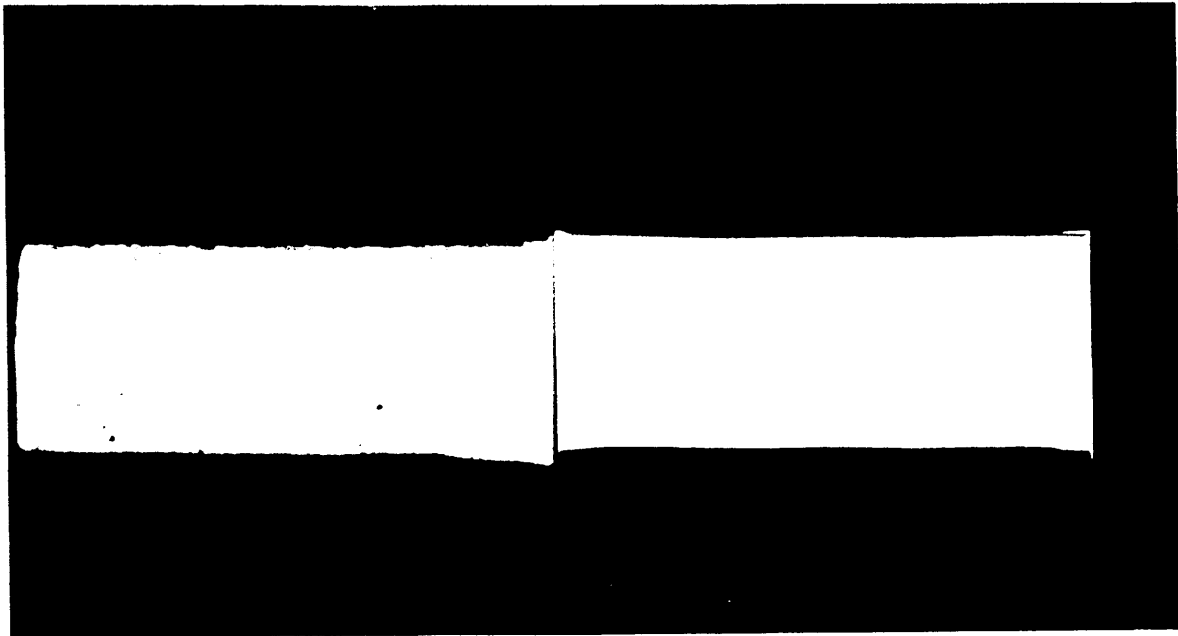
$$\sigma_{\text{abrasión}} = \frac{(M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}) \text{ gramos}}{28 \text{ cm}^2}$$

A partir de estos resultados puede deducirse que la resistencia a la abrasión, depende de las cargas y pigmentos empleados en la formulación. Así, cuando se emplea dióxido de titanio, tipo rutilo o anatasa, con cuarzo, la pérdida por abrasión es menor que cuando se utiliza el dióxido de titanio en combinación con el carbonato de calcio.

En general, a mayor radiación absorbida por las cargas y pigmentos, menor abrasión, aunque este efecto se altera a causa del "caleo" que presentan las cargas y pigmentos utilizados.

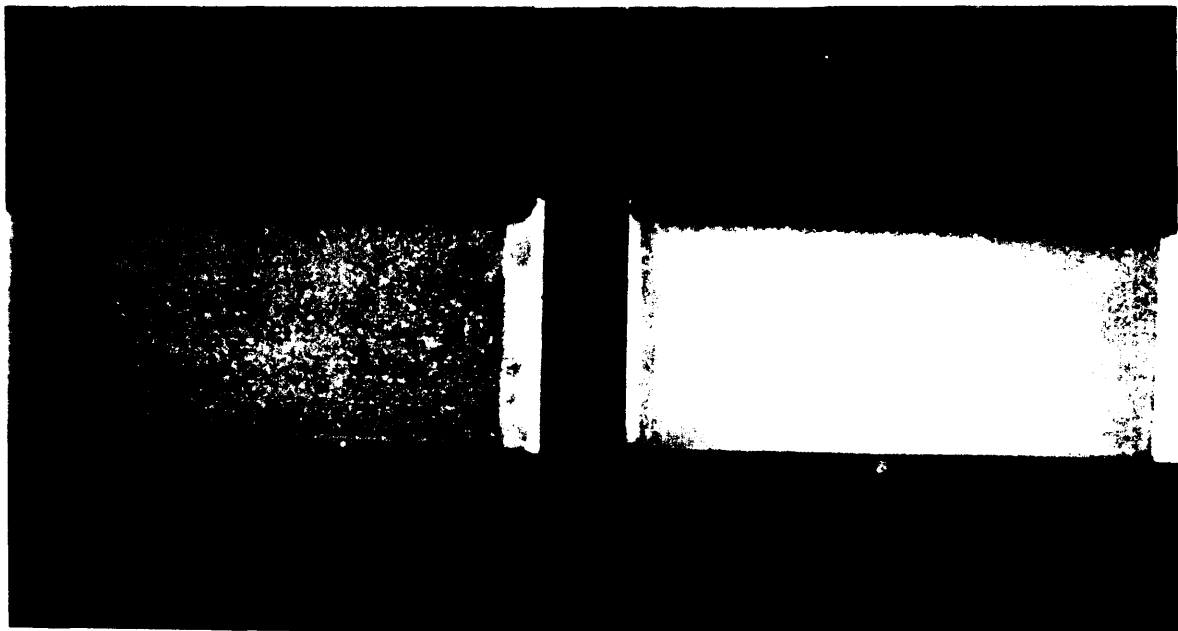
Existe, en éste sentido, la excepción del dióxido de titanio tipo anatasa; éste, a pesar de poseer la misma absorción de radiación que el tipo rutilo, debido a su tendencia a calentar, presenta una resistencia a la abrasión mucho menor; en todas las combinaciones ensayadas con anatasa, comparadas a las de sus homólogas utilizando rutilo la pérdida de masa es superior en un 50%.

En aquéllas formulaciones donde las cargas no absorben radiación UV la resina se ve afectada por la misma, dando lugar, por una parte a una abrasión, que se manifiesta por estratos de espesor aproximado 1 mm que va destruyendo el material progresivamente. por otra, a un cambio de color en la resina que se muestra en las fotografías-8.3 a 8.6. A medida que aparece de color marrón el reverso de las probetas o la parte que sobresale de su zona erosionada, las cargas apenas absorben radiación UV, siendo entonces absorbida por la resina. Así, las probetas pueden ordenarse, de peor a mejor comportamiento, de la siguiente forma A4 < B4 < B3 \approx A3 < LAS DEMAS, atendiendo a su estabilidad frente a la radiación UV.



A1

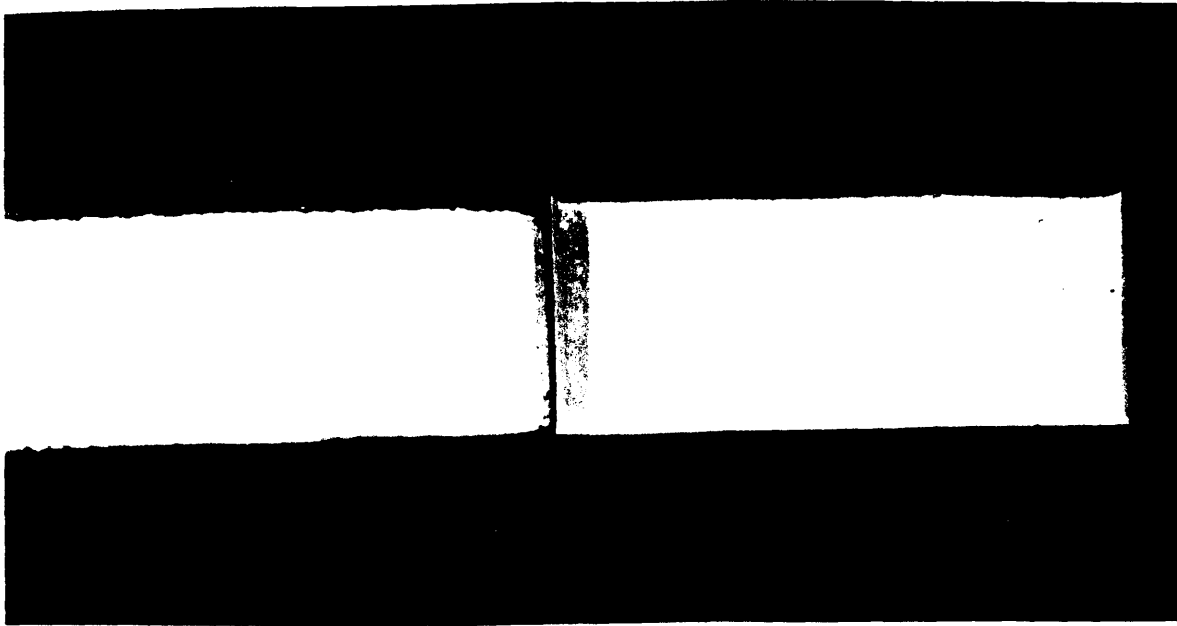
B1



A2

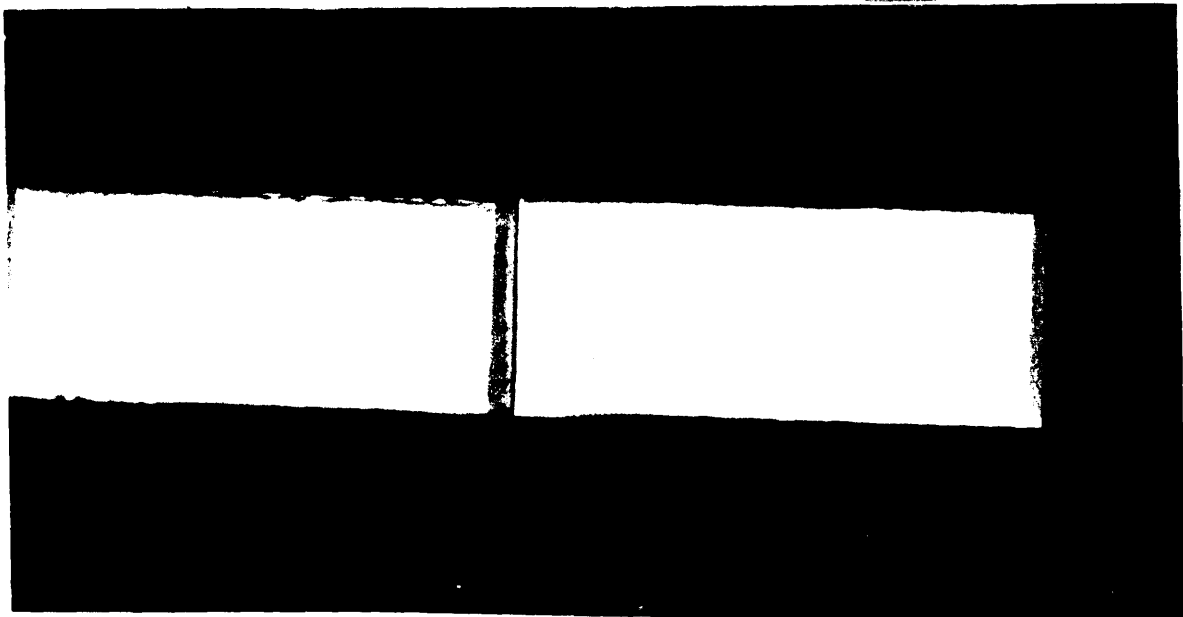
B2

Fotos-8.3 y 8.4 Detalle de las probetas de los materiales ensayados A1, B1, A2, B2, después de 1000 h de envejecimiento.



A3

B3



A4

B4

Fotos-8.5 y 8.6 Detalle de las probetas de los materiales ensayados, A3, B3, A4, B4, después de 1000 h de envejecimiento.

Sin embargo, aunque en la resistencia a la abrasión juega un papel importante la absorción de radiación UV, es mucho más importante el papel jugado por el "caleo". Así, a pesar de que en las probetas que contienen dióxido de titanio toda esta radiación es absorbida por el pigmento, la pérdida de masa es muy diferente según se trate de su variedad, rutilo o anatasa.

II. Cambio de color.

Los resultados del estudio de la evolución del color (medido a través del factor de luminancia y de las coordenadas cromáticas) se han anotado en las tablas-8.11 y 8.12.

Tabla-8.11 Factor de luminancia del material ensayado, antes y después del envejecimiento.

CARACTERISTICA	MATERIAL							
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Factor de luminancia inicial MELC - 12,97	0,79	0,78	0,72	0,48	0,79	0,80	0,71	0,58
Factor de luminancia (1000 h.) MELC - 12,97	0,62	0,34	0,60	0,58	0,69	0,55	0,67	0,62

Tabla-8.12 Coordenadas cromáticas del material ensayado, antes y después del envejecimiento.

CARACTERISTICA	MATERIAL															
	A1		A2		A3		A4		B1		B2		B3		B4	
Coordenadas cromáticas iniciales. MELC - 12,79	✕		✕		○		□		◇		●		+		△	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	0,321	0,339	0,322	0,341	0,323	0,343	0,330	0,350	0,324	0,342	0,324	0,341	0,329	0,349	0,336	0,356
Coordenadas cromáticas 1000 h. MELC - 12,79	✕		✕		⊗		⊗		◇		●		±		Δ	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	0,334	0,342	0,366	0,390	0,334	0,340	0,322	0,329	0,323	0,329	0,361	0,385	0,322	0,330	0,321	0,328

Se pone de manifiesto que el factor de luminancia inicial en los materiales plásticos depende directamente de la blancura de las cargas y pigmentos empleados en su formulación. Así, los valores más elevados se obtienen cuando se añade dióxido de titanio, no observándose diferencia entre sus dos formas cristalinas.

Cuando se adiciona dióxido de titanio, el valor del factor de luminancia inicial es independiente de la naturaleza del resto de las cargas añadidas.

A medida que aumenta el valor de la abrasión provocada por la radiación UV, el valor final del factor de luminancia es más elevado, como consecuencia de la "autolimpieza" (caleo) de la superficie de la probeta.

Las cargas que absorben gran cantidad de UV y no "calean" son las que conducen a la máxima disminución del valor del factor de luminancia. Así, aunque el efecto de "caleo" conduce a una mayor pérdida de masa, mejora la estabilidad del color del material (Fotografías-8.3, 8.4, 8.5 y 8.6).

En las figuras-8.17 y 8.18, por su parte, se han representado dichos valores, tomando como referencia los polígonos de color definidos para antes y después de envejecer, de acuerdo con la última recomendación dada al respecto por el Centro de Estudios y de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

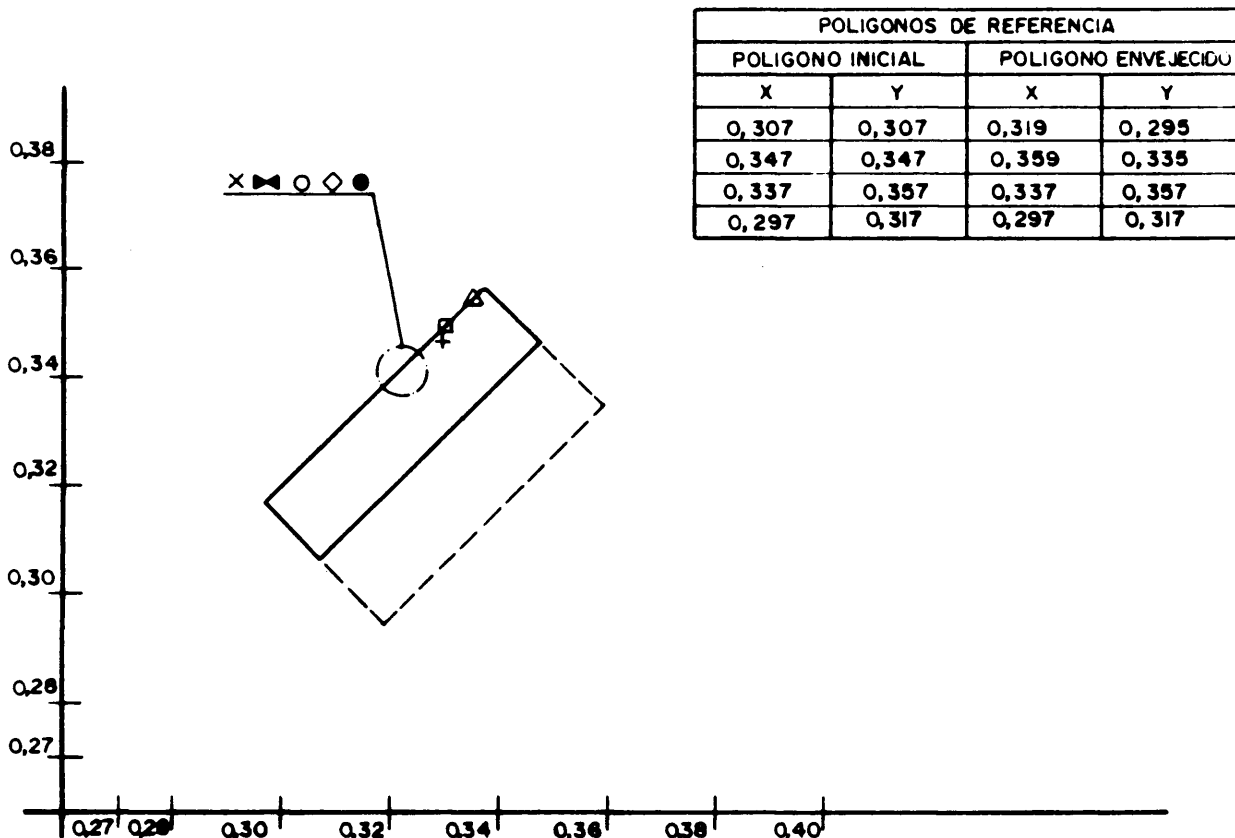


Fig.8.17 representación cartesiana del valor de las coordenadas cromáticas iniciales de los materiales ensayados.

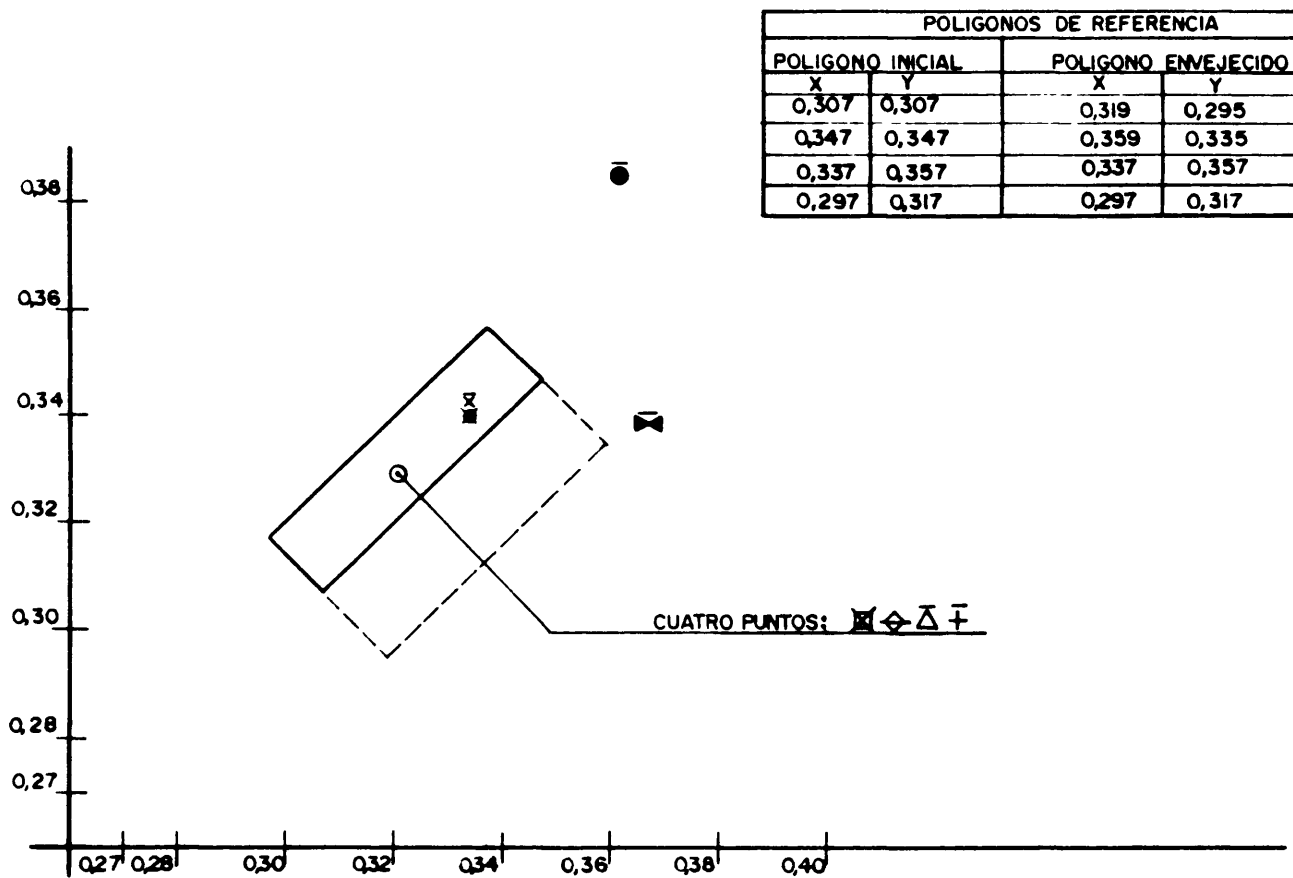


Fig.8.18 Representación cartesiana del valor de las coordenadas cromáticas de los materiales ensayados después de 1000 h de envejecimiento.

Inicialmente, todos los materiales, a pesar de poseer valores diferentes del factor de luminancia, se sitúan dentro del polígono de referencia, agrupándose de acuerdo con su valor del factor de luminancia.

Una vez envejecidas las probetas, el peor comportamiento, corresponde a aquellos materiales formulados con pigmentos y cargas que absorben gran cantidad de radiación UV y con muy poca tendencia al "caleo"; en éstas, tiene lugar un cambio de color superficial, tendiendo a tonos verdosos (fotografía-8.4). Por el contrario, cuando las cargas y pigmentos, independientemente de la cantidad de radiación UV que absorban, presentan "caleo" una vez envejecidas, sus coordenadas cromáticas se sitúan en el interior del polígono inicial, por lo que la radiación UV no tiene efecto alguno en el color (fotografía-8.3).

Así, se escogió la siguiente formulación para éste tipo de materiales:

LIGANTE.....20%

CARGAS Y PIGMENTOS

Cristobalita.....30%

Sulfato de bario.....5%

Carbonato cálcico.....14%

Rutilo (TiO_2).....4%

Anatasa(TiO_2).....2%

MICROESFERAS DE VIDRIO.....25%

SEGUNDA ETAPA

En esta fase del trabajo se trató de obtener información a cerca del curado de los plásticos en frío de dos componentes, a partir de la dosificación del agente iniciador y de la cantidad naturaleza del acelerante, a diferentes temperaturas; de esta forma pudo disponerse de una guía práctica que permitió en el momento de la aplicación y dependiendo de la temperatura ambiente, seleccionar el mejor sistema "iniciador-acelerante".

Los parámetros del ensayo para poder cumplir con los objetivos previstos, fueron el tiempo de gel y el tiempo de curado necesario, para obtener en la superficie del material una dureza "Persoz" de 40, 60, 80, 90 y 100 s.

Se utilizaron para el estudio de esta fase del trabajo los siguientes materiales:

- **Resina**, terpolímero de metacrilato.
(MMA/BMA/HMA)
- **Iniciador**, Peróxido de benzoilo plastificado al 50% con ftalato de dicitclohexilo.
- **Acelerantes**,
 - N,N-dimetilanilina (NL 63-100)
 - N,N-dietilanilina
 - N,N-dimetil-p-toluidina (NL 65-100)
 - N,N-dihidróxi-etil-p-toluidina (EPT)
 - N,N-dihidróxi-propil-p-toluidina (PPT)

El seguimiento del proceso se realizó a través de las dos propiedades que dominan el proceso de reticulación de éstos materiales, el "tiempo de gel" y la dureza superficial.

Para la interpretación de los resultados obtenidos se tomó como valor patrón el de una superficie de material reticulado en condiciones estándar de temperatura y de humedad ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $45 \pm 5\%$, respectivamente).

Al objeto de determinar las propiedades de la mezcla estándar se realizaron pruebas preliminares de laboratorio, utilizando resina pura, con el fin de seleccionar posteriormente los distintos sistemas de curado tanto en composición como en calidad.

Como acelerantes se utilizaron, en este caso, los siguientes compuestos en disolución al 10% en estireno:

- N,N-dimetilanilina (NL 63-100)
- N,N-dietilanilina
- N,N-dimetil-p-toluidina (NL 65-100)

En la tabla-8.13 se han recogido los valores del tiempo de gel de las diferentes mezclas acelerante/iniciador ensayadas.

Tabla-8.13 Tiempo de gel a 20°C con los distintos sistemas preliminares de curado seleccionados.

COMPONENTES	PROPORCION DE MEZCLA con 100 partes de ligante reactivo: MMA / BMA / HMA						
	Peróxido de benzolito	2	2	2	2	2	2
N,N-Dimetil-p-toluidina (NL 65-100)	1			0,5			
N,N-dimetilanilina (NL 63-100)		1				2	1
N,N-dietilanilina			1		6,5		
Pot-Life a 20 °C (min.)	6	25	190	23	25	17	15

A la vista de los resultados puede indicarse que el tiempo de gel está condicionado por la proporción de peróxido / acelerante, utilizada, así como por la naturaleza del propio acelerante.

Sin embargo, la "velocidad de curado" del material, una vez ocurrida la gelificación, resulta independiente del tipo de acelerante utilizado.

A efectos del estudio del proceso de curado se procedió a continuación, basándose en los resultados preliminares, a determinar el tiempo de gel correspondiente a las diferentes mezclas seleccionadas, a una temperatura de 20°C.

Como criterio para la determinación de los tiempos de gelificación se tomó, como variable característica, el tiempo transcurrido hasta que la consistencia aumenta en un 10% con respecto al valor inicial.

Los resultados obtenidos se recogen en la tabla-8.14.

Tabla-8.14 Tiempo de gel de los distintos sistemas de curado seleccionados a 20°C.

SISTEMA DE CURADO: Peróxido/Acelerante Cantidades en % en peso referidas a resina	TIPO DE ACELERANTE			
	N,N-Dihidroxietil-p-toludina (EPT)	N,N-Dihidroxipropil-p-toludina (PPT)	N,N-Dimetil-p-toludina (NL 65-100)	N,N-Dimetilamina (NL 63-100)
1 / 0,2	54	60	57	
1 / 0,4	26	35	33	
1 / 1	15	20	19	90
2 / 0,2	33	35	36	
2 / 0,4	19	21	22	
2 / 1	11	13	13	48
4 / 0,2	20	21	23	
4 / 0,4	13	15	14	
4 / 1	8	10	9	32

Si se clasifican los acelerantes por orden de eficacia se obtiene:

EPT > NL 65-100 ≅ PPT >> NL 63-100

Se observa que el sistema a base de NL 63-100, no interesa, ya que sus dosis de empleo para conseguir un mismo tiempo de gel, es unas diez veces superior a las de los otros dos; ésta situación, conduce, de forma inevitable, al amarilleamiento del material polimerizado como consecuencia del exceso de amina libre en la mezcla.

A 200C, los tiempos de gel se situarían entre 10 y 20 minutos para no alargar excesivamente el tiempo de reticulación. En la tabla-8.15 se presentan las mejores mezclas desde este punto de vista.

Tabla-8.15 Sistemas óptimos de curado para un tiempo de gel comprendido entre 10 y 20 min.

TIEMPO DE GEL	TIPO DE SISTEMA DE CURADO		
10 min. - 15 min.	PEROXIDO / PPT 4 / 1	PEROXIDO / EPT 2 / 1	PEROXIDO / NL 65-100 4 / 1
	PEROXIDO / PPT 2 / 1	PEROXIDO / EPT 4 / 0,4	PEROXIDO / NL 65-100 4 / 0,4
	PEROXIDO / PPT 4 / 0,4	PEROXIDO / EPT 1 / 1	
15 min - 20 min	PEROXIDO / PPT 1 / 1	PEROXIDO / EPT 2 / 0,4	PEROXIDO / NL 65-100 1 / 1
		PEROXIDO / EPT 4 / 0,2	

Para una temperatura de polimerización dada, el tiempo de gel del sistema puede alterarse de la siguiente manera:

- Para una cantidad fija de peróxido, variando la cantidad de acelerante.
- Para una cantidad fija de acelerante, variando la cantidad de peróxido.
- Para una cantidad de peróxido, escogiendo el acelerante más reactivo o menos reactivo, según el riesgo de amarilleamiento que aparezca en el producto final.

Con el fin de evitar éste riesgo, se hace necesario por un lado, ir a la menor cantidad posible de amina libre y, por otro, dado que el peróxido de benzoilo está plastificado al 50%, no abusar de éste agente iniciador.

Así, y de acuerdo con el valor del tiempo de gel escogido, son recomendables los siguientes sistemas de curado (tabla-8.15):

-Para un tiempo de gel entre 10 y 15 min,

PEROXIDO/EPT: 1/1

-Para un tiempo de gel entre 15 y 20 min,

PEROXIDO/PPT: 1/1 o PEROXIDO/NL 65-100: 1/1

Se concluye, que los sistemas más eficaces en cuanto a su comportamiento, durante y después de la aplicación, son aquéllos que siguen la relación **peróxido/acelerante 1/1**, sustituyendo el tipo de acelerante, según el tiempo de gel requerido para cada temperatura de polimerización dada.

Para comprobar la evolución de la dureza superficial de estos materiales una vez reticulados se eligió el sistema de curado más efectivo, **peróxido/EPT**, utilizándolo en las diferentes proporciones que se han expresado en la tabla-8.14 y, comparándolo, por último, con un sistema de curado que proporcione, a esa temperatura, un tiempo de gel de 15 min (**peróxido/EPT 4/0.4**).

En la figura-8.19 puede observarse la evolución de la dureza "Persoz" según la relación del sistema **peróxido/EPT** utilizada comparándose con la obtenida, a partir del sistema **peróxido/PPT** apropiado, para conseguir el mismo valor de tiempo de gel.

Se toma, para éste, como referencia, 15 min ya que se considera éste tiempo como el óptimo para la puesta en obra del material.

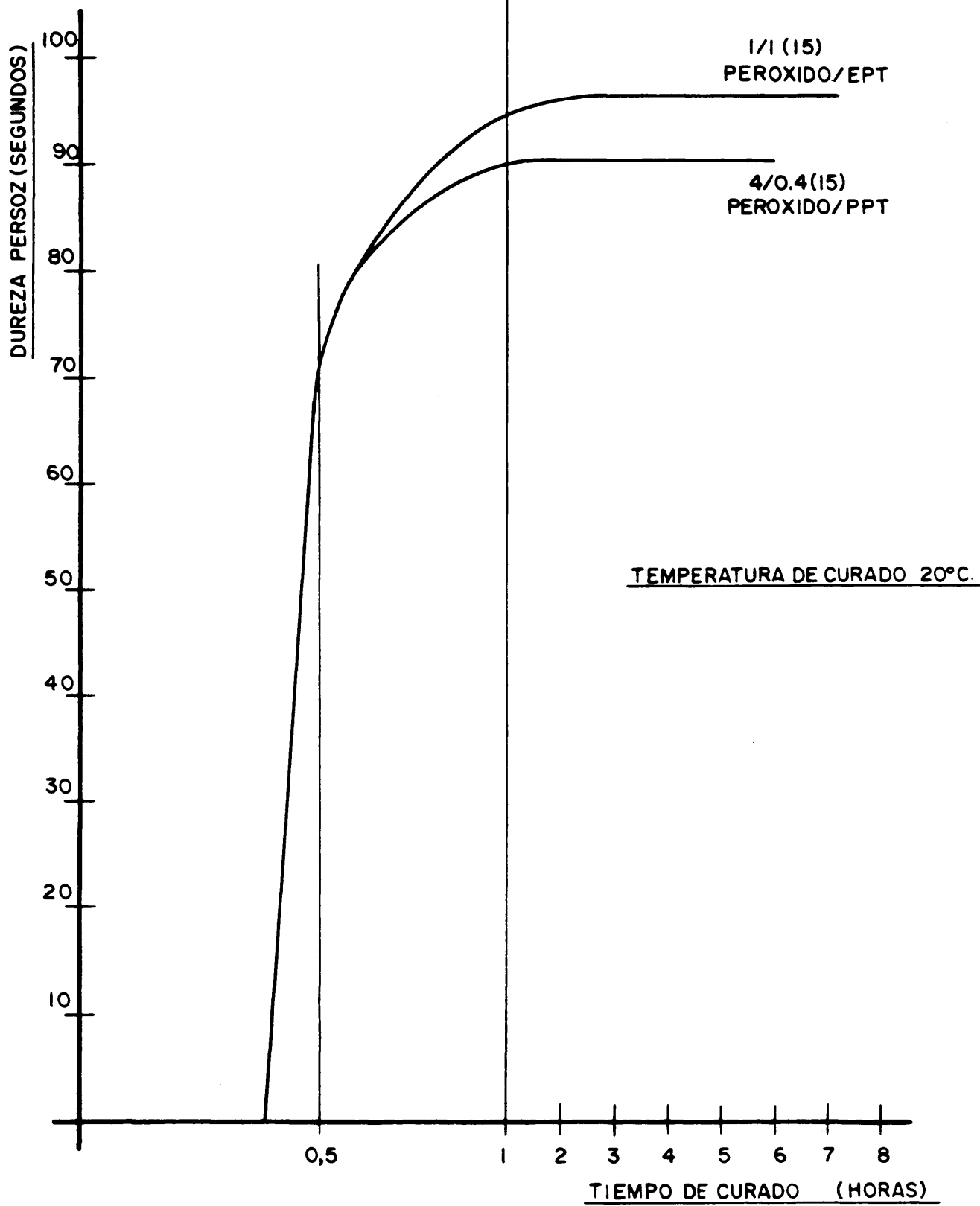


Fig.8.19 Variación de la dureza "Persoz" con el tiempo para distintos sistemas de curado. Tiempo de gel: 15 min.

Por su parte en las figuras-8.20 y 8.21 puede observarse la evolución de la dureza "Persoz" para el sistema de curado peróxido/EPT cuando se varía la cantidad de peróxido y EPT, permaneciendo fijo el otro, respectivamente.

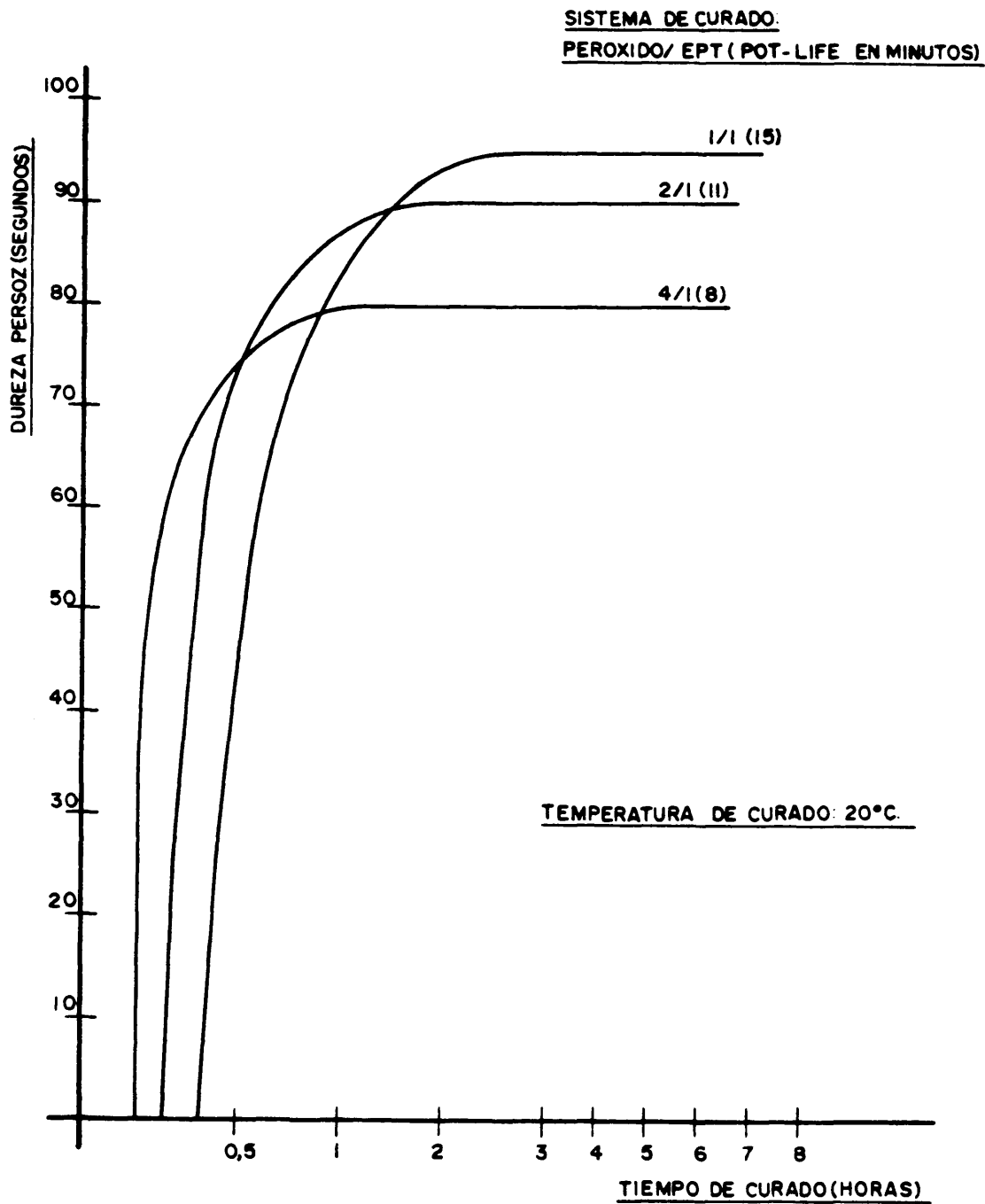


Fig.8.20 Dureza "Persoz" para el sistema peróxido/EPT con distintas cantidades de peróxido.

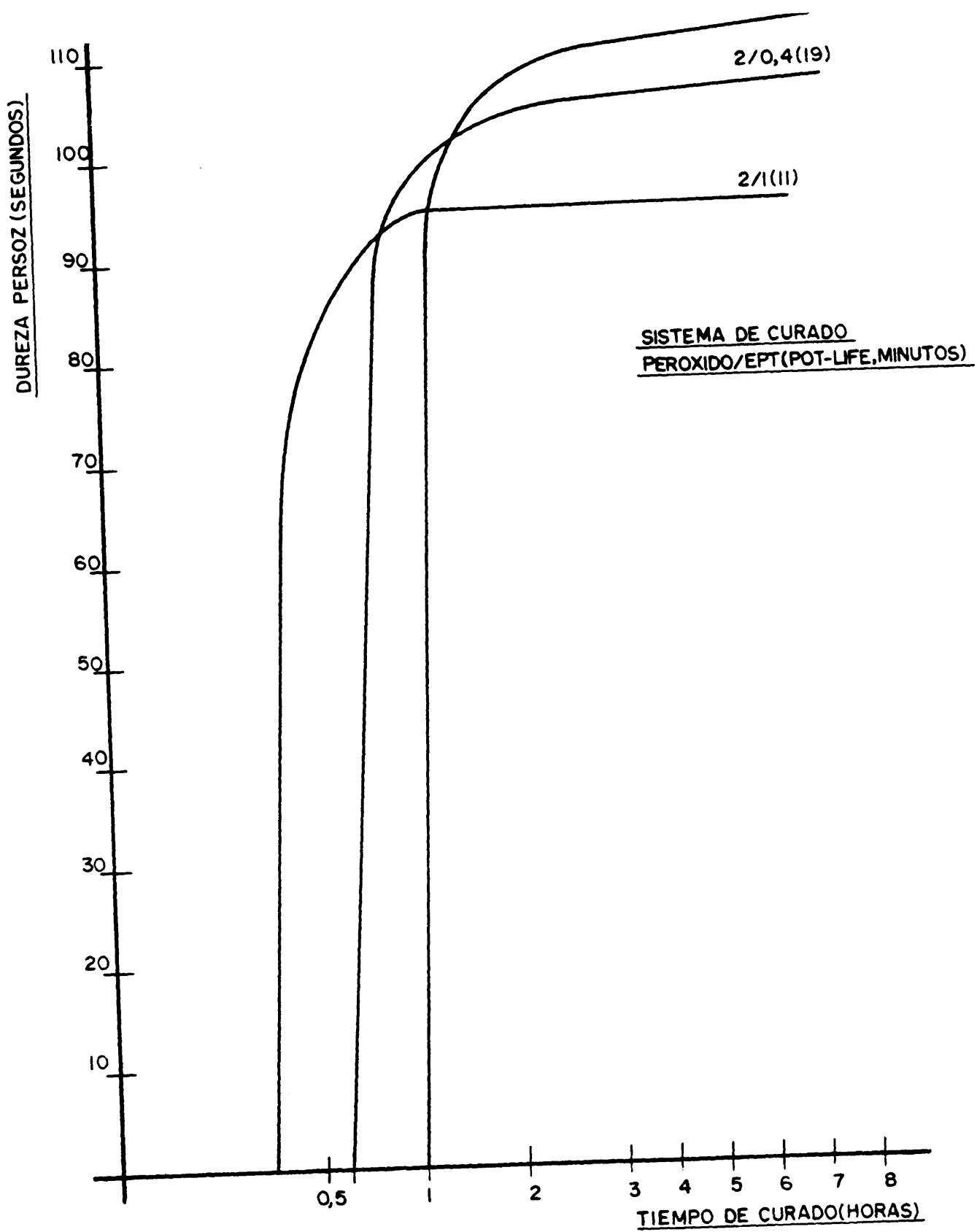


Fig.8.21 Dureza "Persoz" para el sistema peróxido/EPT con diferentes cantidades de EPT.

En base a todo lo expuesto anteriormente puede indicarse que para un tiempo de gel dado (15 min) y a una temperatura de polimerización estándar (20°C), para cualquier combinación del sistema de curado, durante los primeros treinta minutos el material evoluciona de la misma forma en cuanto a dureza superficial se refiere.

A partir de 60 min es cuando el material comienza a comportarse de forma diferente, pudiendo variar el valor final de dureza "Persoz" desde 85 hasta 100 segundos.

A partir de la primera hora es cuando el material alcanza el valor máximo de dureza el cual, ya no sufre variación alguna.

Para un sistema de curado escogido, peróxido/EPT, y manteniendo constante la cantidad de acelerante, el aumento del peróxido conduce a la disminución del valor del tiempo de gel y del tiempo necesario para obtener un valor máximo de dureza "Persoz" de 70 segundos.

A pesar de obtener, rápidamente, una dureza superficial elevada el valor final disminuye al aumentar la cantidad de peróxido en la mezcla.

Para una cantidad fija de acelerante en el sistema de reticulación el tiempo necesario para adquirir un valor determinado de dureza "Persoz", así como el valor final de la misma, son inversamente proporcionales a la cantidad de peróxido que posea el sistema de curado.

Para un sistema de curado escogido, peróxido/EPT, manteniendo fija la cantidad de peróxido, el aumento de acelerante, para una temperatura de reticulación de 20°C, conduce por una parte a acortar el tiempo de gel, y por otra a la variación del tiempo necesario para adquirir un valor determinado de dureza "Persoz", y del valor final de la misma.

En las figuras-8.22 y 8.23 se han representado los resultados relativos a la determinación de la variación de la dureza "Persoz", a temperatura de reticulación de 20°C, para una mezcla fija del sistema endurecedor y un tiempo de gel definido.

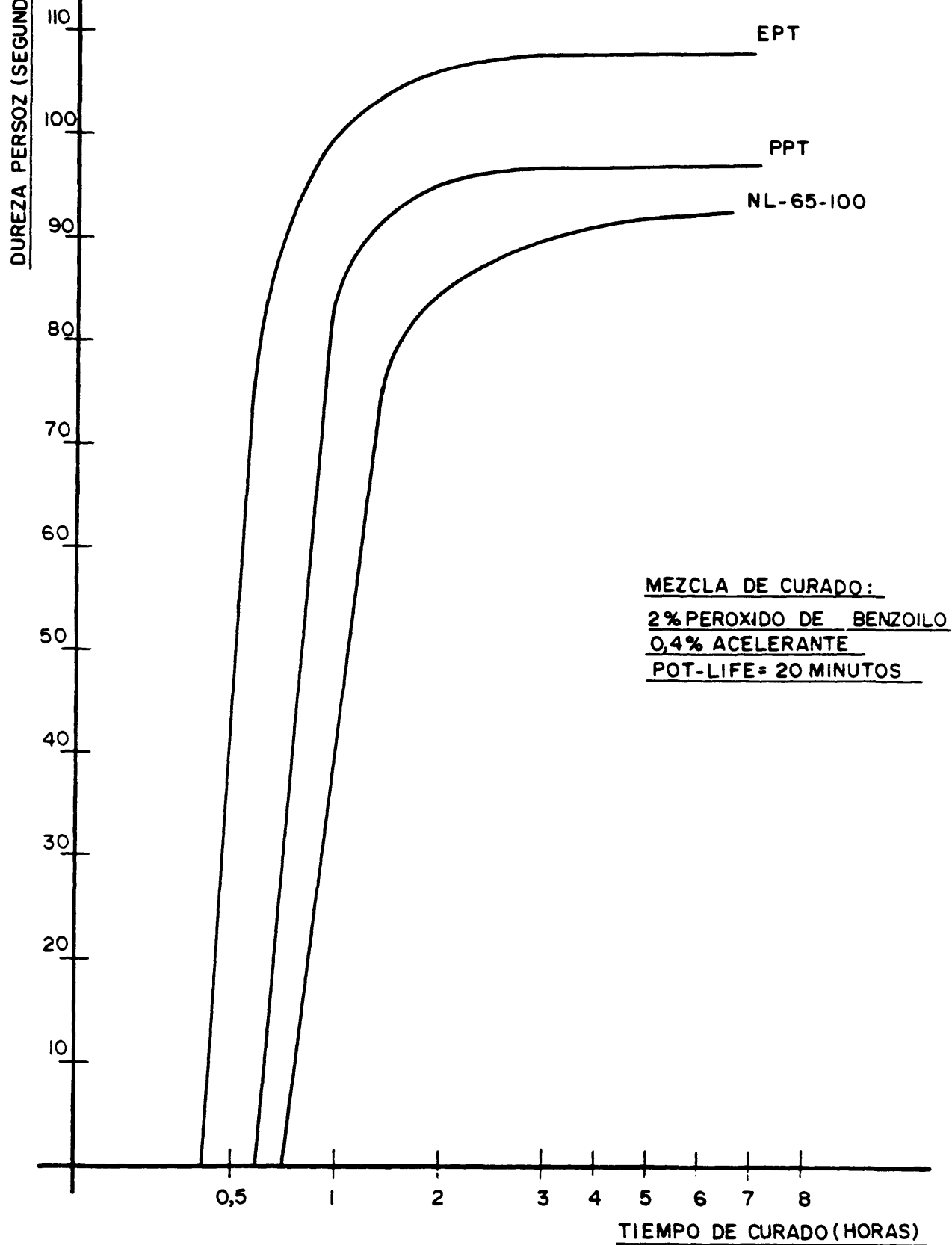
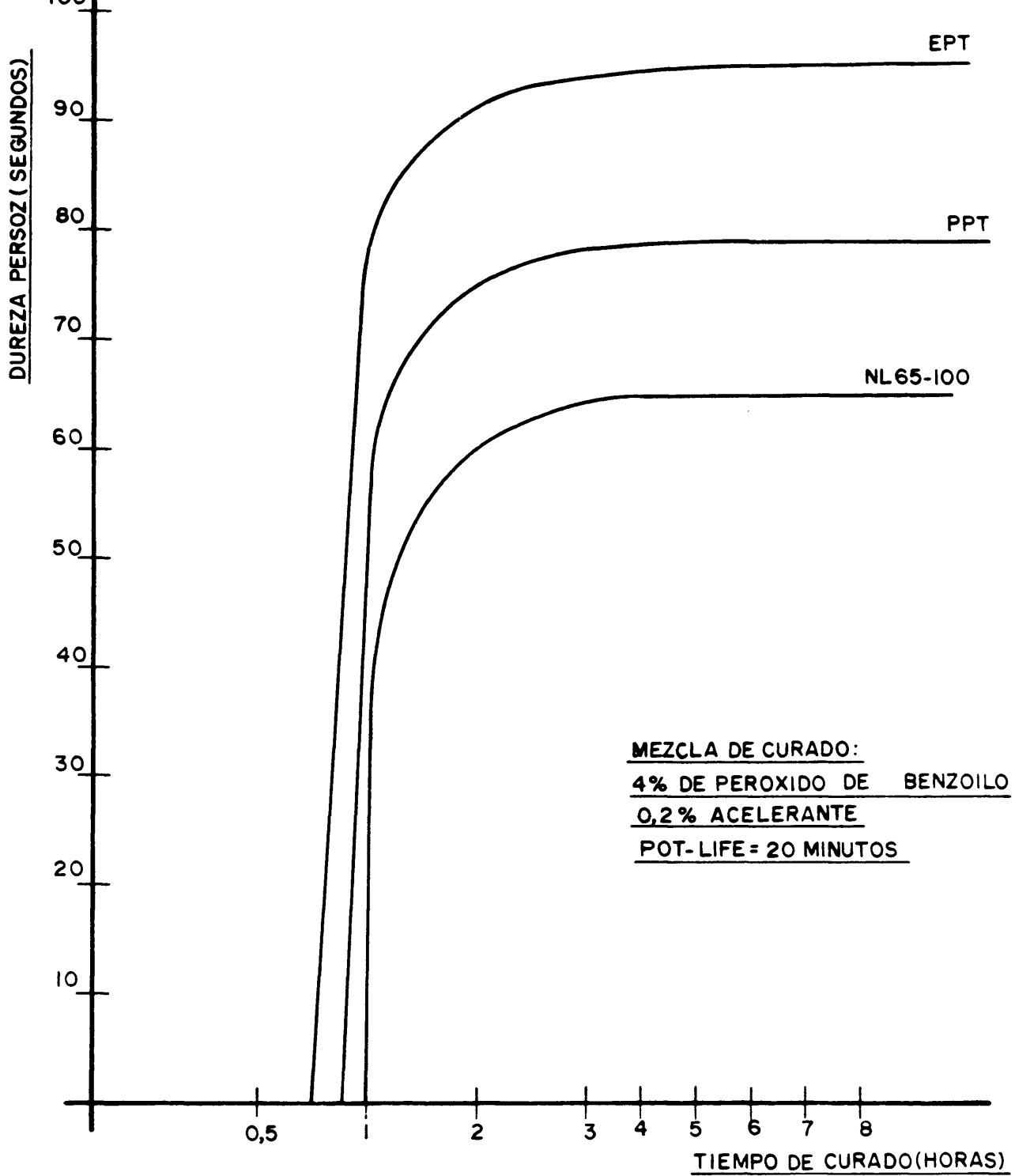


Fig.8.22 Dureza "Persoz" con distintos tipos de acelerantes para una mezcla de reticulación y tiempo de gel fijos.



TEMPERATURA DE POLIMERIZACION = 20°C.

Fig. 8.23 Dureza "Persoz" con distintos tipos de acelerantes para una mezcla de reticulación y tiempos de gel fijos.

A la vista de estos resultados se deduce que aunque la variación de la dureza superficial sigue, en ambos casos, la misma tendencia ésta disminuye, siempre, al hacerlo la cantidad de acelerante, aunque se haya aumentado la de peróxido con el fin de mantener el tiempo de gel.

De los acelerantes estudiados, el más efectivo es el EPT ya que, independientemente de la proporción de la mezcla de curado escogida, este es el que da lugar, en cada caso, a la dureza superficial más elevada.

En lo que se refiere a la determinación de la dureza "Persoz" con distintas mezclas de sistema de curado, utilizando siempre el mismo acelerante, para un tiempo de gel dado y a diferentes temperaturas de polimerización se utilizaron diferentes mezclas del sistema antes citado, determinándose la dureza "Persoz" y el tiempo de gel a tres temperaturas de polimerización, 10, 20 y 30°C.

Por último, se escogió como tiempo de gel para el ensayo, 30 min, para así poder obtener valores de dureza a diferentes temperaturas.

En la tabla-8.16, se recogen los resultados obtenidos.

Como puede observarse a medida que disminuye la temperatura de polimerización la cantidad de peróxido y acelerante necesario para mantener el tiempo de gel aumenta, mientras que el grado final de reticulación disminuye.

Durante la primera hora de polimerización, la dureza "Persoz" alcanza un valor final semejante en todos los casos independientemente de las proporciones de mezcla de secado escogidas y de la temperatura de curado.

El aumento de la temperatura de polimerización, se traduce en que la cantidad de peróxido y acelerante necesarias para mantener fijo el tiempo de gel disminuyen, mientras que el valor de la dureza "Persoz" permanece prácticamente inalterable.

Por último, la dureza "Persoz" de un sistema que está reticulando es mucho más sensible a temperaturas bajas de polimerización. Así, los cambios que experimenta la dureza entre 20 y 30°C son prácticamente inexistentes, al contrario de lo que ocurre cuando la reticulación tiene lugar a 10°C en vez de a 20°C.

Tabla-8.16 Dureza "Persoz", para diferentes cantidades de mezcla del sistema peróxido/EPT a diferentes temperaturas.

COMPONENTES	PROPORCION DE LA MEZCLA DE CURADO QUE REACCIONA CON 100 partes de ligante reactivo: MMA / BMA / HMA				
	Peróxido de Benzilo	4	2	1	2
N,N-Dihidróxietyl-p-toluidina (E P T)	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2
CARACTERISTICA					
Temperatura de curado (°C)	10	20	20	30	30
Tiempo transcurrido (horas)	DUREZA "PERSOZ" (SEGUNDOS)				
1	70	75	85	65	70
1,5	85	105	105	105	100
2	85	110	110	110	110
24		110	110	105	105

De acuerdo con los resultados obtenidos, las condiciones óptimas para la reticulación, son las siguientes:

- Temperatura de aplicación, entre 15 y 30°C.
- Sistema de curado:

Peróxido de benzoilo/N,N-dihidróxietyl-p-toluidina: 1/1, referido a ligante reactivo.

De acuerdo con el procedimiento operatorio expuesto, se seleccionaron los materiales cuyas propiedades más representativas se recogen en la tabla-8.17.

Tabla-8.17 Prescripciones técnicas de los materiales seleccionados.

TIPO DE MATERIAL BASE	CARACTERISTICA								
	Tiempo de Secado "no pick-up" MELC - 12,71	Resistencia al sangrado MELC - 12,64	Poder Cubriente MELC - 12,64	Factor de Luminancia MELC - 12,97	Resistencia a la Abrasión MELC - 12,130	Densidad relativa MELC - 12,72 MELC - 12,132	Punto de Reblandecimiento MELC - 12,128	Estabilidad al Calor MELC - 12,129	Resistencia al flujo MELC - 12,131
Alcídica	19 min.	8	0,98	0,87	0,30 g	1,43	-	-	-
Acrílica	6 min.	8	0,98	0,90	0,25 g	1,39	-	-	-
Termoplástico en caliente	<45 s.	8	-	0,81	0,37 g	1,98	98 °C	≤0,01 de variación	≤0,34% de variación
Plástico en dos Componentes	<45 min. a 20 °C	8	-	0,81	0,36 g	2,05	-	-	-

8.2 ENSAYOS DE CAMPO.

8.2.1. CONTROL DE LA APLICACION.

Los materiales estudiados se aplicaron sobre firmes bituminoso y rígido controlándose, en ambos casos, la dosificación del material base y de microesferas de vidrio.

Las condiciones de curado de los materiales fueron las siguientes:

- Sobre pavimento bituminoso, humedad relativa del aire: $58 \pm 2\%$; temperatura ambiente: $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

- Sobre firme rígido, humedad relativa del aire: $65 \pm 5\%$; temperatura ambiente: $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Las dosificaciones del material así como el tiempo de apertura al tráfico, sobre cada tipo de pavimento, se recogen en las tablas-8.18 y 8.19.

Tabla-8.18 Dosificaciones y tiempos de curado de los materiales aplicados sobre pavimento bituminoso.

DOSIFICACION (g/m ²) MELC - 12,122	TIPO DE MATERIAL BASE		
	Alcídico AL	Acrílico ACR	Termoplástico en Caliente, SP
Microesferas de Vidrio	413	393	525
Material Base	647	779	2935
Tiempo de apertura al tráfico (min.)	60	45	5

Tabla-8.19 Dosificaciones y tiempos de curado de los materiales aplicados sobre firme rígido.

DOSIFICACION (g/m ²) MELC - 12,122	TIPO DE MATERIAL BASE			
	Alcídico AL	Acrílico ACR	Termoplástico en Caliente, SP	Plástico en frío de dos componentes DC
Microesferas de Vidrio	325	605	500	650
Material Base	750	905	2440	2000
Tiempo de apertura al tráfico (min.)	70	45	3	25

8.2.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CAMPO.

Los valores de las propiedades ópticas obtenidos para cada material estudiado, sobre cada tipo de pavimento, se recogen en las tablas-8.20 a 8.23.

Tabla-8.20 Evolución de la retroreflexión de los materiales estudiados (mcd/lux.m²), sobre pavimento bituminoso, con el tiempo.

TIPO DE MATERIAL BASE	INTERVALO DE MEDIDA (MESES)					
	0	3	6	12	15	18
Alcídico AL	427	338	313	309	231	181
Acrílico ACR	464	333	302	312	238	222
Termoplástico en Caliente SP	283	317	369	280	250	220

Tabla-8.21 Evolución del factor de luminancia de los materiales ensayados, sobre pavimento bituminoso, con el tiempo.

TIPO DE MATERIAL BASE	INTERVALO DE MEDIDA (MESES)					
	0	3	6	12	15	18
Alcídico AL	0,60	0,40	0,35	0,33	0,30	0,29
Acrílico ACR	0,65	0,45	0,40	0,38	0,34	0,34
Termoplástico en Caliente SP	0,63	0,40	0,29	0,36	0,34	0,33

Tabla-8.22 Evolución de la retrorreflexión de los materiales estudiados (mcd/lux.m²), sobre firme rígido, con el tiempo.

TIPO DE MATERIAL BASE	INTERVALO DE MEDIDA (MESES)					
	0	3	6	12	15	18
Alcídico AL	448	271	251	129	124	112
Acrílico ACR	600	461	412	262	250	226
Termoplástico en Caliente SP	360	327	337	132	105	86
Plástico en frío de dos componentes DC	310	346	333	230	242	214

Tabla-8.23 Evolución del factor de luminancia de los materiales estudiados, sobre firme rígido, con el tiempo.

TIPO DE MATERIAL BASE	INTERVALO DE MEDIDA (MESES)					
	0	3	6	12	15	18
Alcídico AL	0,59	0,24	0,31	0,30	0,29	0,32
Acrílico ACR	0,63	0,37	0,38	0,37	0,37	0,38
Termoplástico en Caliente SP	0,75	0,52	0,45	0,46	0,52	0,61
Plástico en frío de dos componentes DC	0,50	0,34	0,36	0,33	0,22	0,32

8.2.3. INTERPRETACION Y DISCUSION.

la interpretación de los resultados obtenidos y su discusión, se llevó a cabo para cada tipo de pavimento por separado, analizando cómo varía cada propiedad óptica estudiada para posteriormente comparar, por materiales, la influencia que sobre ellos ejerce el tipo de firme. Por último se analizó la variación del factor de luminancia en función de la retrorreflexión, para cada material seleccionado, en cada tipo de pavimento.

I. SOBRE PAVIMENTO FLEXIBLE.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.24 se ha representado la variación de la retrorreflexión para cada material ensayado, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

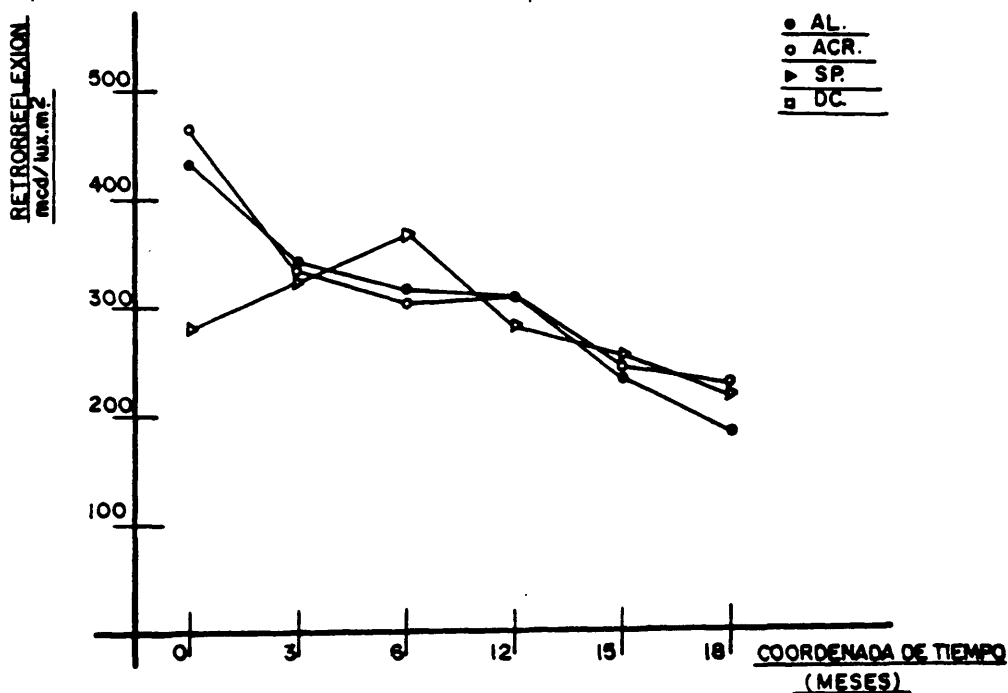


Fig.8.24 Variación de la retrorreflexión, sobre pavimento flexible, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

Como puede observarse, los dos materiales convencionales siguen la misma variación, mientras que el termoplástico se comporta de forma muy diferente.

Los valores iniciales de retrorreflexión en las pinturas convencionales son mucho más elevados que en el material de larga duración, SP.

En las pinturas convencionales, AL y ACR, durante los primeros seis meses, la retrorreflexión va disminuyendo hasta alcanzar un valor mínimo, alrededor de las 300 mcd/lux.m², consecuencia de la abrasión que tiene lugar por la acción del tráfico; dicha abrasión, "arranca" las microesferas más gruesas añadidas por postmezclado, por lo que la visibilidad diurna va disminuyendo.

A partir del sexto mes, y como consecuencia de la abrasión que tiene lugar sobre la película seca del material, empiezan a aflorar las esferas más finas situadas en el interior de la película que, junto con las más gruesas que aún permanecen, dan lugar a un aumento de retrorreflexión durante el medio año restante. A partir de este momento la retrorreflexión disminuye progresivamente dependiendo de la cantidad de ligante que exista en el material, ya que las esferas que permanecen se desligarán con mayor o menor facilidad según sea el contenido en vehículo fijo del material e independientemente de la naturaleza de la pintura convencional.

Sea cual sea la naturaleza del ligante utilizado en las pinturas convencionales, ACR y AL, el valor inicial de retrorreflexión dependerá, directamente, de la cantidad (gr/m²) de microesferas de vidrio añadidas por postmezclado. Por otro lado, el valor final de ésta será mayor cuanto más elevado sea el contenido en ligante que tenga el material, independientemente de su naturaleza.

En los materiales termoplásticos de aplicación en caliente, a diferencia de las pinturas convencionales, la retrorreflexión crece durante los seis primeros meses, alcanzando, al cabo de este período, su valor máximo (más de 350 mcd/lux.m²). Esto puede deberse por un lado, a las microesferas de postmezclado y, por otro, a las de premezclado que empiezan a aflorar por la acción del desgaste producido por el tráfico, sumándose a las iniciales aún existentes.

A partir de éstos seis meses, la retrorreflexión disminuye progresivamente, aunque no tan bruscamente como en las pinturas convencionales.

Así, las diferencias entre los valores máximo y mínimo

son de 250 y 125 mcd/lux.m², para pintura convencional y termoplástico de aplicación en caliente, respectivamente.

Para el mismo periodo de tiempo, se demuestra que la pérdida de retroreflexión es doble en las pinturas convencionales que en el termoplástico de aplicación en caliente.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.25 se ha representado la variación del factor de luminancia, para cada material ensayado, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

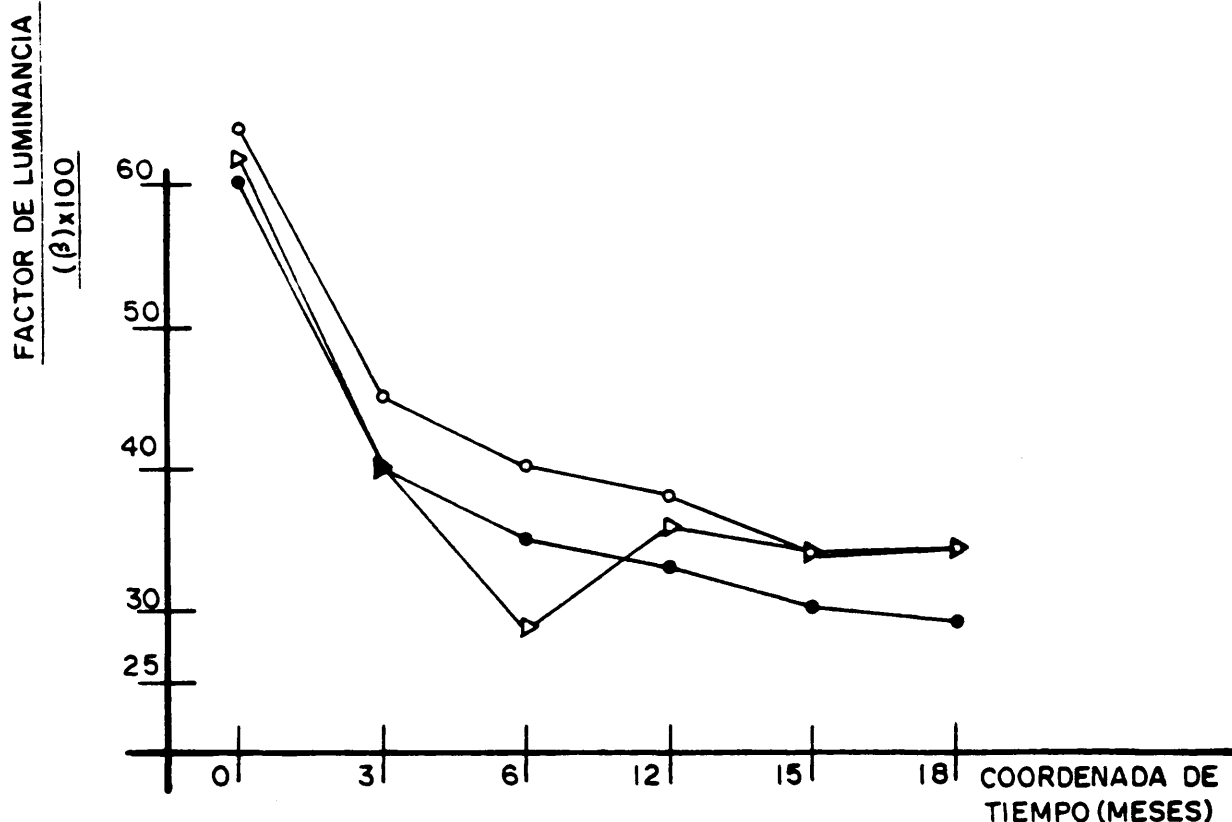


Fig.8.25 Variación del factor de luminancia, sobre pavimento flexible, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

Como puede observarse las pinturas convencionales, ACR y AL, siguen la misma ley en su variación del factor de luminancia mientras que el termoplástico de aplicación en caliente, sigue una ley de variación completamente diferente.

En los tres tipos de materiales, ACR, AL y SP, tanto los valores iniciales como finales coinciden, si bien los de referencia "AL" son los que presentan peor valor final.

El valor del factor de luminancia en pinturas convencionales es independiente de la climatología no beneficiándose, de forma apreciable, de la posibilidad de limpieza que tiene lugar en época de lluvia.

El valor del factor de luminancia en los materiales termoplásticos de aplicación en caliente es muy sensible a la estación del año en que se realice la medida. Así, durante los seis primeros meses, a medida que la temperatura iba en aumento el valor del factor de luminancia disminuía como consecuencia de la termoplasticidad del material que daba lugar a una superficie muy pegajosa.

Al cabo de ese periodo inicial y coincidiendo con la llegada del invierno, el material pierde pegajosidad superficial mejorando mucho el valor del factor de luminancia. Esto podía deberse a la limpieza producida en la superficie del material que además, cerraba los huecos (cubiertos de suciedad) que habían dejado las microesferas de vidrio arrancadas por el tráfico.

Todos los materiales alcanzan, al cabo del año, un valor del factor de luminancia que se mantiene entorno a un intervalo durante toda la vida útil de los mismos. Dicho intervalo posee el mismo radio en todos los materiales variando el valor de su centro según el tipo de material.

-AL, 0.31 ± 0.02 (valor entre los 12 y 18 meses).

-ACR, 0.36 ± 0.02 (" " ").

-SP, 0.34 ± 0.02 (" " ").

Como puede observarse los materiales estudiados pueden clasificarse, atendiendo a la variación del valor de su factor de luminancia, de mejor a peor comportamiento en, ACR > SP > AL.

Aunque siguiendo leyes diferentes, la disminución del valor del factor de luminancia es, en términos absolutos, prácticamente igual en todos los materiales.

$$AL, \Delta\beta \sim 0.30.$$

$$ACR, \Delta\beta \sim 0.30.$$

$$SP, \Delta\beta \sim 0.30.$$

Por lo tanto y con el fin de poder obtener un valor final elevado ($\beta > 0.30$), el valor inicial del factor de luminancia deberá ser lo más elevado posible ($\beta > 0.60$).

Desde el punto de vista de calidad (valores más elevados de las propiedades ópticas durante los 18 meses) los materiales estudiados pueden clasificarse, de mejor a peor, en: ACR > SP > AL.

II. SOBRE FIRME RIGIDO.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.26 se ha representado la variación de la retrorreflexión para cada material ensayado, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

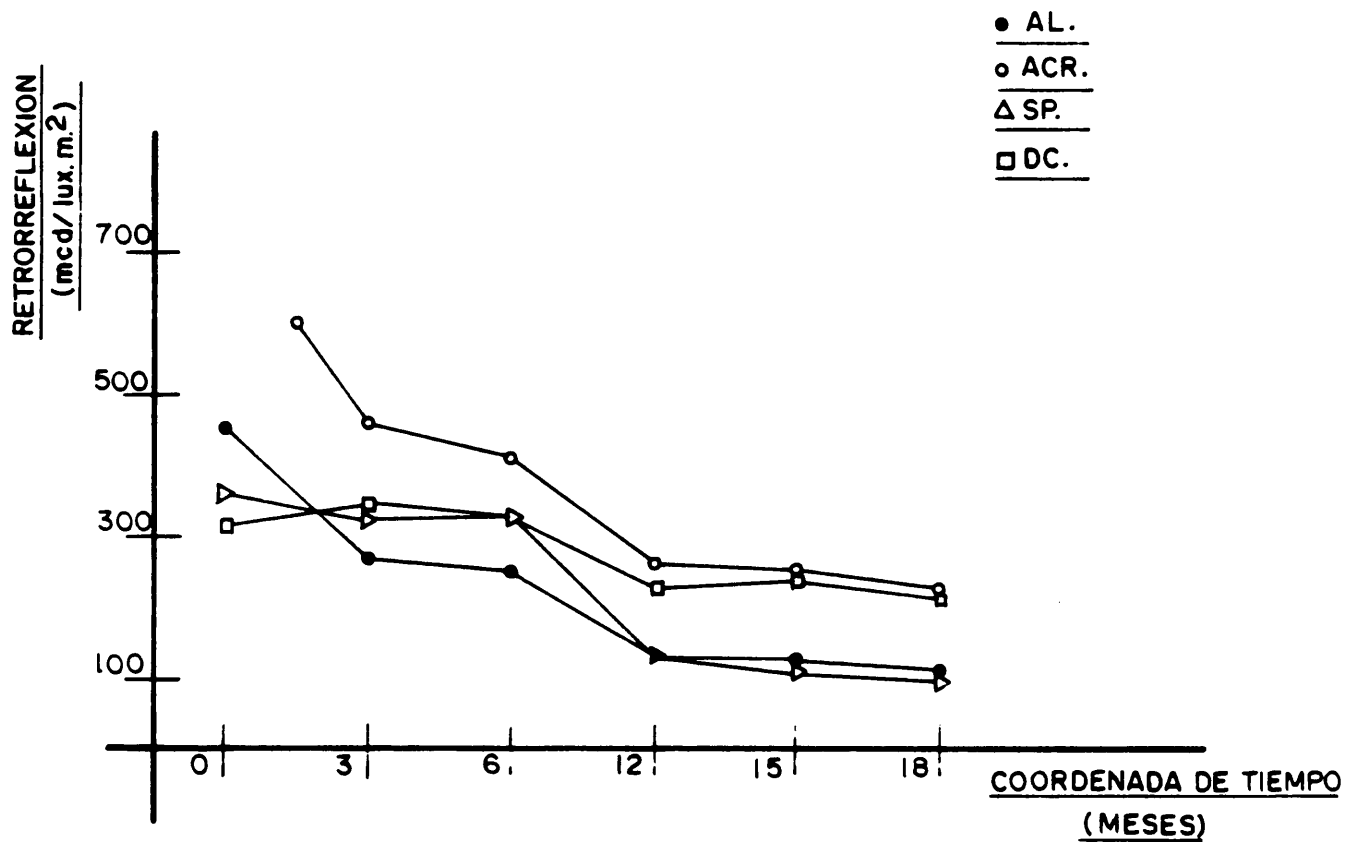


Fig.8.26 Variación de la retroreflexión, sobre firme rígido, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

Como puede observarse la variación de la retroreflexión en cada material es diferente según se trate de pintura convencional (ACR, AL) o de materiales de larga duración (SP, DC).

El valor de la retrorreflexión va disminuyendo, en las pinturas convencionales, durante todo el ensayo como consecuencia de la pérdida de esferas que tiene lugar por la acción abrasiva del tráfico. Así, en el caso de las pinturas alcídicas esta disminución es muy elevada. En este tipo de pintura convencional a los 12 meses de la aplicación, se alcanza un valor tan bajo de retrorreflexión que hace la marca vial inservible manteniéndose, dicho valor, hasta el final del ensayo, dentro de un entorno reducido de variación.

Por el contrario en las de tipo acrílico (ACR), aunque también alcanzan su cota mínima a los 12 meses, el valor de retrorreflexión que se obtiene, y al igual que en el caso anterior mantenido hasta el final dentro de un entorno, es más elevado que en las de tipo AL.

En los materiales de larga duración, aunque se sigue la misma ley de variación que en los convencionales, el valor final de retrorreflexión es muy diferente. En éstos la retrorreflexión aumenta durante los seis primeros meses como consecuencia de la acción del tráfico que hace aflorar las esferas de premezclado, y que junto con las de postmezclado que aún permanecen en la marca vial, mejoran la visibilidad nocturna. La retrorreflexión, una vez conseguido este valor máximo, comienza a disminuir hasta alcanzar su valor mínimo a los 12 meses.

La caída de retrorreflexión, consecuencia de la acción abrasiva del tráfico sobre las esferas de premezclado, es mucho menor en los materiales de tipo "dos componentes" que en el termoplástico de aplicación en caliente. En términos absolutos, dicha variación puede cuantificarse en, 240 mcd/lux.m² para el termoplástico de aplicación en caliente y 120 mcd/lux.m², para el dos componentes.

A pesar de que en ambos casos, termoplástico y plástico en frío de dos componentes, el valor final de la retrorreflexión se alcanza en el mismo período de tiempo, su disminución así como su valor final, es doble en el termoplástico.

En los cuatro materiales estudiados el valor final de la retrorreflexión (alcanzado a los 12 meses) varía en un entorno de radio ± 20 mcd/lux.m², cambiando su centro para cada tipo de material.

De esta manera, y desde el punto de vista de la retrorreflexión, los materiales de tipo alcídico y termoplástico en caliente no son recomendables para su aplicación en firme rígido.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.27 se ha representado la variación del factor de luminancia para cada material ensayado, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

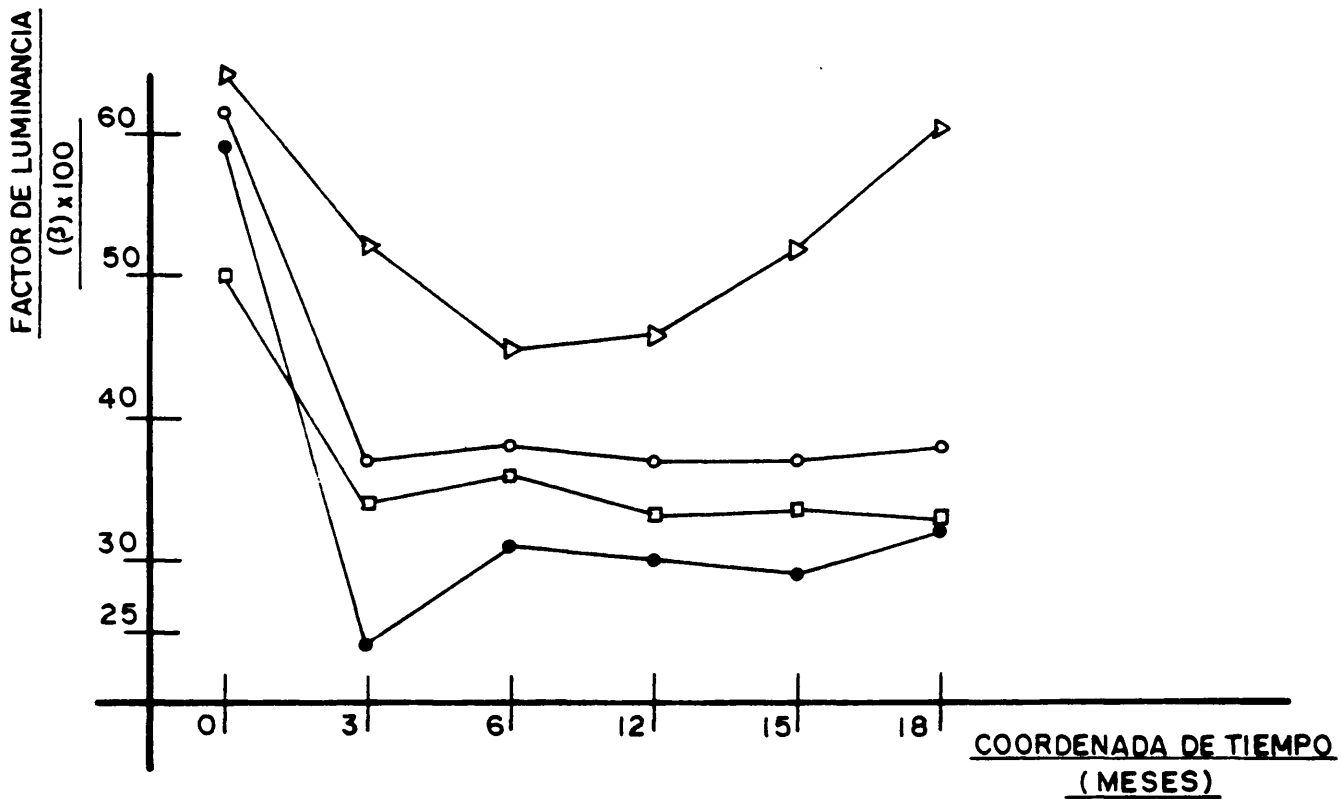


Fig.8.27 Variación del factor de luminancia, sobre firme rígido, en función del tiempo transcurrido desde la aplicación.

Como puede observarse las pinturas convencionales, ACR y AL, siguen la misma ley de variación en lo que al valor del factor de luminancia respecta. No obstante, la de tipo acrílico mantiene una tonalidad mucho más elevada que la otra. En ambas, durante los tres primeros meses, se produce un ensuciamiento importante que cuantitativamente es mayor en las alcídicas. Para las acrílicas esta disminución es aproximadamente del 41% mientras que en las alcídicas, se sitúa en torno al 60%. A partir de los tres meses se produce una recuperación de color alcanzándose un valor máximo, del factor de luminancia, que se mantendrá durante todo el ensayo. Dicho valor final, es para las pinturas de tipo alcídico, 0.30 ± 0.02 mientras que para las de tipo acrílico, 0.37 ± 0.01 .

En pinturas convencionales e independientemente del valor inicial, siempre las acrílicas dan, a lo largo del tiempo, valores del factor de luminancia más elevados que las de naturaleza alcídica.

Los materiales de larga duración, entre ellos, siguen una ley de variación completamente diferente. Mientras que el plástico en frío de dos componentes se comporta casi como una pintura convencional situándose, en cuanto al valor del factor de luminancia se refiere, entre la acrílica y la alcídica, el material termoplástico presenta el más elevado, siguiendo, además, una ley de variación completamente diferente.

El termoplástico de aplicación en caliente se va ensuciando de forma lenta, durante los seis primeros meses, hasta alcanzar un valor mínimo del factor de luminancia aproximadamente un 49% más bajo que el inicial recuperándose, de forma lenta al principio (entre el sexto y doceavo mes) para posteriormente hacerlo de forma rápida hasta alcanzar prácticamente el valor inicial (valor final, aproximadamente el 81% del inicial). La causa de este comportamiento puede deberse al plastificante del material que durante los seis primeros meses y hasta su oxidación, da lugar a una superficie, de la marca vial, pegajosa que adhiere fácilmente la suciedad.

Desde el punto de vista de la variación del factor de luminancia los materiales ensayados, sobre firme rígido, pueden ordenarse de mejor a peor en, SP > ACR > DC > AL, siendo el valor final del factor de luminancia en el termoplástico de aplicación en caliente, alrededor de un 60% superior al obtenido en la pintura acrílica.

III. VARIACION DE LA RETRORREFLEXION EN CADA MATERIAL ESTUDIADO DEPENDIENDO DEL TIPO DE PAVIMENTO.

PINTURA ALCIDICA.

En la figura-8.28 se ha representado la variación de la retrorreflexión de la pintura alcídica sobre pavimento bituminoso y sobre firme rígido.

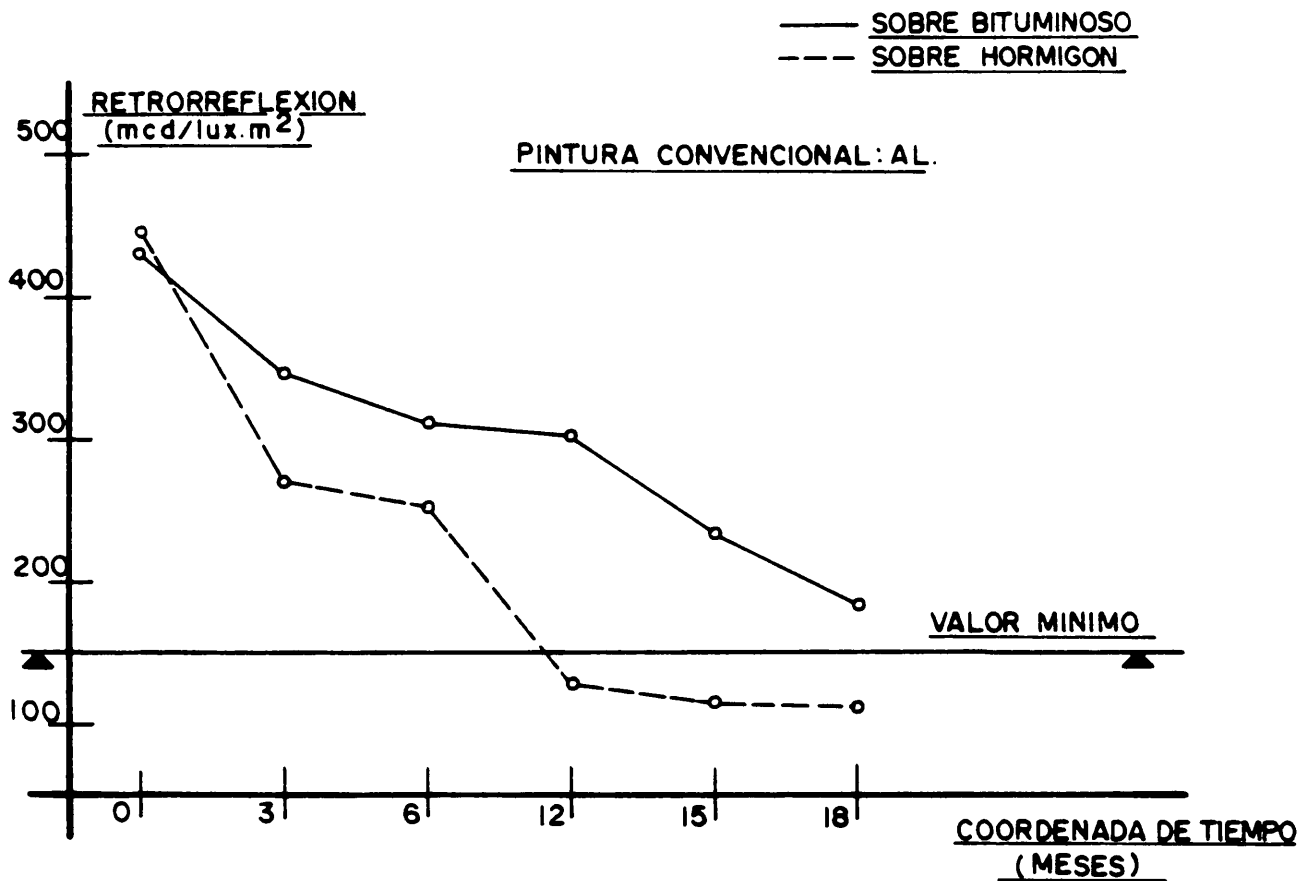


Fig.8.28 Variación de la retrorreflexión para la pintura de tipo alcídica sobre firme rígido y bituminoso.

Como puede observarse en ambos tipos de pavimento, el material alcídico muestra siempre una tendencia decreciente en su retrorreflexión.

Sobre firme bituminoso, a pesar de esa disminución en la visibilidad nocturna, mantiene sin embargo, un valor superior al mínimo tolerado (150 mcd/lux.m²). Por el contrario, sobre firme rígido, el material, a partir del sexto mes, sufre una variación brusca en la retrorreflexión que provoca, antes del año, la pérdida de su capacidad de ser visible durante la noche. La causa de éste mal comportamiento puede deberse a la excesiva erosión, detectada en el material entre el sexto y doceavo mes, que dio lugar a una eliminación, prematura, de la marca vial entre un 30% y 40%.

Esta eliminación inesperada puede deberse al residuo ácido que poseen las resinas alcídicas el cual, en medio alcalino, conduce a la hidrólisis del poliéster degradándose el ligante y dando lugar, en la marca vial, a una pérdida de resistencia a la abrasión, de adherencia y de capacidad de retención de las microesferas de vidrio.

PINTURA ACRILICA TERMOPLASTICA EN DISOLUCION.

En la figura-8.29 se ha representado la variación de la retrorreflexión de la pintura acrílica sobre pavimento bituminoso y sobre firme rígido.

Como puede observarse aunque la variación de la retrorreflexión es diferente según el tipo de pavimento, independientemente del mismo y del valor inicial de ésta, al cabo de un año el valor de la misma se sitúa alrededor de las 275 mcd/lux.m², para mantenerse, prácticamente, dentro del intervalo (275,225) durante todo el ensayo.

En ambos casos, hormigón y aglomerado asfáltico, el valor final de la retrorreflexión se sitúa muy por encima del mínimo exigido (aproximadamente 1.5 veces superior a dicho valor).

Por su parte, la ausencia de erosión en las marcas aplicadas y los elevados valores de retrorreflexión obtenidos, pueden convertir a este material convencional en el más idóneo para la señalización de ambos tipos de firme.

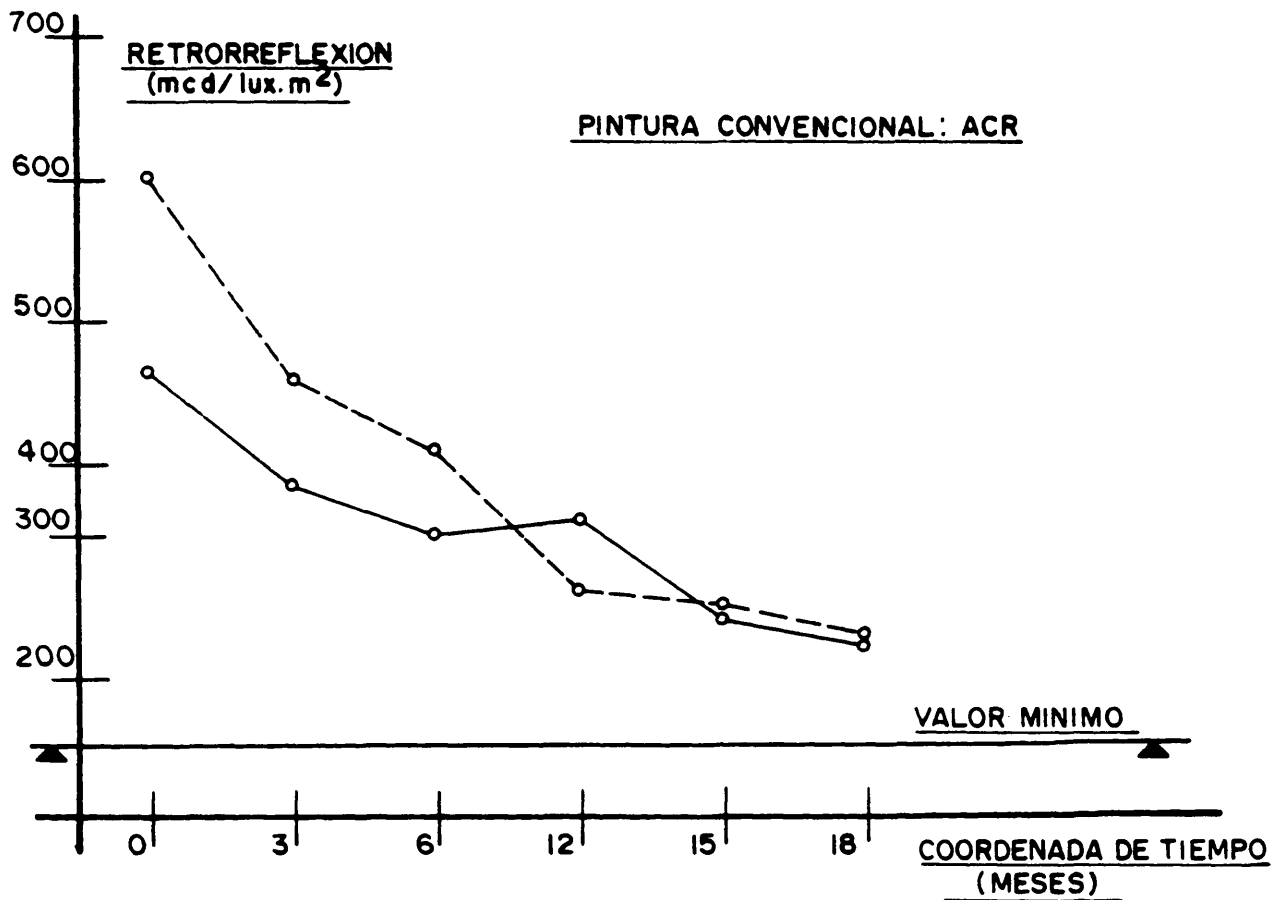


Fig.8.29 Variación de la retroreflexión para la pintura de tipo acrílica en disolución sobre firme rígido y bituminoso.

MATERIALES DE LARGA DURACION.

En la figura-8.30 se han representado los valores de la retroreflexión para el material termoplástico en caliente así como, los valores obtenidos para el plástico en frío de dos componentes.

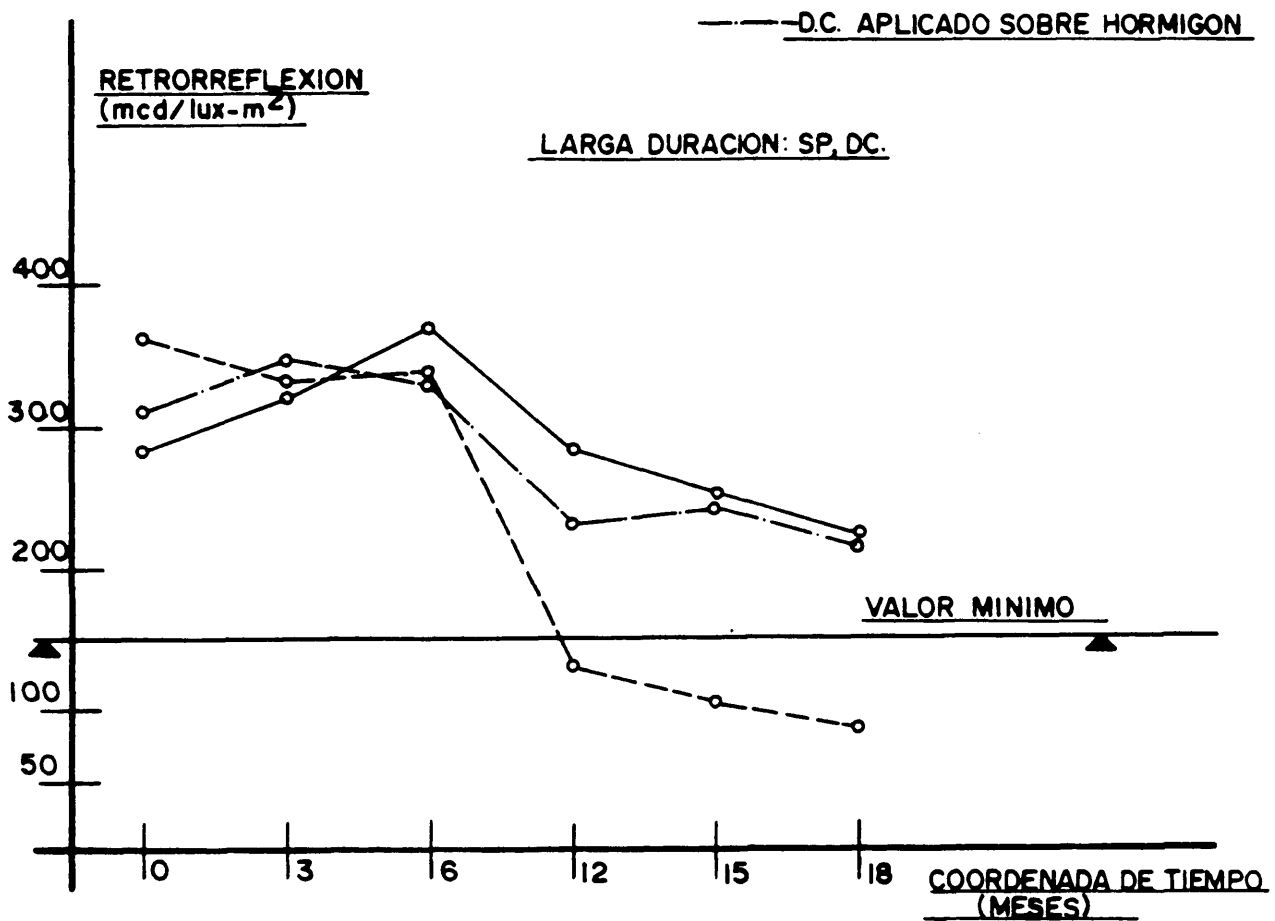


Fig.8.30 Variación de la retroreflexión para los materiales de larga duración sobre firme rígido y flexible.

Como puede observarse el termoplástico en caliente sigue, prácticamente, la misma ley de variación en ambos tipos de pavimento, creciendo su valor de retroreflexión, durante los seis primeros meses, aunque con diferente velocidad de variación dependiendo del tipo de pavimento. A continuación, éste valor decrece bruscamente hasta el doceavo mes haciéndolo, a partir de este momento, de forma más moderada hasta el final del ensayo.

Cuando se aplica sobre pavimento de hormigón, el termoplástico en caliente, pierde toda efectividad desde el punto de vista de la visibilidad nocturna a partir del sexto mes; la razón puede encontrarse en que entre el sexto y doceavo mes el material pierde adherencia de tal forma que, a partir del año, no permanece en la carretera más de un 50% de la superficie inicial de la marca vial. Por su parte en firme bituminoso, su valor de visibilidad nocturna es, en general, bueno obteniéndose un valor final de retroreflexión aproximadamente 1.5 veces superior al mínimo.

Por el contrario el plástico en frío de dos componentes, sigue una ley diferente al material anterior, tanto en hormigón como en aglomerado asfáltico. No obstante, coincide con el termoplástico en caliente, en que es a partir del sexto mes cuando se produce la caída brusca de retroreflexión, aunque una vez alcanzado el valor mínimo (225 mcd/lux.m²) manteniéndose alrededor de él hasta el final del ensayo.

Aunque las leyes de variación son diferentes, el valor final de la retroreflexión para el plástico en frío sobre hormigón y el termoplástico en caliente sobre aglomerado asfáltico, coincide. De ésta manera el material plástico en frío se comportaría, sobre firme rígido, igual, desde el punto de vista de la retroreflexión, que el termoplástico en caliente sobre bituminoso.

IV. VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA EN CADA MATERIAL APLICADO DEPENDIENDO DEL TIPO DE PAVIMENTO.

PINTURA ALCIDICA.

En la figura-8.31 se ha representado la variación del factor de luminancia de la pintura alcídica sobre pavimento bituminoso y sobre firme rígido.

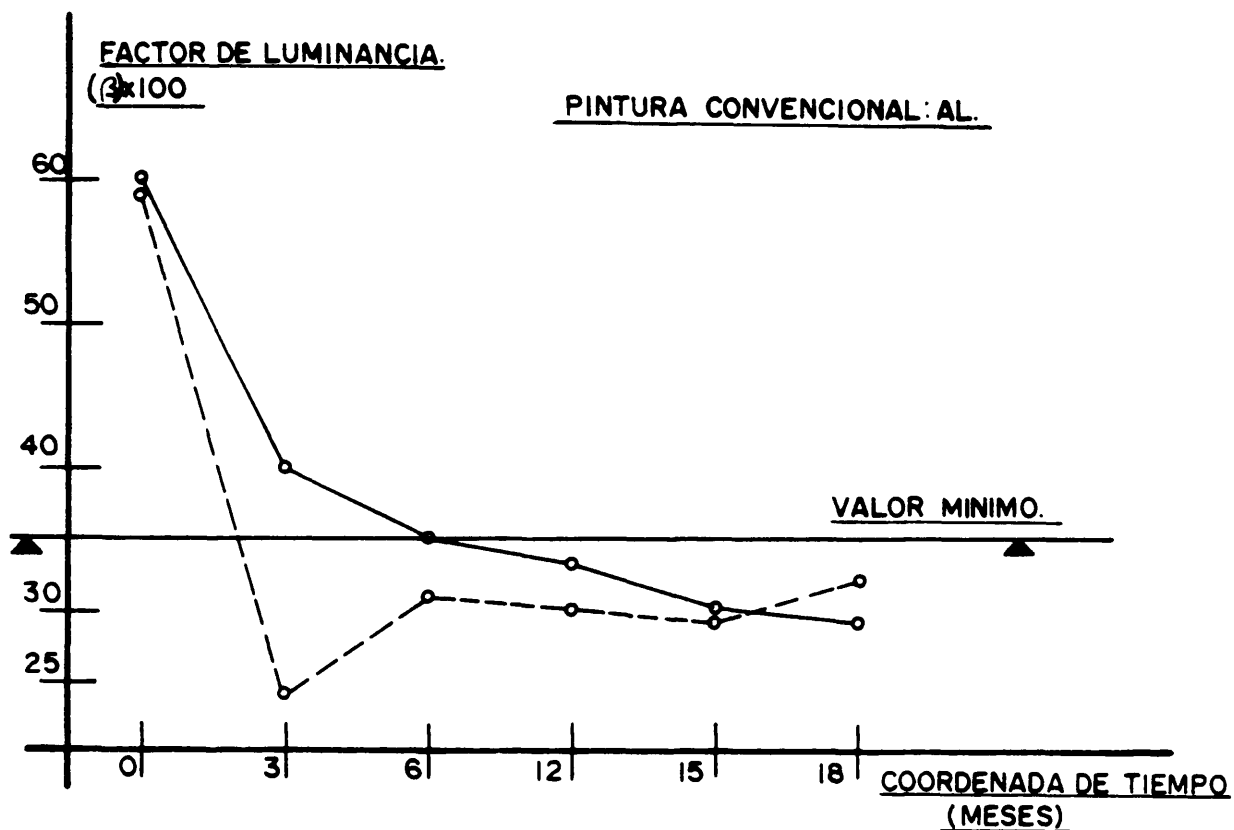


Fig.8.31 Variación del factor de luminancia para la pintura de tipo alcídica sobre firme rígido y bituminoso.

Como puede observarse el material alcídico, a partir del sexto mes, nunca supera el valor mínimo elegido para esta propiedad óptica (0.35) independientemente del pavimento sobre el cual se haya aplicado. Por su parte sobre firme rígido el comportamiento del material es aún peor ya que, prácticamente desde el principio, el factor de luminancia alcanza un valor inferior al mínimo exigido sin capacidad de recuperarse. Este mal comportamiento puede deberse a la hidrólisis del poliéster, que constituye el ligante, al ponerse en contacto con un sustrato alcalino.

PINTURA ACRILICA TERMOPLASTICA EN DISOLUCION.

En la figura-8.32 se ha representado la variación del factor de luminancia de la pintura acrílica sobre pavimento bituminoso y sobre firme rígido.

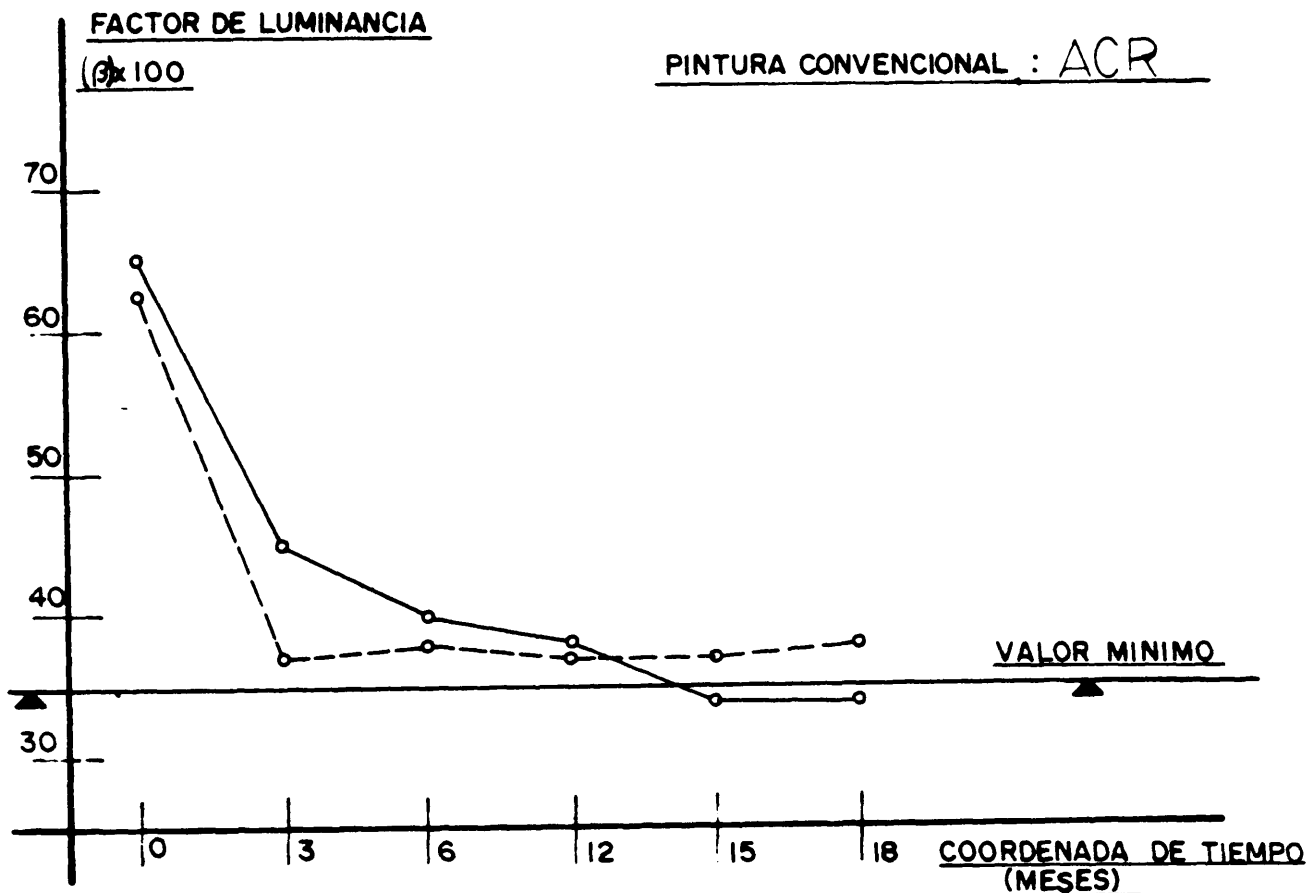


Fig.8.32 Variación del factor de luminancia para la pintura acrílica en disolución sobre firme rígido y bituminoso.

Como puede observarse la ley de variación del factor de luminancia que sigue este material, es semejante en ambos tipos de pavimento aunque el valor final obtenido es más elevado sobre firme rígido; solo a partir del quinceavo mes y sobre firme bituminoso, el valor del factor de luminancia es inferior al mínimo.

Por su parte sobre firme rígido, el valor del factor de luminancia disminuye bruscamente durante los tres primeros meses, alcanzando un valor mínimo superior al de referencia que no variará durante la vida efectiva del material.

MATERIALES DE LARGA DURACION.

En la figura-8.33 se han representado los valores del factor de luminancia para el material termoplástico en caliente así como, los valores obtenidos para el plástico en frío de dos componentes.

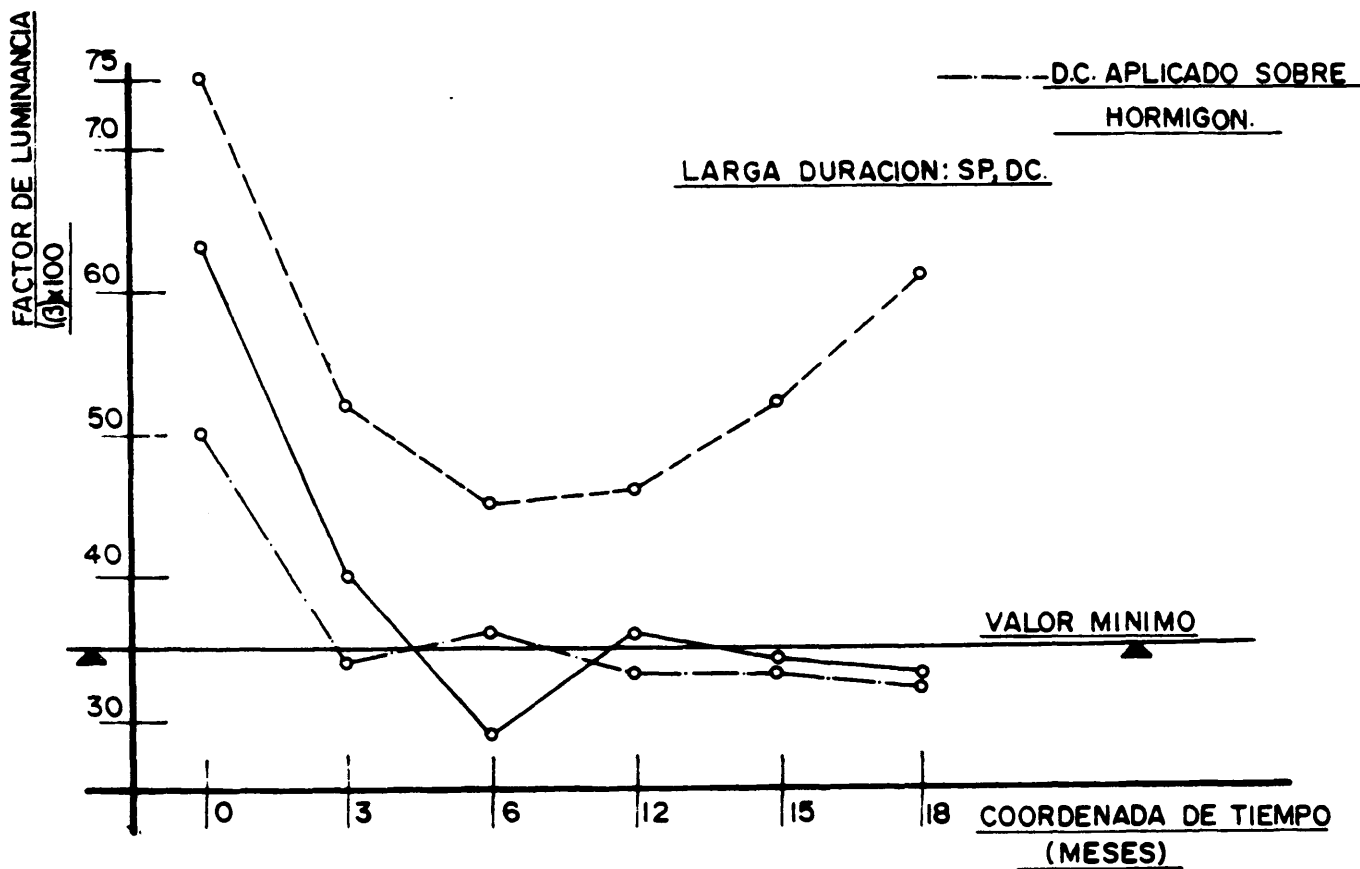


Fig.8.33 Variación del factor de luminancia para los materiales de larga duración sobre firme rígido y flexible.

Como puede observarse el material termoplástico en caliente, sigue una ley de variación del factor de luminancia diferente dependiendo del pavimento sobre el cual se aplique. En ambos tipos de pavimento, durante el primer año e independientemente del tipo de firme, el factor de luminancia disminuye hasta el sexto mes para aumentar, posteriormente, como consecuencia, posiblemente, de la autolimpieza de su superficie. Es a partir del año cuando se pone de manifiesto la influencia del tipo de pavimento. Así, mientras que sobre bituminoso el factor de luminancia disminuye, sobre hormigón aumenta. Al igual que ocurría con las pinturas acrílicas en disolución, los termoplásticos en caliente se comportan mejor sobre hormigón que sobre bituminoso.

Mientras que sobre firme flexible los materiales termoplásticos en caliente, entre el cuarto y onceavo mes, no superan el valor mínimo del factor de luminancia sobre firme rígido siempre lo rebasan holgadamente. Así, mientras que sobre pavimento flexible dichos materiales presentan un comportamiento semejante al de las pinturas acrílicas en disolución, en firme rígido no serían recomendables.

Por su parte el material plástico en frío de dos componentes, sobre hormigón, sigue una ley de variación del factor de luminancia muy diferente al anterior tanto en éste tipo de pavimento como, en flexible. Su valor final del factor de luminancia es muy semejante al que se obtiene para el termoplástico en caliente sobre bituminoso. Aunque en este material la recuperación del valor del factor de luminancia se produce a partir del tercer mes, existe una disminución de dicha propiedad entre el sexto y doceavo mes, manteniéndose, posteriormente, con unos valores bajos inferiores al mínimo.

V. VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA CON LA RETRORREFLEXION.

SOBRE PAVIMENTO FLEXIBLE.

En la figura-8.34 se ha representado la variación del factor de luminancia, de cada material seleccionado, en función de la retrorreflexión sobre pavimento flexible.

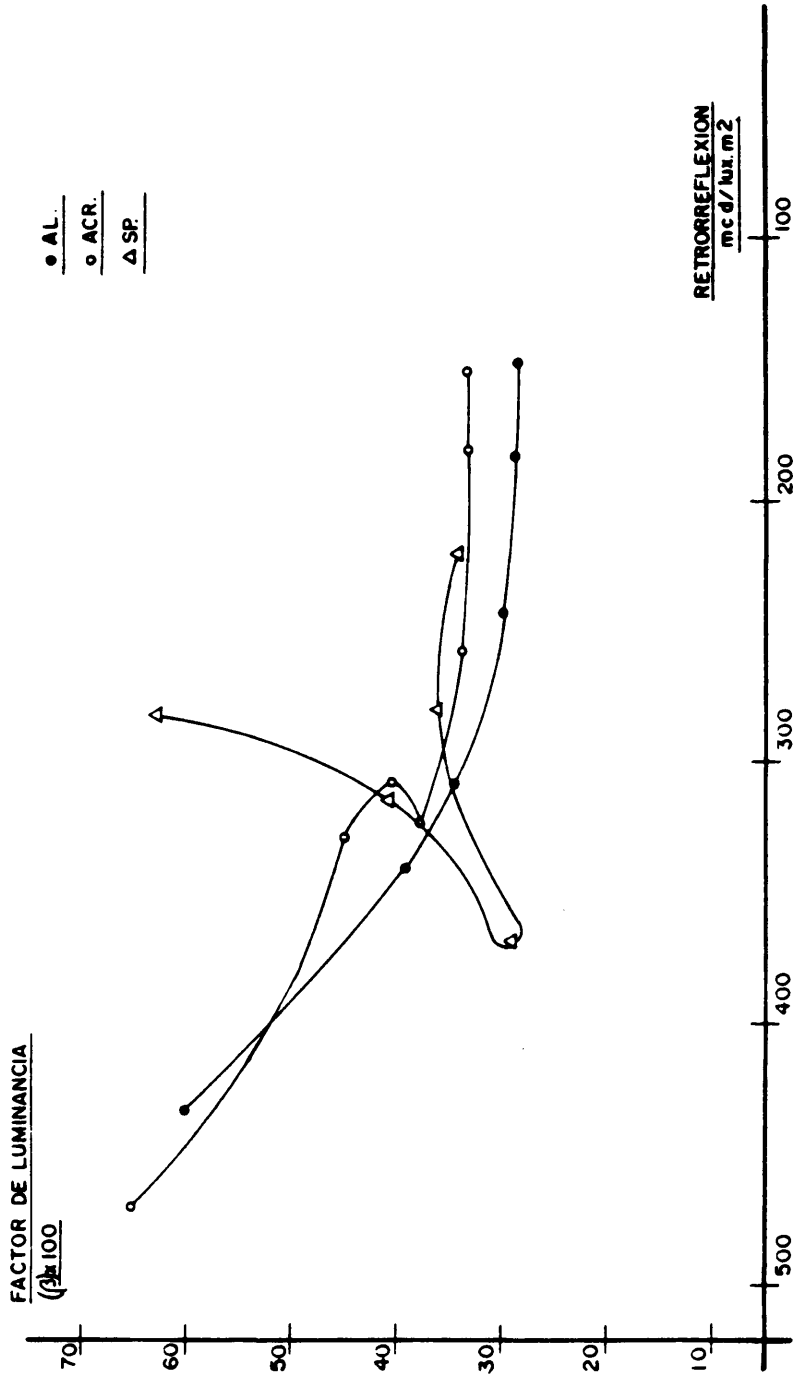


Fig. 8.34 Variación del factor de luminancia en función de la retroreflexión para cada uno de los materiales seleccionados en pavimento flexible.

Como puede observarse las pinturas convencionales, ACR y AL, siguen una variación semejante aunque, en las acrílicas, aparece un punto de inflexión que no se manifiesta en las alcídicas.

De una forma general, en las pinturas convencionales, el factor de luminancia disminuye con la retrorreflexión. La causa de este comportamiento puede ser la pérdida de microesferas de postmezclado, ya que los huecos dejados por estas se colmatan con la suciedad que depositan los neumáticos de los vehículos, por lo que al aumentar el número de huecos la visibilidad diurna disminuiría. Así, independientemente del valor inicial de retrorreflexión, el factor de luminancia disminuirá de forma constante con la retrorreflexión.

Por último en los materiales, ACR y AL, aparentemente no existe una correlación entre la retrorreflexión y el valor del factor de luminancia, de tal forma que no necesariamente a mayor retrorreflexión inicial menor factor de luminancia. Por el contrario si sucede que mientras más elevada sea la retrorreflexión inicial antes se alcanza el valor mínimo del factor de luminancia el cual dependerá, única y exclusivamente, del tipo de material convencional.

Por su parte en el material de larga duración (termoplástico de aplicación en caliente) la variación del factor de luminancia con la retrorreflexión, sigue una ley diferente a la de las pinturas convencionales. En este material el valor del factor de luminancia sufre una disminución inicial, cuantitativamente importante, situándolo por debajo del correspondiente obtenido para los los materiales convencionales, iniciando posteriormente, una recuperación de ésta propiedad, cuyo valor final será comparable al obtenido para la acrílica en disolución. Este comportamiento puede deberse a la gran termoplasticidad de éstos materiales que, a bajas temperaturas, se contraen cerrando todos los huecos, llenos de suciedad, dejados por las microesferas.

Por su parte el hecho de que el termoplástico de aplicación en caliente, no cierre un ciclo de histéresis en su variación del factor de luminancia con respecto a la retrorreflexión, puede deberse a la oxidación sufrida por el aceite de plastificación durante los seis primeros meses. Esta oxidación puede dar lugar al oscurecimiento, irrecuperable, de la marca vial que junto con la suciedad depositada en los huecos dejados por las microesferas, hacen que su factor de luminancia alcance, inicialmente, un valor mínimo inferior al de las pinturas convencionales para, posteriormente, aumentar hasta alcanzar el mismo que se obtiene en las pinturas de base acrílica en disolución.

SOBRE FIRME RIGIDO.

En la figura-8.35 se ha representado la variación del factor de luminancia, de cada material seleccionado, en función de la retrorreflexión sobre firme rígido.

Como puede observarse, aunque de forma diferente, en ambos tipos de materiales, ACR y DC, se produce siempre una disminución del factor de luminancia con la variación de la retrorreflexión. Al igual que en el caso anterior, no aparece una relación directa entre el valor final del factor de luminancia y el valor inicial de la retrorreflexión.

Por su parte la pintura acrílica termoplástica, sobre ambos tipos de pavimento, presenta un comportamiento parecido; el factor de luminancia disminuye de forma continua, sin puntos de inflexión, hasta alcanzar un valor mínimo independiente de la disminución de la retrorreflexión.

En el plástico en frío de dos componentes la relación entre el factor de luminancia y la retrorreflexión, es semejante a la del material termoplástico en caliente sobre bituminoso: se produce un punto de inflexión que hace que el material tienda a recuperar su valor inicial del factor de luminancia pero sin llegar a cerrar un ciclo de histéresis.

Por último, en ambos tipos de materiales, retrorreflexiones de partida elevadas, inicialmente, solo conducen a disminuciones más bruscas del factor de luminancia estabilizándose, posteriormente, con un valor mínimo que solo dependerá del tipo de material.

○ ACR.
□ DC.

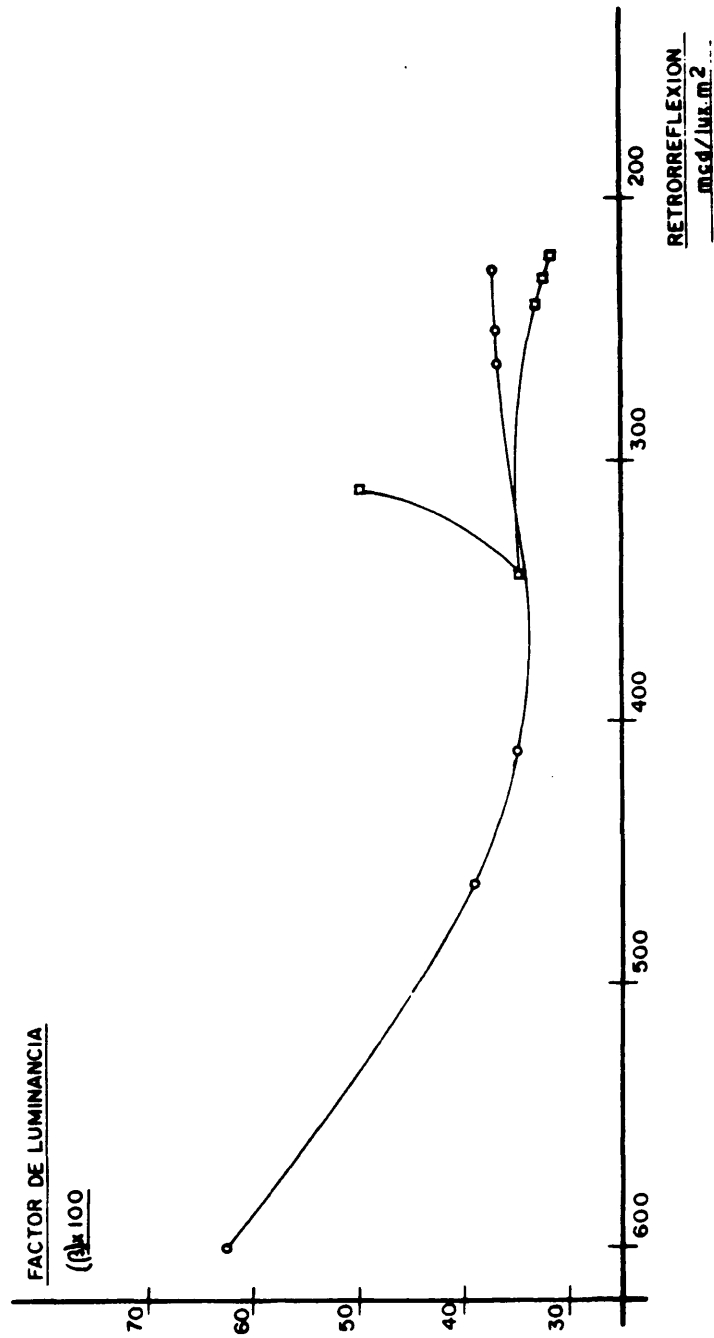


Fig.8.35 Variación del factor de luminancia en función de la retrorreflexión para cada uno de los materiales seleccionados en firme rígido.

8.3. ENSAYOS DE LABORATORIO.

8.3.1. CONTROL DE LA APLICACION.

Los materiales estudiados se aplicaron, al igual que en campo, sobre probetas bituminosas y de mortero de cemento controlándose en ambos casos la dosificación del material base y de microesferas de vidrio.

Las condiciones de curado del material fueron las siguientes: humedad relativa del aire, $50 \pm 5\%$; temperatura, $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Las dosificaciones aplicadas sobre cada probeta (MELC-12.122) se recogen en la tabla-8.24.

Tabla-8.24 Dosificaciones de los materiales empleados en los ensayos de laboratorio.

DOSIFICACION (g/m ²)	TIPO DE MATERIAL BASE			
	Alcídico	Acrílico	Termoplástico en caliente	Plástico en frío
Microesferas de vidrio	480	520	600	600
Material base, en húmedo	720	800	3000	3000

8.3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.

Los valores de las propiedades ópticas obtenidos para cada material estudiado, antes y después de los procesos de envejecimiento aplicados, se recogen en las tablas-8.25 a 8.40.

Tabla-8.25 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material alcídico aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mcd/lux m ²)
		X	Y	
0	0,58	0,332	0,351	140
100	0,53	0,342	0,357	159
200	0,52	0,346	0,360	144
400	0,51	0,350	0,364	144
600	0,49	0,354	0,367	131

Tabla-8.26 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material alcidico aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,69	0,324	0,344	170
100	0,70	0,324	0,343	179
200	0,73	0,323	0,340	170
400	0,72	0,325	0,342	154
600	0,71	0,325	0,343	143

Tabla-8.27 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material alcidico aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,60	0,332	0,351	178
100	0,54	0,350	0,364	207
200	0,53	0,351	0,365	162
400	0,52	0,354	0,366	157
600	0,51	0,353	0,365	201

Tabla-8.28 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material alcidico aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,67	0,324	0,344	179
100	0,66	0,337	0,354	179
200	0,68	0,336	0,353	172
400	0,71	0,334	0,351	207
600	0,70	0,335	0,351	189

Tabla-8.29 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material acrílico aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,90	0,316	0,333	134
100	0,57	0,325	0,342	139
200	0,54	0,331	0,349	131
400	0,53	0,335	0,352	151
600	0,52	0,336	0,353	123

Tabla-8.30 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, para el material acrílico aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERÍSTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,91	0,316	0,333	122
100	0,59	0,324	0,341	127
200	0,60	0,326	0,343	131
400	0,57	0,331	0,348	137
600	0,57	0,332	0,349	133

Tabla-8.31 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material acrílico aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERÍSTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,92	0,316	0,333	199
100	0,71	0,323	0,340	188
200	0,71	0,324	0,341	190
400	0,71	0,325	0,342	173
600	0,70	0,326	0,343	161

Tabla-8.32 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material acrílico aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,87	0,317	0,333	122
100	0,61	0,323	0,340	127
200	0,63	0,323	0,339	131
400	0,61	0,323	0,340	137
600	0,61	0,324	0,341	133

Tabla-8.33 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material termoplástico en caliente aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,88	0,323	0,341	307
100	0,53	0,335	0,353	288
200	0,52	0,337	0,354	348
400	0,51	0,344	0,362	323
600	0,47	0,351	0,368	327

Tabla-8.34 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material termoplástico en caliente aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,88	0,326	0,341	255
100	0,55	0,337	0,355	247
200	0,55	0,337	0,354	257
400	0,56	0,340	0,358	282
600	0,55	0,345	0,363	302

Tabla-8.35 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material termoplástico en caliente aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,90	0,323	0,341	364
100	0,59	0,346	0,367	369
200	0,57	0,349	0,370	371
400	0,56	0,355	0,375	382
600	0,55	0,356	0,376	332

Tabla-8.36 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material termoplástico en caliente aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,88	0,326	0,341	385
100	0,58	0,346	0,367	387
200	0,57	0,346	0,369	0320
400	0,56	0,349	0,374	0409
600	0,55	0,356	0,375	405

Tabla-8.37 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material plástico en frío aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mod/lux m ²)
		x	y	
0	0,84	0,322	0,338	140
100	0,54	0,333	0,349	143
200	0,54	0,335	0,350	140
400	0,51	0,341	0,357	134
600	0,49	0,345	0,361	132

Tabla-8.38 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material plástico en frío aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "Atlas".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/luz m ²)
		x	y	
0	0,86	0,321	0,337	150
100	0,56	0,330	0,346	151
200	0,56	0,331	0,347	204
400	0,54	0,335	0,351	150
600	0,52	0,338	0,354	132

Tabla-8.39 Valores de retroreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material plástico en frío aplicado sobre probeta bituminosa y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (B)	Coordenadas Cromáticas		Retroreflexión (mod/luz m ²)
		x	y	
0	0,84	0,322	0,338	115
100	0,54	0,334	0,349	104
200	0,55	0,333	0,348	104
400	0,54	0,334	0,349	107
600	0,54	0,335	0,349	117

Tabla-8.40 Valores de retrorreflexión, factor de luminancia y coordenadas cromáticas, obtenidos para el material plástico en frío aplicado sobre probeta de hormigón y envejecido artificialmente en equipo "UV".

TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL (horas)	CARACTERISTICA			
	Factor de Luminancia (β)	Coordenadas Cromáticas		Retrorreflexión (mcd/lux m ²)
		x	y	
0	0,83	0,321	0,337	110
100	0,53	0,334	0,348	106
200	0,53	0,333	0,348	103
400	0,53	0,335	0,348	102
600	0,54	0,328	0,344	96

8.3.3. INTERPRETACION Y DISCUSION.

La interpretación de los resultados obtenidos y su discusión, se llevó a cabo para cada uno de los equipos utilizados por separado, analizando cómo varía cada propiedad óptica estudiada para posteriormente comparar, por materiales, la influencia que tiene cada proceso de envejecimiento artificial en cada uno de ellos.

I. ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACCELERADO EN EQUIPO "ATLAS".

I.1. SOBRE PROBETA BITUMINOSA.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.36 se ha representado la variación del valor del factor de luminancia para cada material ensayado, en función del tiempo de envejecimiento artificial al que fueron sometidas las correspondientes probetas.

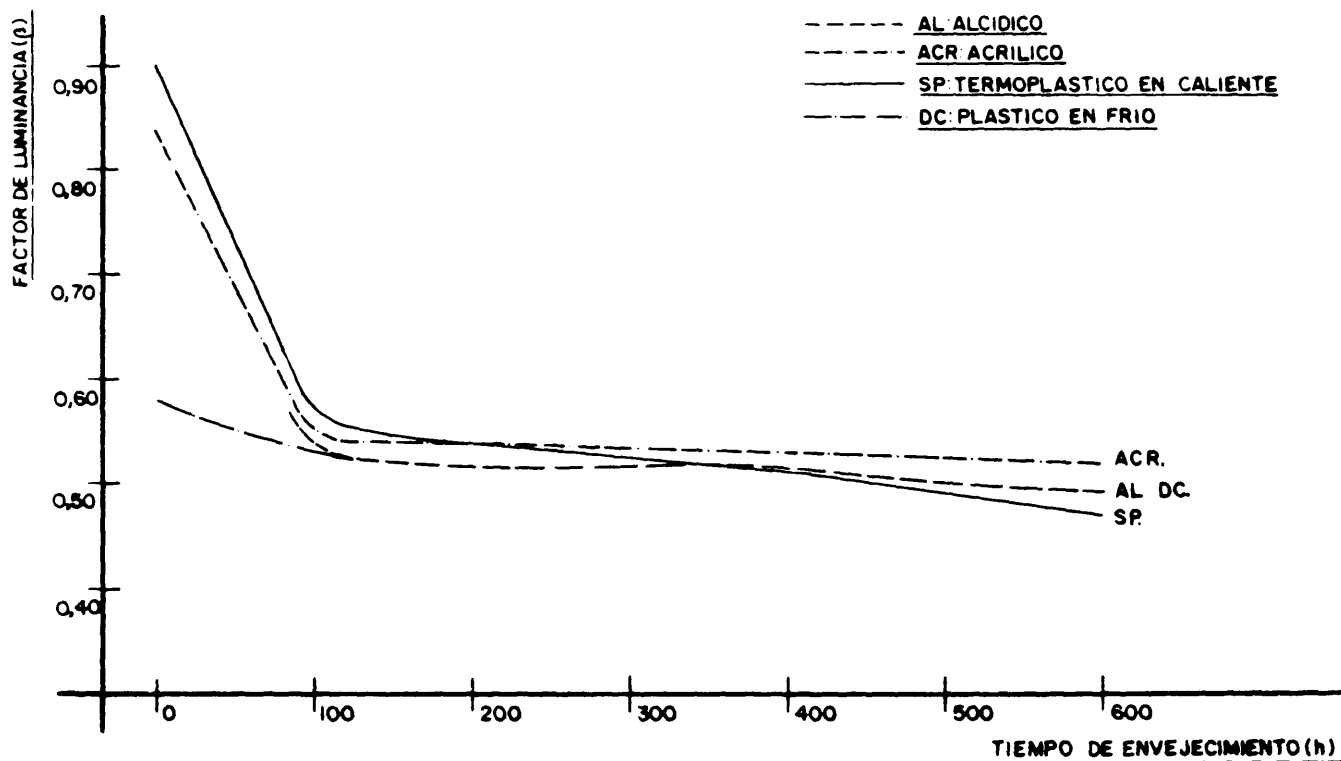


Fig.8.36 Variación del factor de luminancia, sobre probeta bituminosa, en función de las horas de envejecimiento.

Como puede observarse, todos los materiales, excepto el de referencia "AL" (alcídico), se comportan de forma similar. Durante las primeras cien horas tiene lugar, realmente, el envejecimiento sobre la marca vial independientemente del tipo de material base, obteniéndose una disminución media en el valor inicial del factor de luminancia del 40%, aproximadamente. A partir de este momento las marcas viales a penas se ven afectadas por el envejecimiento, como puede deducirse de la tendencia observada en la referida figura.

En laboratorio y con el fin de poder predecir el comportamiento de las marcas viales frente al envejecimiento natural, desde el punto de vista del factor de luminancia, cuando se aplican sobre pavimento bituminoso, puede concluirse que 200 h de envejecimiento artificial acelerado en equipo "Atlas" es suficiente para observar el comportamiento de los diferentes materiales.

Como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento de los materiales de referencia, ACR, SP y DC, es el mismo al cabo de 600 h de envejecimiento. Mención a parte merece el material alcídico en el que su envejecimiento artificial en equipo "Atlas" prácticamente es inexistente. Esto puede deberse al "sangrado" de la probeta bituminosa que hace que la marca vial parta con valores iniciales del factor de luminancia muy bajos (alrededor de 0.60), frente al valor inicial de 0.90 de los otros materiales citados. De este modo, la influencia del envejecimiento es prácticamente nula por lo que puede indicarse que el material de tipo alcídico no se ve afectado por el envejecimiento artificial en equipo "Atlas".

VARIACION DE LAS COORDENADAS CROMATICAS.

En las figuras-8.37 a 8.40 se han representado, en diagramas CIE de color, las coordenadas cromáticas obtenidas para cada material durante las 600 h de envejecimiento. Los polígonos que inicialmente aparecen en trazos continuo y discontinuo, corresponden a las superficies de color admitidas en la actual normativa española.

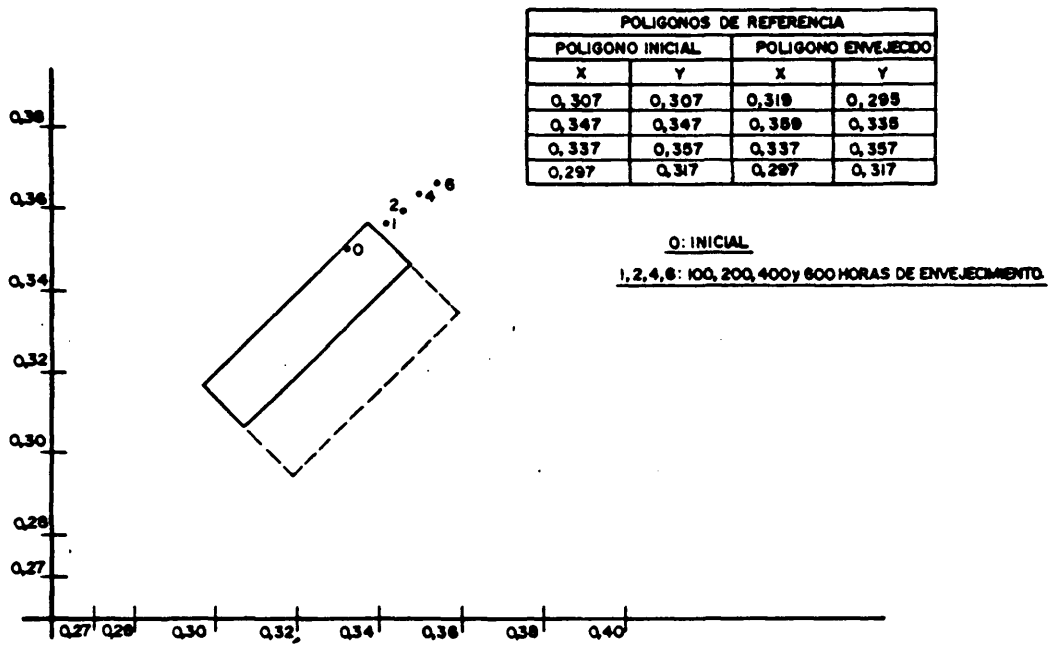


Fig.8.37 Coordenadas cromáticas correspondientes al material alcidico, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

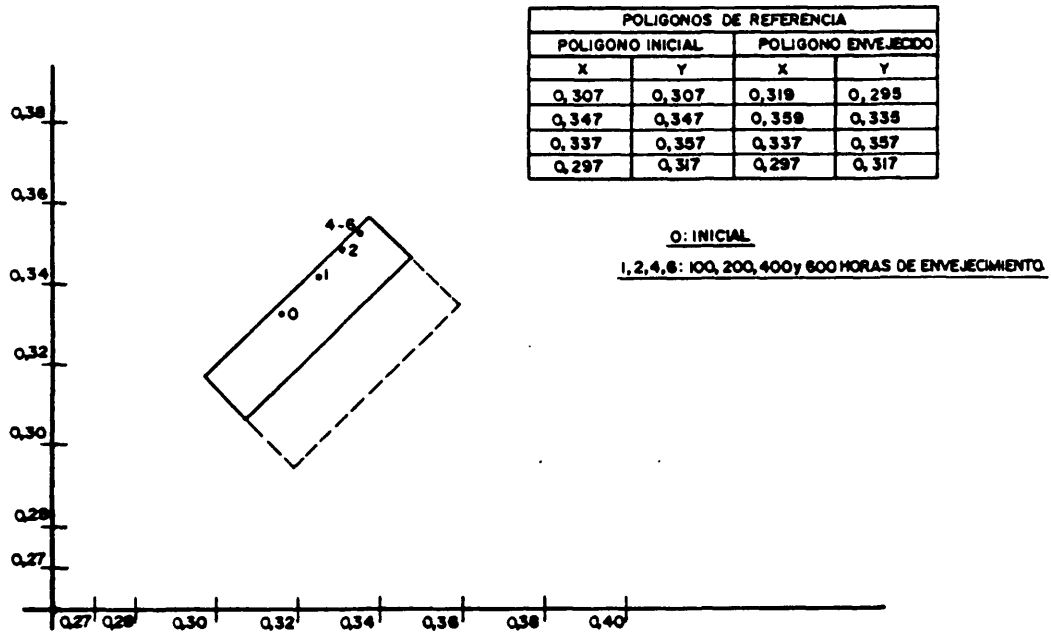
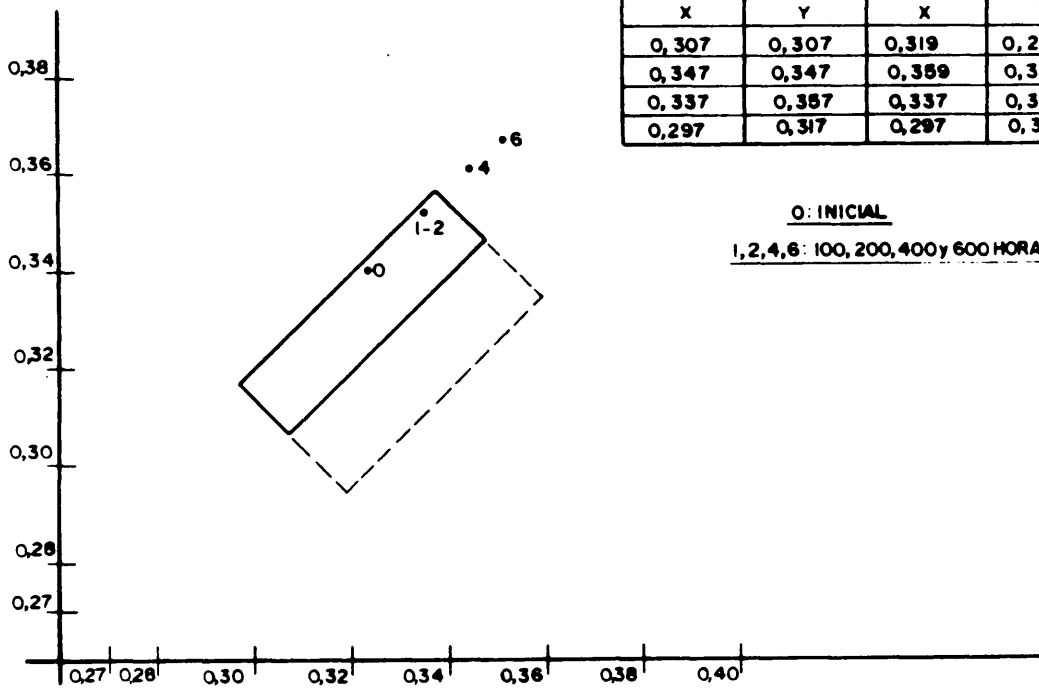


Fig.8.38 Coordenadas cromáticas correspondientes al material acrílico, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

POLIGONOS DE REFERENCIA			
POLIGONO INICIAL		POLIGONO ENVEJECIDO	
X	Y	X	Y
0,307	0,307	0,319	0,295
0,347	0,347	0,359	0,335
0,337	0,357	0,337	0,357
0,297	0,317	0,297	0,317

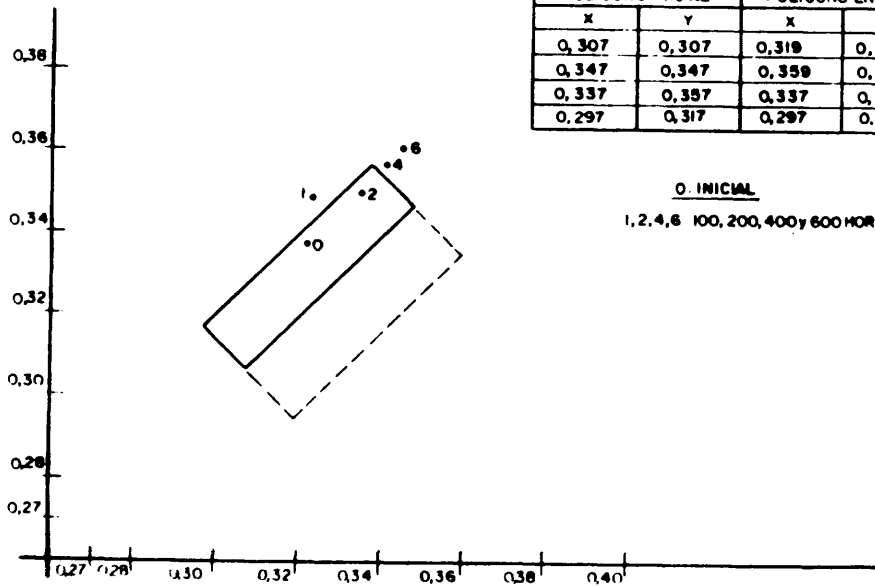


0: INICIAL

1,2,4,6: 100, 200, 400 y 600 HORAS DE ENVEJECIMIENTO

Fig.8.39 Coordenadas cromáticas correspondientes al material termoplástico en caliente, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

POLIGONOS DE REFERENCIA			
POLIGONO INICIAL		POLIGONO ENVEJECIDO	
X	Y	X	Y
0,307	0,307	0,319	0,295
0,347	0,347	0,359	0,335
0,337	0,357	0,337	0,357
0,297	0,317	0,297	0,317



0: INICIAL

1,2,4,6: 100, 200, 400 y 600 HORAS DE ENVEJECIMIENTO

Fig.8.40 Coordenadas cromáticas correspondientes al material plástico en frío, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

Como puede observarse, el material alcidico, como consecuencia del sangrado de las probetas, prácticamente desde el principio se sitúa fuera del polígono. En ningún momento se sitúa dentro del polígono admitido para materiales envejecidos por lo que estos materiales, como consecuencia probablemente del sangrado, desde el punto de vista de color, no presentan estabilidad al envejecimiento artificial en equipo "Atlas", a pesar de que su factor de luminancia se sitúa dentro de los límites tolerados. Extrapolando este resultado al comportamiento a la intemperie del material alcidico, puede decirse que, aunque el valor de su factor de luminancia sea aceptable, sus coordenadas cromáticas demuestran que el material se oscurece, alejándose del color blanco admitido para los materiales de señalización horizontal envejecidos.

Los materiales de referencia, DC y SP, muestran un comportamiento parecido en la variación de las coordenadas cromáticas al del alcidico, siendo para éstos el efecto del envejecimiento en equipo "Atlas" el mismo. A diferencia con él, sus coordenadas cromáticas no abandonan el polígono permitido hasta las 400 h de envejecimiento por lo que pueden considerarse más estables frente a este tipo de envejecimiento.

Por último, en el caso del material acrílico en disolución, y a pesar de mostrar también un comportamiento similar, sus coordenadas cromáticas se sitúan siempre dentro del polígono, por lo que se convierte en el único material estable frente al envejecimiento en equipo "Atlas".

De esta manera, y aunque desde el punto de vista del factor de luminancia, 200 h de envejecimiento en equipo "Atlas" sean suficientes para comprobar la estabilidad de éstos materiales, para poder determinar la variación de sus coordenadas cromáticas y prever, de forma fiable, su tendencia en lo que a la variación del color respecta serán necesarias, al menos, 400 h de envejecimiento.

De acuerdo con los datos obtenidos, desde el punto de vista de la estabilidad al envejecimiento en equipo "Atlas", los materiales estudiados pueden ordenarse de la siguiente forma de mayor a menor estabilidad: ACR >> SP ≡ DC > AL.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.41 se ha representado la variación de la retrorreflexión de cada material con el tiempo de envejecimiento.

Como puede observarse, independientemente del valor inicial de la retrorreflexión, ésta permanece prácticamente constante durante todo el proceso de envejecimiento para todos los materiales estudiados. la causa de este comportamiento puede ser la ausencia de abrasión, producida por el tráfico al pisar la raya de pintura que arranca las microesferas de vidrio de la superficie de la marca vial. Así, en ausencia de esta tipo de abrasión, el envejecimiento artificial acelerado en equipo "Atlas" no tiene influencia sobre la retrorreflexión por lo que el envejecimiento artificial de las marcas viales en ausencia de abrasión no parece representar un método eficaz de evaluación de la variación de la retrorreflexión de las marcas viales con el tiempo, por muy elevado que sea el número de horas que dure el ensayo.

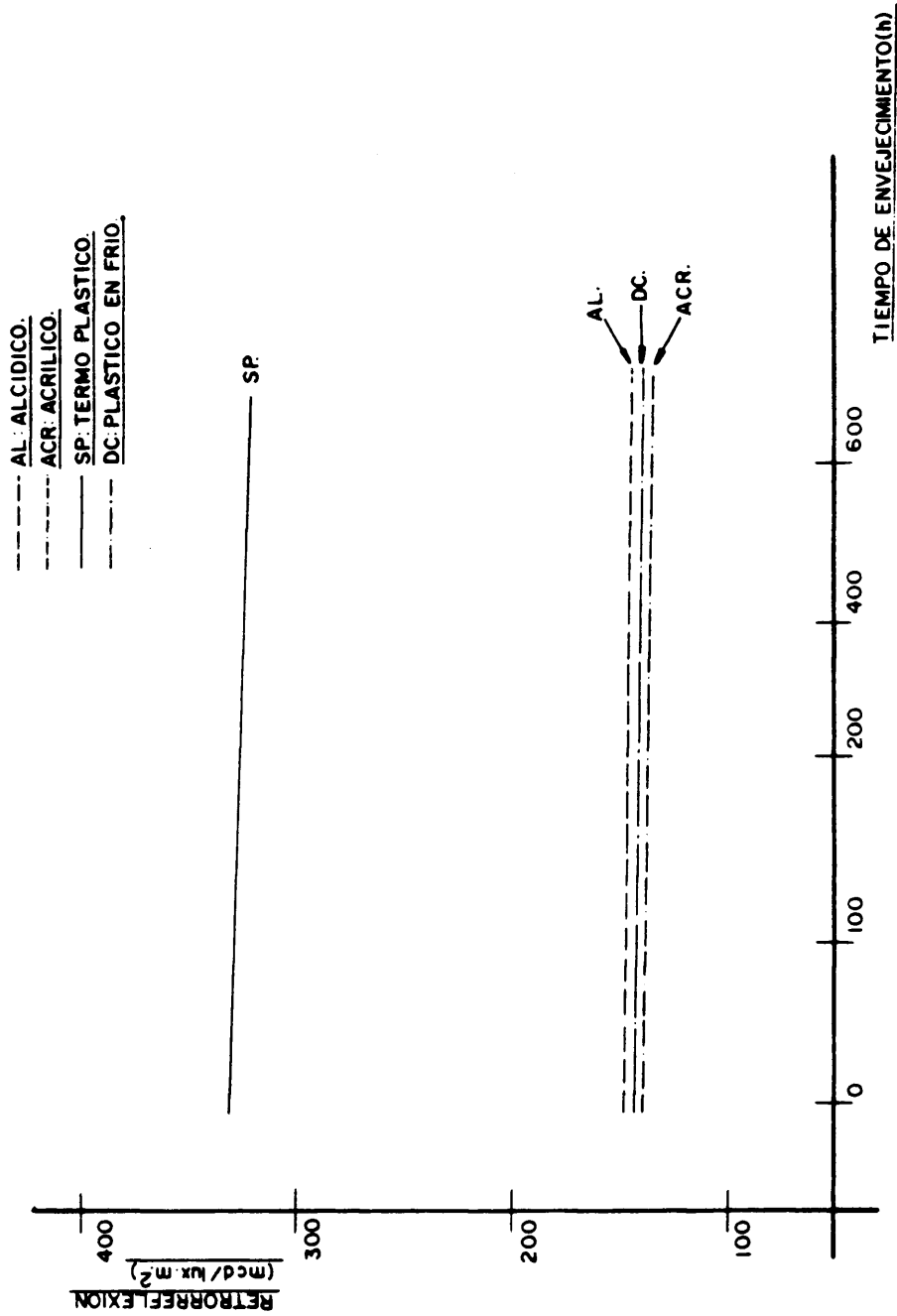


Fig.8.41 Variación de la retroreflexión, sobre probeta bituminosa, en función de las horas de envejecimiento.

I.2. SOBRE PROBETA DE MORTERO DE CEMENTO.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.42 se ha representado la variación del factor de luminancia, para cada material ensayado, en función de las horas de envejecimiento artificial al que fueron sometidas las probetas de dichos materiales.

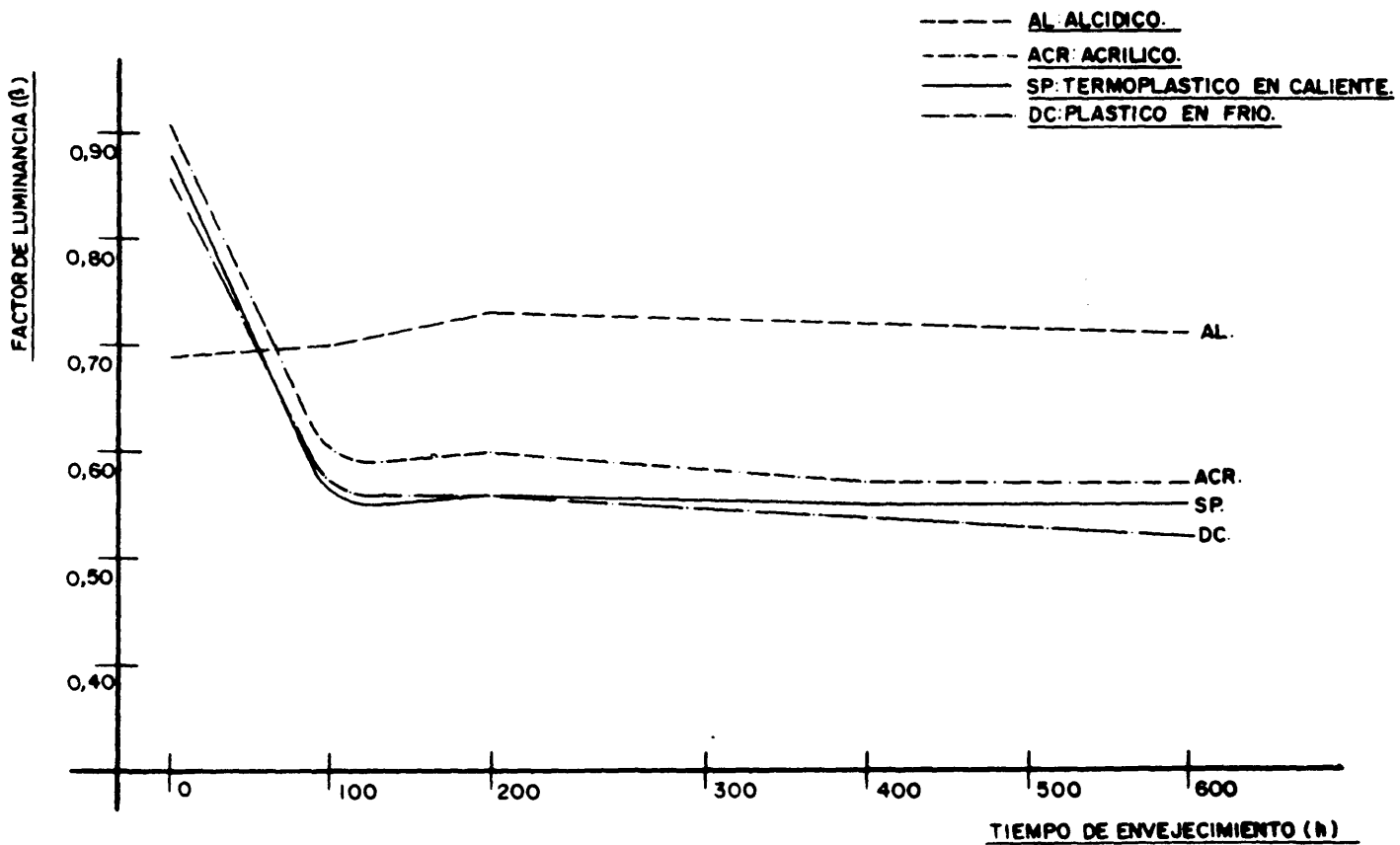


Fig.8.42 Variación del factor de luminancia, sobre probeta de hormigón, en función de las horas de envejecimiento.

Puede apreciarse que todos los materiales, a excepción del tipo alcídico (AL), se comportan de igual forma, partiendo de valores elevados del factor de luminancia (superiores a 0.85) para disminuir bruscamente durante las primeras cien horas de envejecimiento y manteniéndose, a partir de este momento, la disminución que tiene lugar en el valor del factor de luminancia de éstos materiales, excepto en el alcídico, es de un 40% aproximadamente.

En este material, a diferencia con lo ocurrido sobre probeta bituminosa, no existe sangrado inicial de la probeta por lo que el valor de partida del factor de luminancia es más elevado. No obstante, y a pesar de ésta diferencia fundamental, el comportamiento es similar al del caso anterior.

Así y con el fin de predecir el comportamiento de las marcas viales frente al envejecimiento natural, desde el punto de vista del factor de luminancia, cuando se aplican los materiales sobre firmes de hormigón, puede indicarse que un periodo de 200 h de envejecimiento artificial acelerado en equipo "Atlas" es suficiente para observar su comportamiento.

VARIACION DE LAS COORDENADAS CROMATICAS.

En las figuras-8.43 a 8.46 se han representado, en diagramas CIE de color, las coordenadas cromáticas obtenidas para cada material envejecido durante 600 h.

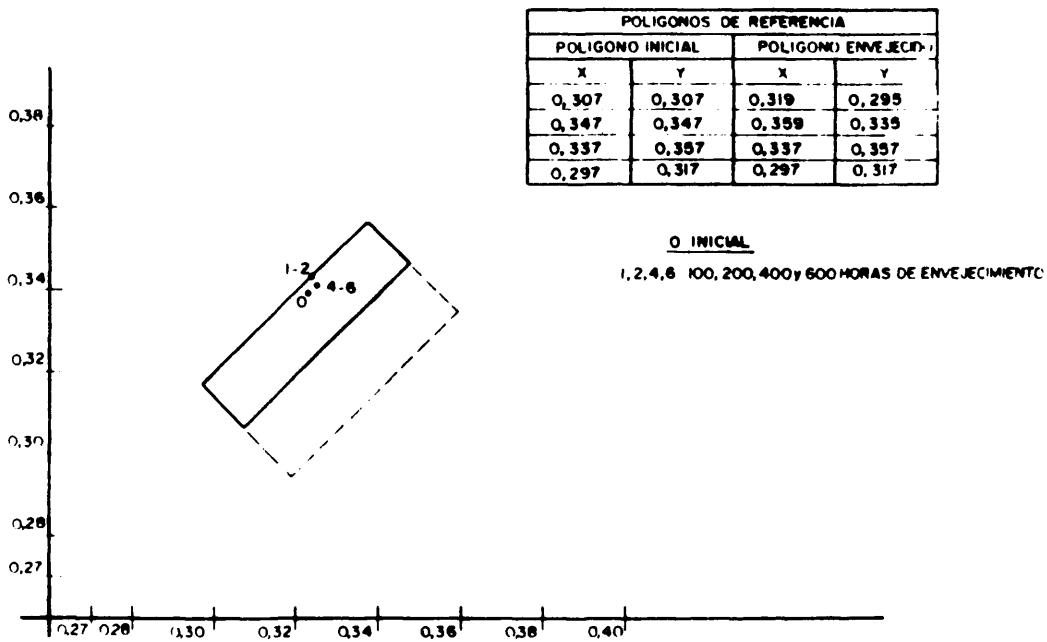


Fig.8.43 Coordenadas cromáticas correspondientes al material alcidico, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido en equipo "Atlas".

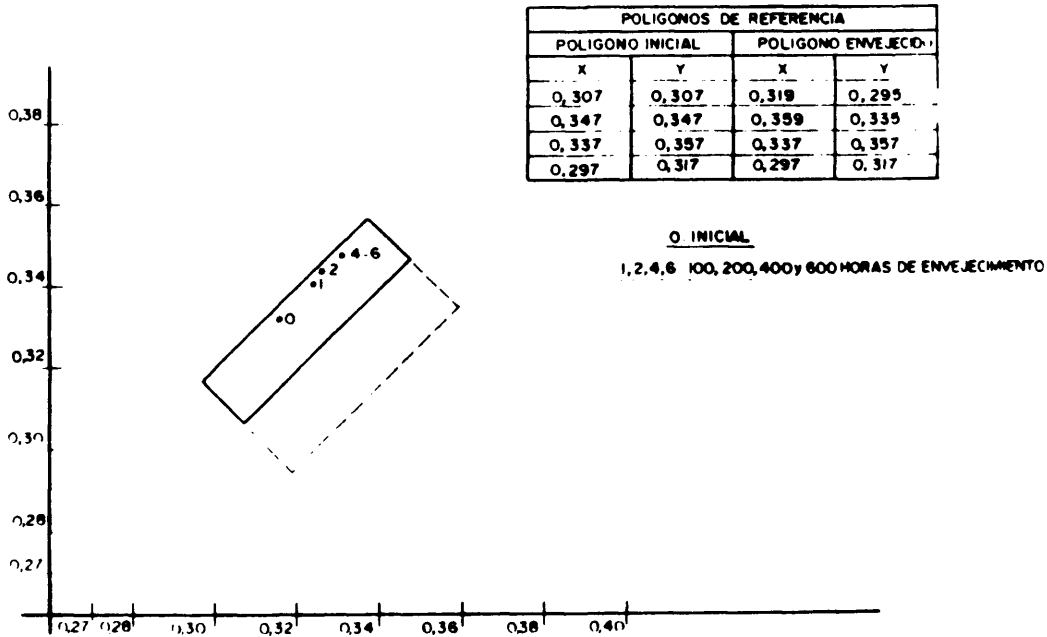


Fig.8.44 Coordenadas cromáticas correspondientes al material acrílico, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

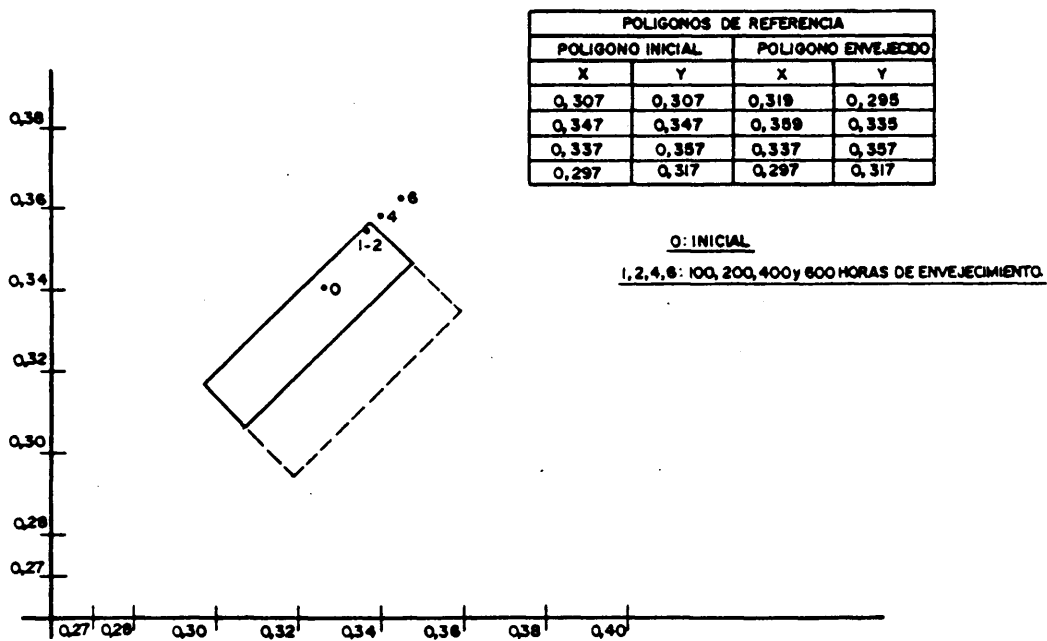


Fig.8.45 Coordenadas cromáticas correspondientes al material termoplástico en caliente, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de se envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

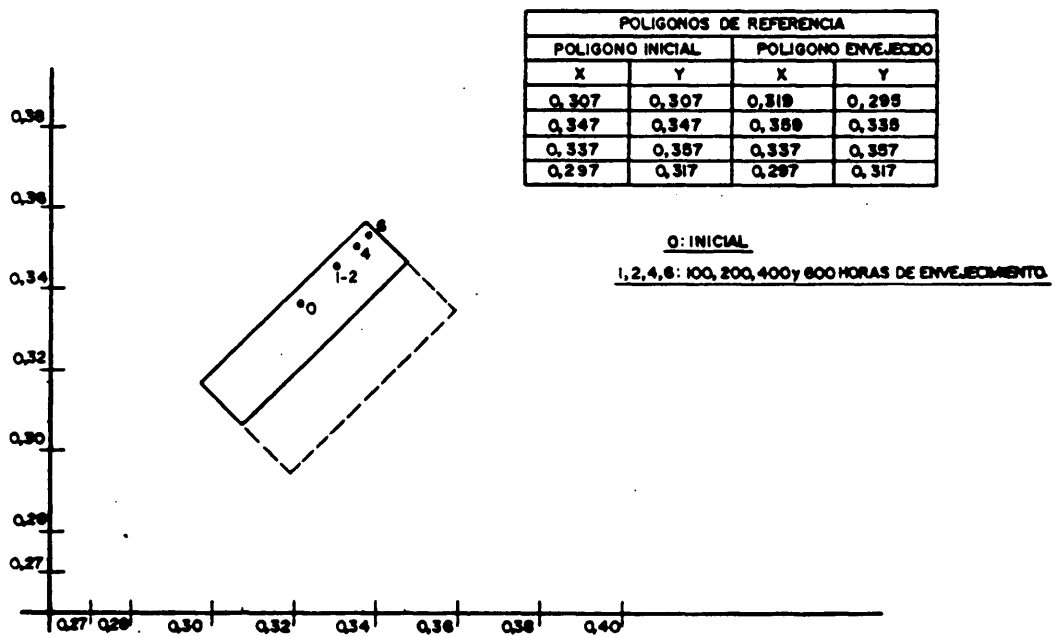


Fig.8.46 Coordenadas cromáticas correspondientes al material plástico en frío, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "Atlas".

Como puede observarse, todos los materiales estudiados sufren la misma variación situándose todos los valores de sus coordenadas cromáticas, excepto para el termoplástico en caliente, dentro del polígono definido.

El material termoplástico, a partir de las 400 h de envejecimiento acelerado, se sitúa fuera del polígono de color tomado como referencia, por lo que, desde el punto de vista de su estabilidad de color, es el que posee el peor comportamiento.

De esta manera, tal y como ocurría en el caso de la aplicación sobre probeta bituminosa y con el fin de poder comprobar de forma fiable la estabilidad del color de éstos materiales frente al envejecimiento acelerado en equipo "Atlas", se recomienda un periodo de 400 h para poder apreciar las diferencias que tienen lugar en las coordenadas cromáticas de los distintos materiales.

Así, atendiendo a la estabilidad frente al envejecimiento en equipo "Atlas" los materiales seleccionados pueden ordenarse, cuando se aplican sobre hormigón, de la siguiente manera: AL ≡ DC ≡ ACR > SP.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.47 se ha representado la variación, con el tiempo, de la retrorreflexión de cada material seleccionado, de la misma forma que se hizo en probetas bituminosas, durante el proceso de envejecimiento.

Como puede observarse, independientemente del valor inicial de la retrorreflexión, ésta permanece prácticamente constante durante todo el envejecimiento para todos los materiales estudiados. la causa de este comportamiento puede ser, tal y como se ha comentado anteriormente, la ausencia de abrasión producida por el tráfico sobre la superficie de la marca vial.

Por lo tanto, el envejecimiento en equipo "Atlas" cuando se aplican los materiales sobre probetas de hormigón no tiene influencia alguna en el valor de la retrorreflexión.

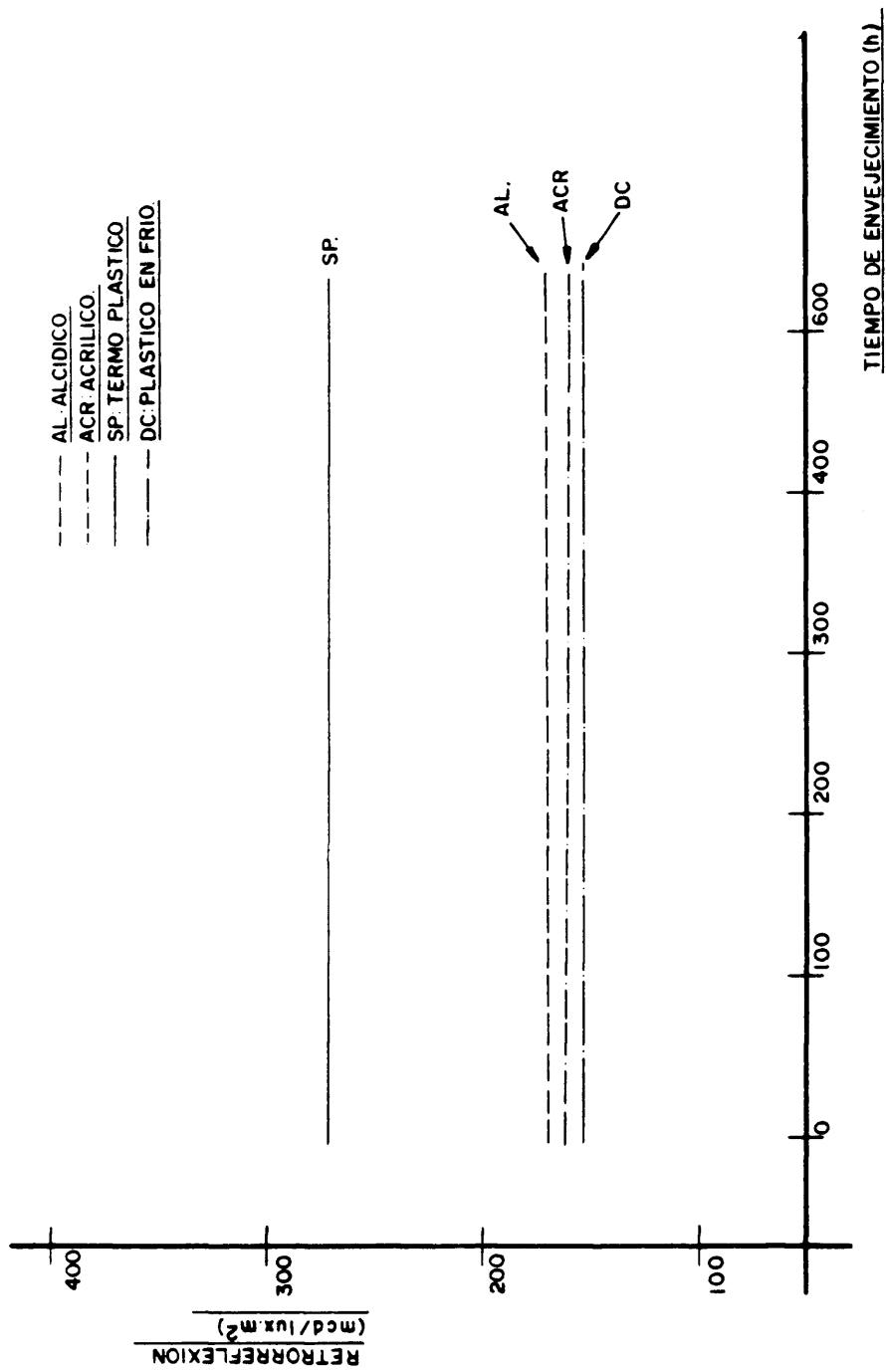


Fig.8.47 Variación de la retrorreflexión, sobre probeta de hormigón, en función de las horas de envejecimiento.

II. ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO EN EQUIPO "UV".

II.1. SOBRE PROBETA BITUMINOSA.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.48 se ha representado la variación del factor de luminancia, para cada material ensayado, en función del tiempo de envejecimiento artificial al que fueron sometidas las probetas de dichos materiales.

Como puede observarse todos los materiales ensayados, excepto el de tipo alcídico, presentan el mismo comportamiento disminuyendo en las 100 h iniciales el valor del factor de luminancia alrededor de un 40%, con respecto al valor inicial, para mantenerse durante el resto del ensayo.

En el caso del material alcídico, y como consecuencia del sangrado, el valor inicial del factor de luminancia era claramente inferior al de los otros materiales seleccionados por lo que la variación de éste fue mínima durante el ensayo. Así, en este material, a pesar de que la variación del factor de luminancia tenía lugar durante las primeras cien horas del ensayo, a diferencia con los demás, ésta era solamente del 15% aproximadamente.

Por último, de acuerdo con los resultados obtenidos, los materiales seleccionados pueden clasificarse según su estabilidad frente al envejecimiento en equipo "UV", de mejor a peor, según la siguiente secuencia: ACR, SP, DC, AL.

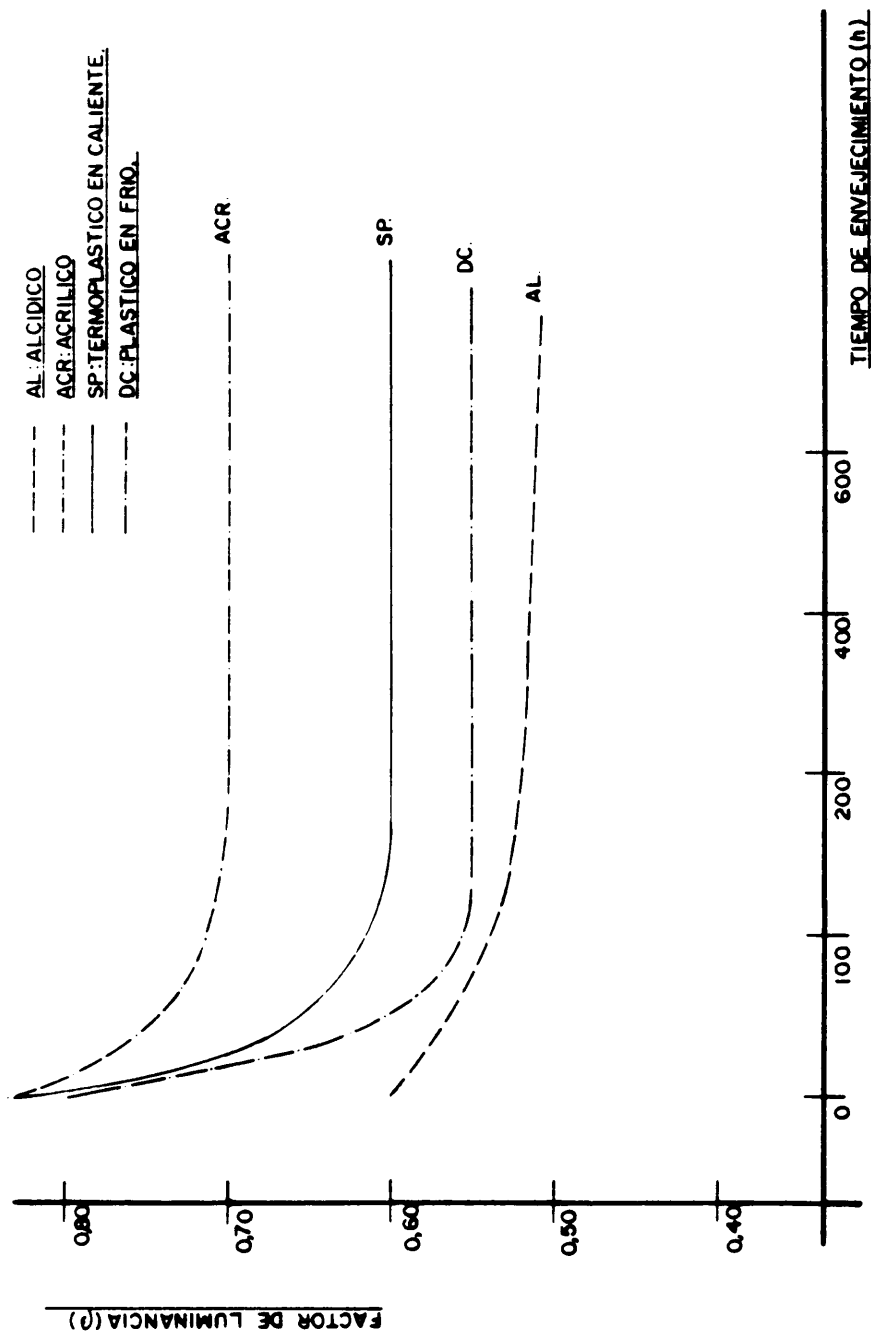


Fig.8.48 Variación del factor de luminancia, sobre probeta bituminosa, en función de las horas de envejecimiento.

VARIACION DE LAS COORDENADAS CROMATICAS.

En las figuras-8.49 a 8.52 se han representado, en el diagrama CIE de color, las coordenadas cromáticas obtenidas para cada material envejecido durante 600 h.

POLIGONOS DE REFERENCIA			
POLIGONO INICIAL		POLIGONO ENVEJECIDO	
X	Y	X	Y
0,307	0,307	0,319	0,295
0,347	0,347	0,359	0,335
0,337	0,357	0,337	0,357
0,297	0,317	0,297	0,317

0: INICIAL

1,2,4,6: 100, 200, 400y 600 HORAS DE ENVEJECIMIENTO.

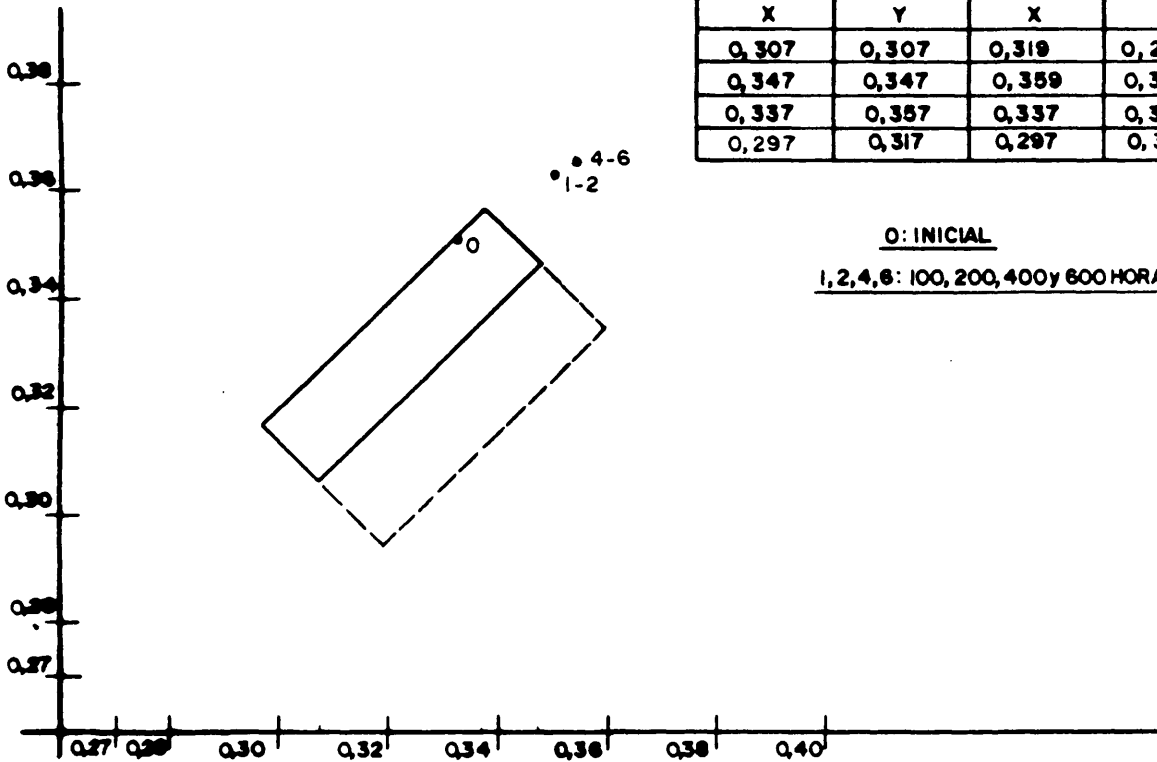


Fig.8.49 Coordenadas cromáticas correspondientes al material alcídico, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 hen equipo "UV".

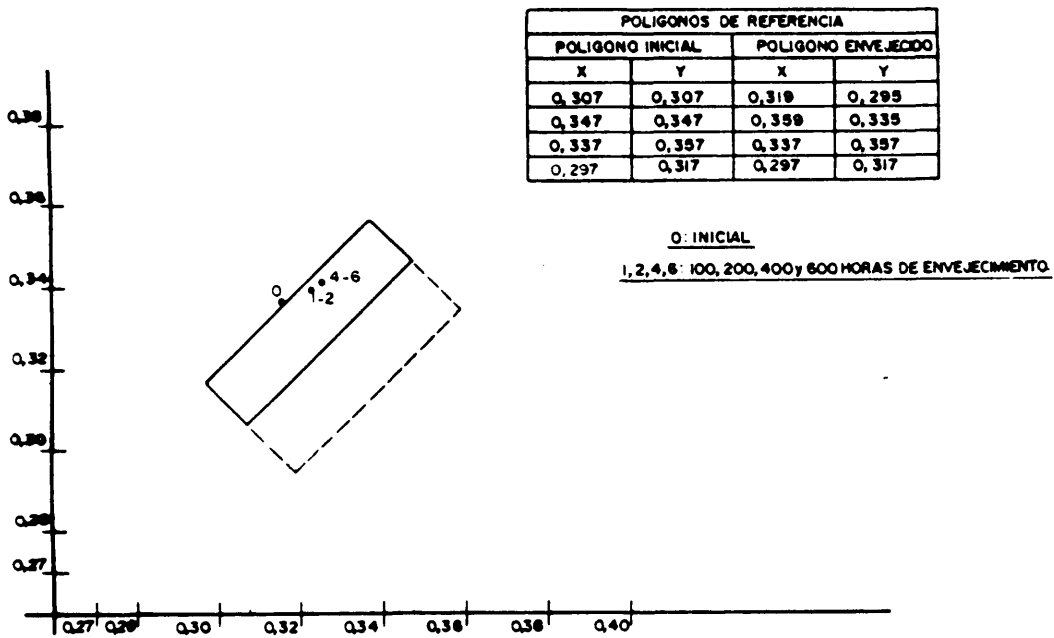


Fig.8.50 Coordenadas cromáticas correspondientes al material acrílico, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

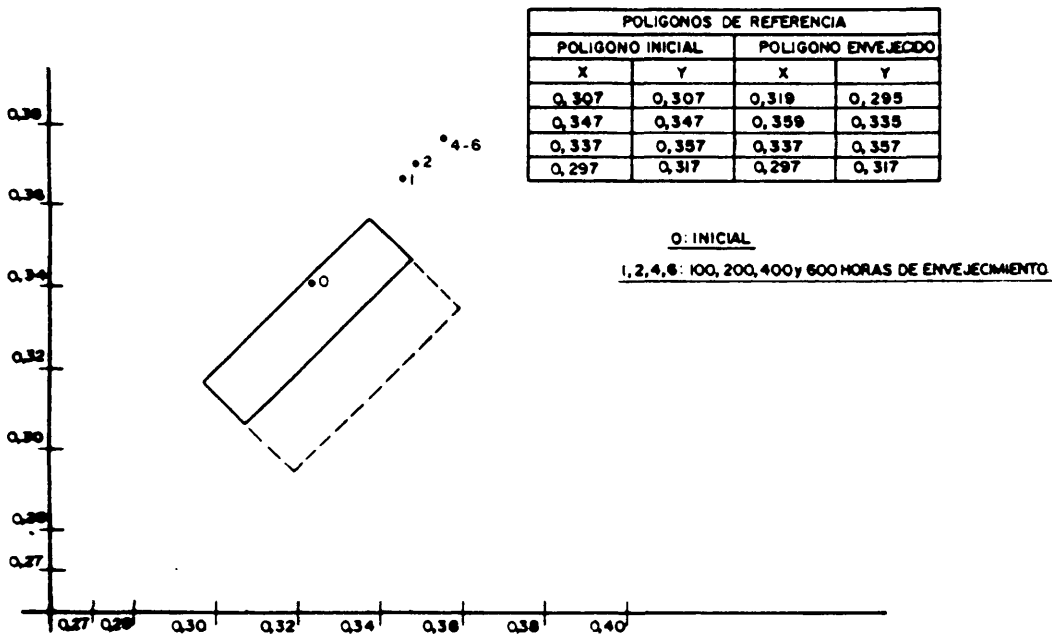


Fig.8.51 Coordenadas cromáticas correspondientes al material termoplástico en caliente, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido 600 h en equipo "UV".

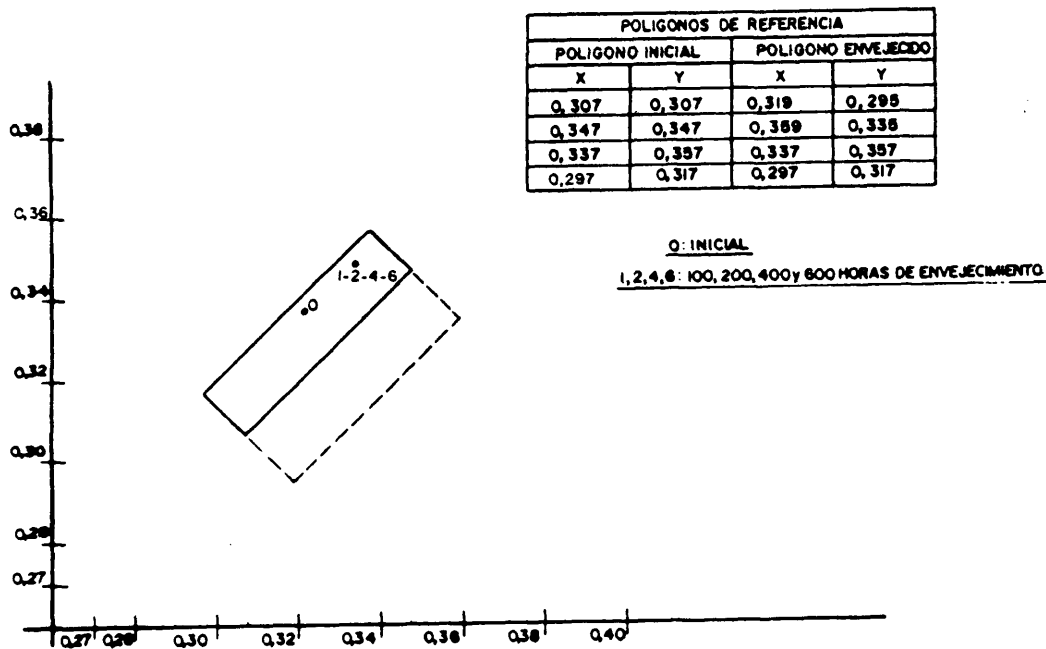


Fig.8.52 Coordenadas cromáticas correspondientes al material plástico en frío, aplicado sobre probeta bituminosa, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

Como puede observarse los cuatro materiales seleccionados muestran tendencia al amarilleamiento a medida que aumenta el número de horas de envejecimiento. No obstante, dicha variación es importante, cuantitativamente, en el caso de los materiales alcídico y termoplástico en caliente y a penas inexistente en los de base acrílica (plástico en frío y acrílica termoplástica). A partir de las 100 horas iniciales, los materiales de referencia AL y SP poseen valores de sus coordenadas cromáticas que se sitúan fuera del polígono de color definido mientras que los de referencia ACR y DC, nunca abandonan el mencionado polígono.

De esta manera y de acuerdo con los resultados obtenidos, los materiales seleccionados pueden ordenarse, en cuanto a la calidad, según la siguiente secuencia:
 ACR ≡ DC >> AL ≡ SP.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.53 se ha representado, de la misma forma que se hizo al tratar el envejecimiento en equipo "Atlas", la variación de la retrorreflexión de cada material seleccionado ajustándose a una función constante los valores obtenidos.

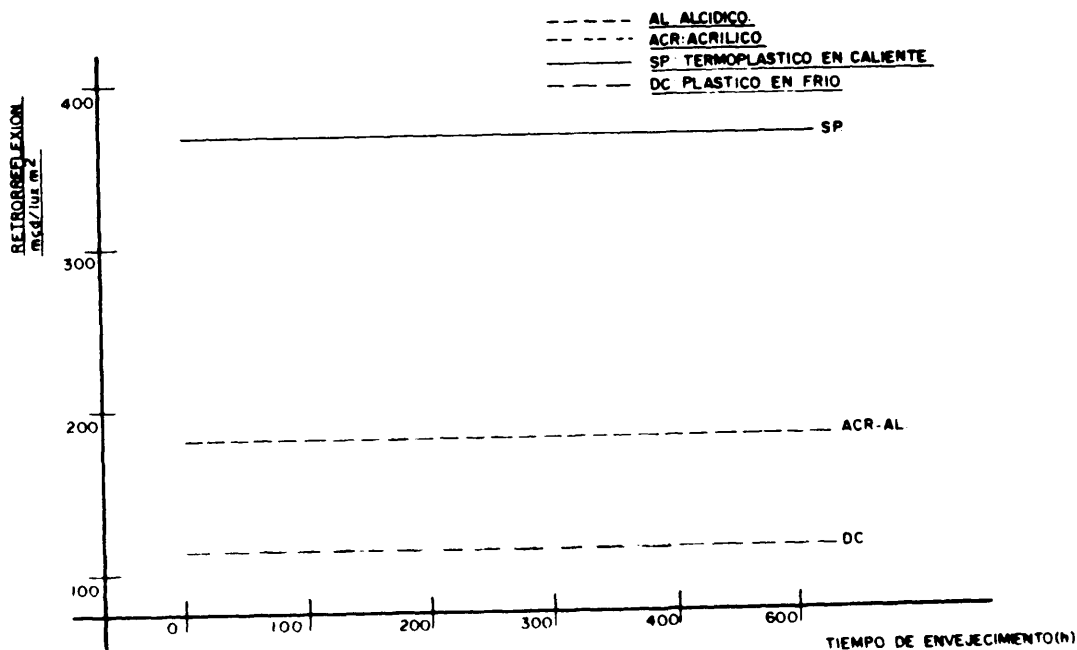


Fig.8.53 Variación de la retrorreflexión, sobre probeta bituminosa, en función de las horas de envejecimiento.

Como se observa al igual que en los casos anteriores, la retrorreflexión permanece constante en todos los materiales seleccionados cuando se aplican sobre probetas bituminosas y se someten a envejecimiento artificial en equipo "UV".

II.2. SOBRE PROBETA DE HORMIGON.

VARIACION DEL FACTOR DE LUMINANCIA (β).

En la figura-8.54 se ha representado la variación del factor de luminancia para cada material seleccionado, en función del tiempo de envejecimiento artificial al que se sometieron las probetas.

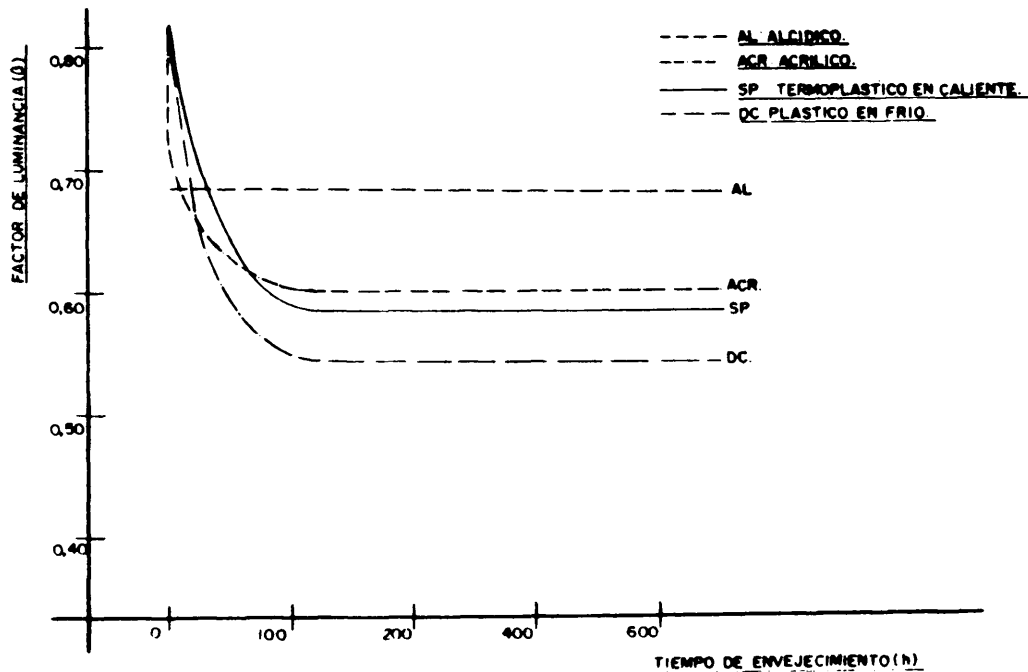


Fig.8.54 Variación del factor de luminancia, sobre probeta de hormigón, en función de las horas de envejecimiento.

Como puede observarse todos los materiales, excepto el de tipo alcídico, se comportan de la misma forma partiendo de valores elevados del factor de luminancia (superiores a 0.85) para disminuir, bruscamente, en las primeras cien horas de envejecimiento manteniéndose dicho valor final prácticamente sin variación. La disminución que tiene lugar en el valor del factor de luminancia, para estos materiales, es de un 40% aproximadamente.

En el material alcídico no existe una variación apreciable del valor del factor de luminancia durante el ensayo, por lo que éste material, a pesar de no poseer un valor inicial del mismo tan elevado como los otros tres materiales, es el único de los ensayados que se muestra estable frente a la acción del envejecimiento artificial en equipo "UV".

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, con el fin de poder observar la influencia de éste tipo de envejecimiento sobre los cuatro materiales seleccionados, bastará con un periodo de 100 h.

Por último, los materiales seleccionados pueden ordenarse atendiendo a su estabilidad de color cuando se aplican sobre probetas de hormigón; la secuencia, en este caso sería: AL >> ACR ≡ SP > DC.

VARIACION DE LAS COORDENADAS CROMATICAS.

En las figuras-8.55 a 8.58 se han representado, en el diagrama CIE de color, las coordenadas cromáticas obtenidas en cada material envejecido durante 600 h.

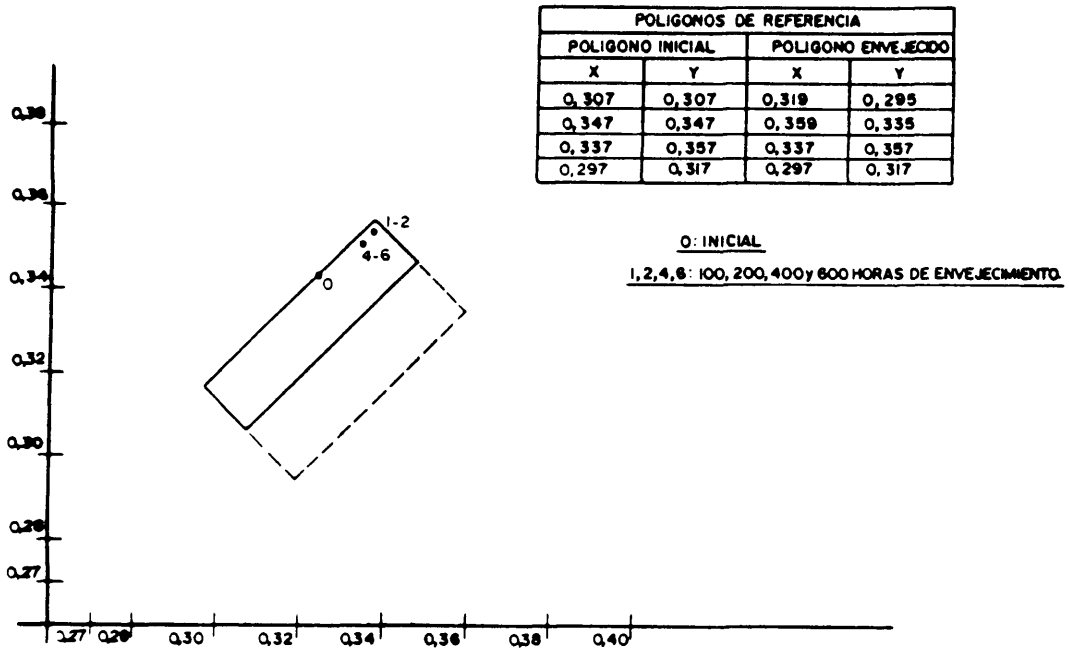


Fig.8.55 Coordenadas cromáticas correspondientes al material acídico, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

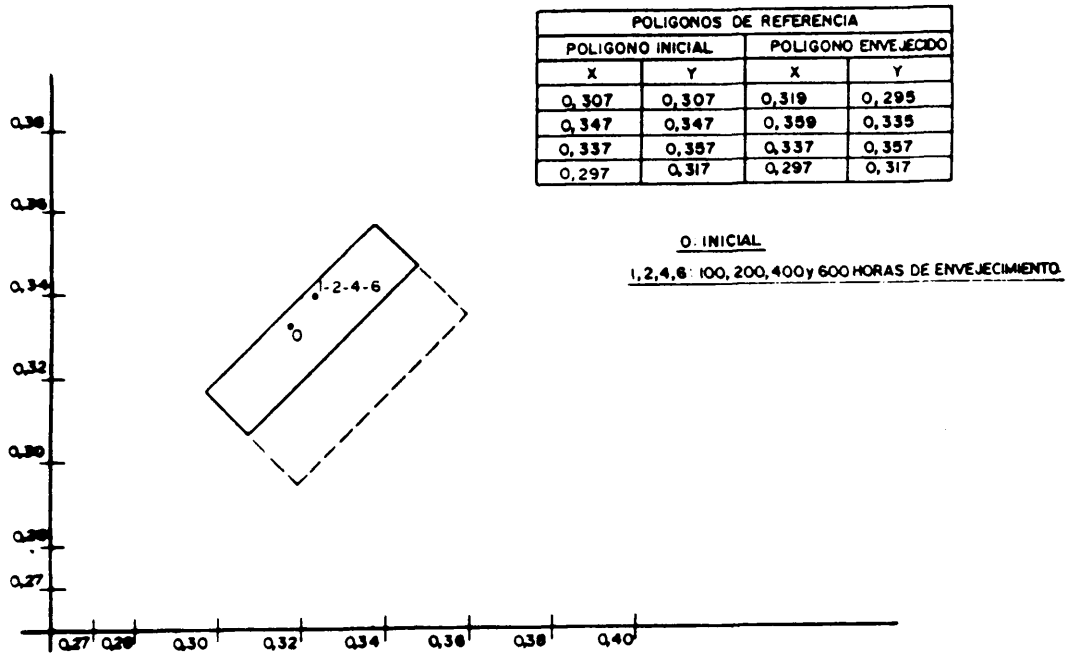


Fig.8.56 Coordenadas cromáticas correspondientes al material acrílico, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

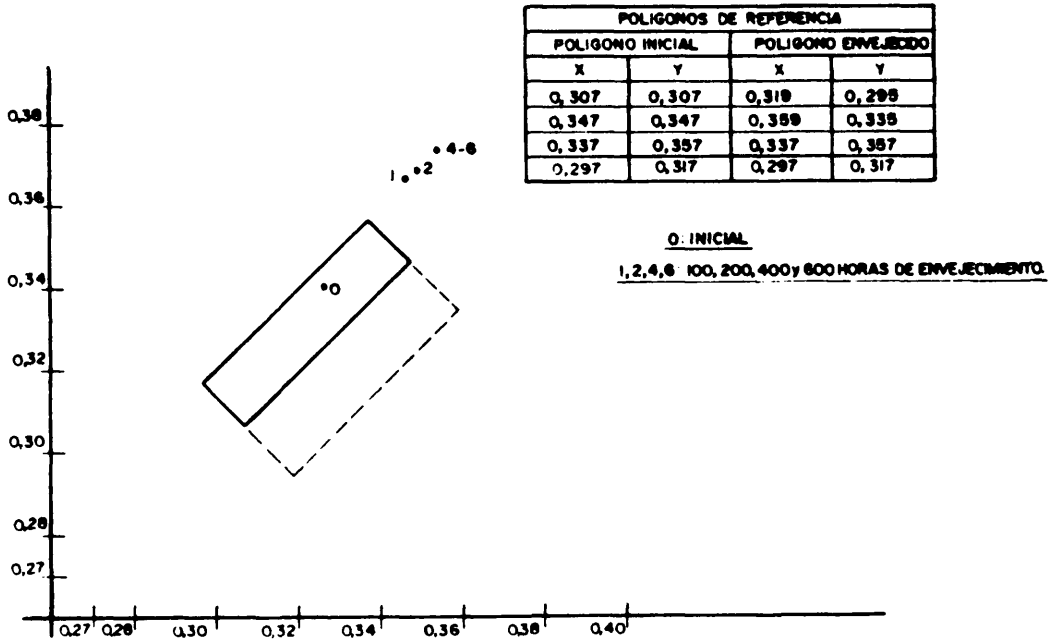


Fig.8.57 Coordenadas cromáticas correspondientes al material termoplástico en caliente, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

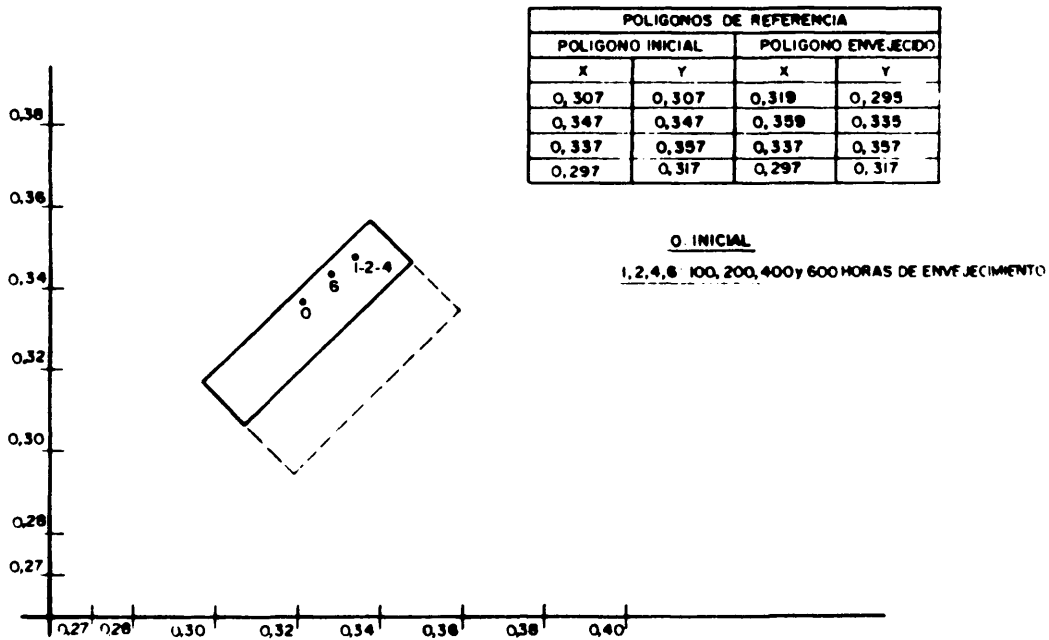


Fig.8.58 Coordenadas cromáticas correspondientes al material plástico en frío, aplicado sobre probeta de hormigón, antes y después de ser envejecido durante 600 h en equipo "UV".

Como puede observarse todos los materiales estudiados, excepto el termoplástico en caliente, presentan la misma tendencia al amarilleamiento; sus coordenadas cromáticas no abandonan, en ningún momento, el polígono de referencia. Por el contrario el material de referencia SP, aunque también muestra tendencia al amarilleamiento, ésta es mucho más acusada que en los otros tres materiales seleccionados, abandonando sus coordenadas cromáticas, a partir de las primeras 100 h de envejecimiento, el polígono de referencia.

Así, clasificando los materiales seleccionados, de acuerdo con su estabilidad de color cuando se aplican sobre probetas de hormigón, de mejor a peor se obtendría:
ACR ≡ DC ≡ AL >> SP.

VARIACION DE LA RETRORREFLEXION.

En la figura-8.59 se ha representado la variación de la retrorreflexión de cada material seleccionado ajustándose los valores obtenidos a una función constante.

Como se puede observar al igual que en los casos anteriores y como consecuencia de la ausencia de abrasión, la retrorreflexión permanece constante en todos los materiales seleccionados.

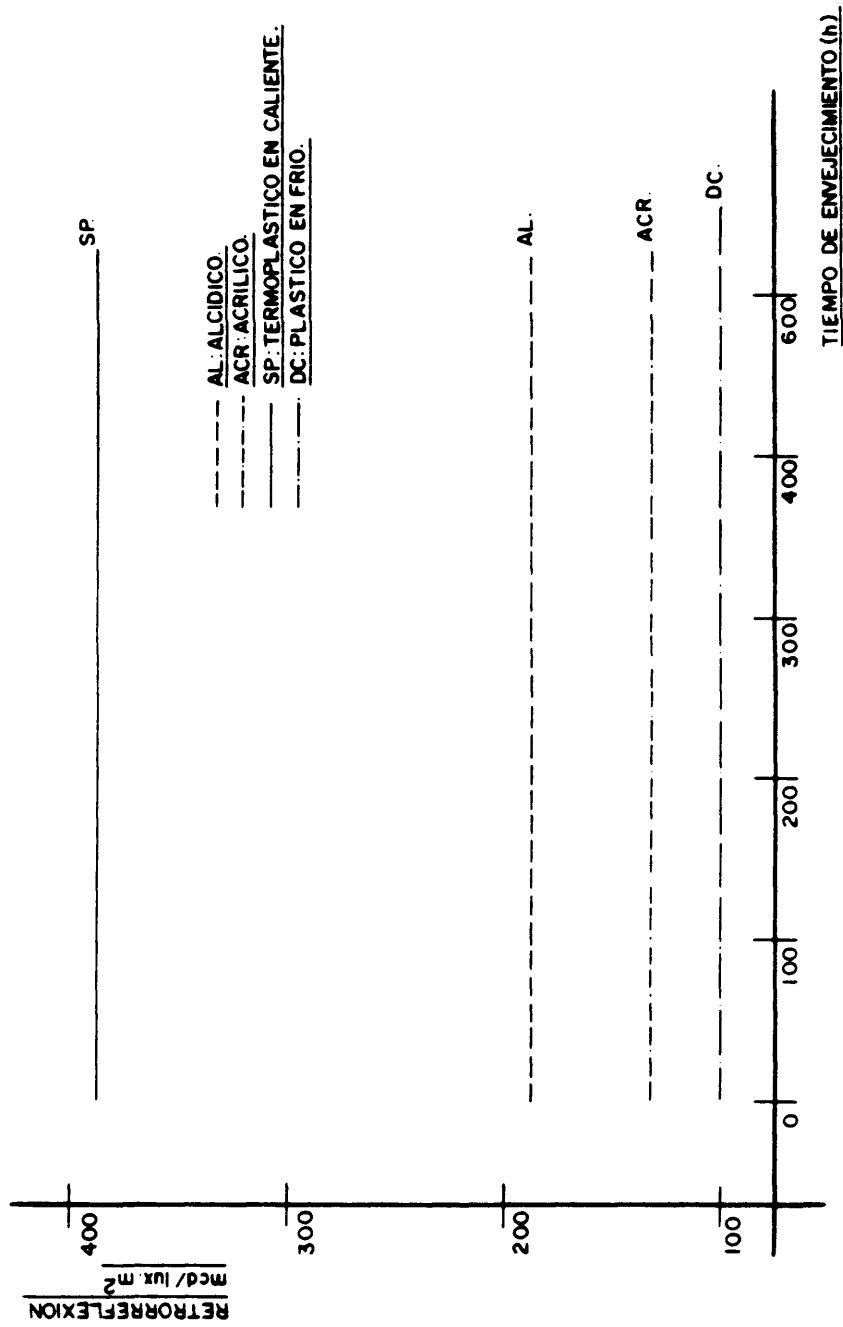


Fig.8.59 Variación de la retrorreflexión, sobre probeta de hormigón, en función de las horas de envejecimiento.

9. CONCLUSIONES.

- 1.- En todos los materiales ensayados es imprescindible la elección de un conjunto de pigmentos y cargas que sea capaz de conjugar una adecuada absorción de radiación UV con una capacidad de autolimpieza de la superficie del material aplicado (caleo) para así, por un lado, proteger el ligante y por otro, obtener una superficie lo más blanca posible en todo momento. De esta manera, la utilización de cargas de tipo cuarzo en combinación con sulfatos de bario y carbonatos de calcio, así como la utilización del pigmento, dióxido de titanio, conjuntamente en sus dos formas cristalinas (anatasa y rutilo), resultó ser la combinación más adecuada a la hora de formular dichos materiales.

- 2.- Resulta imprescindible la aplicación previa de unos criterios de laboratorio, concisos y breves, que permitan realizar la selección de los materiales. De esta manera, el control del tiempo de secado, del factor de luminancia y de la resistencia al sangrado son criterios que determinan el comportamiento de las pinturas convencionales. Por otro lado, la dureza "Persoz", el factor de luminancia y el "tiempo de gel", y por su parte el punto de reblandecimiento, la resistencia al flujo y el factor de luminancia, son criterios válidos para determinar el comportamiento de los materiales de larga duración: termoplástico de aplicación en caliente y plástico de aplicación en frío, respectivamente.

- 3.- En los materiales basados en ligantes reactivos (plástico en frío de dos componentes) es fundamental, para la obtención de una elevada calidad del material una vez aplicado, la selección de un sistema de curado adecuado que dé lugar, dependiendo de la temperatura a la cual vaya a tener lugar la reticulación, al valor más elevado posible de dureza "Persoz" con un "tiempo de gel" tal que permita una cómoda puesta en obra de los mismos. De esta manera, de las combinaciones ensayadas, la de relación 1:1 (peróxido de benzoilo:acelerante) es la que mejor resultado proporciona. La naturaleza del acelerante deberá

escogerse según el "tiempo de gel" deseado y la temperatura de reticulación, destacando como acelerantes, para una temperatura dada, la N,N-dihidroxietil-p-toluidina (EPT) para "tiempos de gel" cortos y la N,N-dimetil-p-toluidina (NL 65-100) para tiempos largos.

- 4.- En los materiales termoplásticos de aplicación en caliente es necesaria la adición de polimeros de bajo peso molecular para aumentar el valor del punto de reblandecimiento y de la resistencia al flujo de estos materiales, sin modificar su viscosidad a la temperatura de aplicación.
- 5.- En campo, el comportamiento de los materiales seleccionados en lo que a factor de luminancia se refiere, depende del tipo de pavimento así como de la naturaleza del material. De esta manera, a pesar de que sobre firme bituminoso los materiales de tipo convencional siguen una ley de variación diferente a los de larga duración (SP), el valor final del factor de luminancia así como su disminución con respecto al valor inicial coincide en los tres tipos de materiales ensayados (AL, SP, ACR). Por su parte, los materiales estudiados, independiente de su naturaleza, sobre firme de hormigón, siguen la misma ley de variación del factor de luminancia si bien el valor final del mismo es función del tipo de material.
- 6.- En campo, el comportamiento de los materiales seleccionados en lo que a la variación de la retrorreflexión se refiere, es independiente del tipo de pavimento en el caso de materiales de larga duración mientras que en pinturas convencionales, dependerá del tipo de sustrato. Así, el valor de la retrorreflexión de las pinturas convencionales, sobre pavimento flexible, disminuye durante los seis primeros meses para aumentar entre el sexto y décimo segundo mes, disminuyendo a partir de este período de forma irreversible. Por otro lado el valor de la retrorreflexión de estos materiales, sobre firme rígido, siempre disminuye sin mostrar puntos de inflexión.

Por su parte, la variación de la retrorreflexión en el caso de los materiales de larga duración sigue una ley diferente a la de los anteriores aumentando dicha propiedad durante los seis primeros meses para disminuir, posteriormente, de forma irreversible.

- 7.- De acuerdo con los resultados obtenidos en campo los materiales seleccionados pueden ordenarse, atendiendo a su mejor comportamiento sobre cada tipo de firme, de acuerdo con las siguientes secuencias:
 - Sobre firme bituminoso: ACR > SP >> AL
 - Sobre hormigón: ACR > DC
- 8.- Sobre firme rígido, tanto el material termoplástico en caliente como el alídico no son recomendables salvo que se utilice una imprimación adherente, que haga de interfase, evitándose el contacto directo de los mismos con la base.
- 9.- En todos los materiales ensayados una vez aplicados en campo e independientemente de la naturaleza del pavimento, el factor de luminancia disminuye al hacerlo la retrorreflexión no encontrándose, por su parte, una relación entre el valor inicial de la retrorreflexión y el valor final del factor de luminancia. No obstante, sí se pudo observar que la disminución del valor de dicha propiedad era más brusca mientras más elevado fuese el valor inicial de la retrorreflexión.
- 10.- La influencia del envejecimiento artificial sobre el color de los materiales debe evaluarse a través del factor de luminancia y de las coordenadas cromáticas, siendo necesario un periodo de tiempo de 400 horas cuando éste se lleve a cabo con doble arco de carbón y de 100 horas cuando se realice con equipo UV.

- 11.-El comportamiento de los materiales ensayados, en lo que a factor de luminancia se refiere, es independiente del procedimiento de envejecimiento artificial acelerado utilizado así como del tipo de sustrato. De esta manera, en los materiales de referencia ACR, SP y DC, se ha observado una disminución del mencionado factor del 40% aproximadamente, mientras que en el de tipo alcídico como máximo fue del 15%, teniendo lugar dichas variaciones durante las primeras 100 horas de envejecimiento.

- 12.-Los materiales sometidos a ensayo, en lo que a coordenadas cromáticas se refiere, dependen tanto del equipo de envejecimiento artificial acelerado elegido como del tipo de sustrato. De esta manera y para ambos equipos de envejecimiento, sobre firme rígido solo las coordenadas cromáticas del material de referencia SP abandonan el polígono definido mientras que en pavimentos bituminosos, las coordenadas cromáticas que abandonan el polígono de referencia son las correspondientes a los materiales AL y SP.

- 13.-En todos los casos ensayados en laboratorio no se apreció variación en la retrorreflexión por lo que dicho procedimiento experimental no es útil a la hora de estudiar los efectos del tipo de pavimento sobre los materiales seleccionados.

- 14.-No ha sido posible obtener relación alguna, en lo que a retrorreflexión se refiere, entre los resultados obtenidos a nivel de campo y de laboratorio como consecuencia de la falta de abrasión, producida por el tráfico rodado, en este último caso.

10. BIBLIOGRAFIA.

- 1.- BLANCO, M. "Pliego de prescripciones técnicas de los materiales a utilizar en la señalización horizontal de carreteras sobre pavimentos de hormigón". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid (1988).
- 2.- "Importance of roadway markings and delineation". World Highways, vol II, nº 1, pp 13-17 (1984).
- 3.- ENGLEWOOD, C. "Roadway signs and markings". Prentice Hall Inc. New Jersey (1984).
- 4.- "The role of delineation". Potters Industry Inc. Washington (1985).
- 5.- "Recent changes to the manual on uniform traffic control devices". ITE Journal, vol I, nº 8, pp 26 (1985).
- 6.- HISS, J. "Pavement marking paints". State Department of Transportation. New York (1969).
- 7.- BROOKS, J. "Pavement marking practices report". Federal Highway Administration. Washington (1986).
- 8.- WARD, A. "Federal highway safety program effectiveness". Potters Industry Inc. Washington (1986).
- 9.- GODTHELP, H y MORSAL, J. "Studies on vehicle guidance and control". Transport Research Board (TRB). Washington (1985).
- 10.- UPCHURCH, J. "Changes to the manual on uniform traffic control devices". ITE Journal, vol VI, nº 3, pp 40-42 (1986).
- 11.- SHAPIRO, P, LOEWEN, J, SIARUSAITIS, V y UPCHURCH, J. "Identification of needed traffic control device research". Transport Research Board (TRB). Washington (1987).
- 12.- WILLIS, P, SCOTT, P y BARNES, J. "Road edgelineing and accidents". Transport Research Road Laboratory (TRRL). London (1984).
- 13.- "UK charter for an european road safety". TEC Journal, vol II, nº 2, pp 85 (1986).

- 14.- LUNDKVIST, O. y NILSSON, B. "The specific luminance of road marking-variation depending on the season". VTI Medd Journal, vol I, nº 467, pp 15-18 (1985).
- 15.- HOFFMANN, G y FIRTH, B. "Retro-reflective measurement devices for pavement markings". Federal Highway Administration. Washington (1985).
- 16.- MARQUES, M y SEABRA, A. "Estudo de tintas para marcas rodoviarías". Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Lisboa (1986).
- 17.- "Prescriptions techniques additionnelles et directives des marquages routiers". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris (1987).
- 18.- ORTEGA, J, BLANCO, M y CUEVAS, A. "La protección con la pintura del acero estructural". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid (1986).
- 19.- CHAMPETIER, G y RABATE, H. "Chimie des peintures, vernis et pigments". 1ª Edición, vols I y II. Editorial Dunod. Paris (1956).
- 20.- VON FISCHER, W. "Paint and varnish technology". Reinhold Corporation. New York (1948).
- 21.- PARKER, D. "Tecnología de los recubrimientos de superficie". Enciclopedia de la Química Industrial, 1ª Edición, Tomo 7. Editorial Urmo. Bilbao (1970).
- 22.- CHATFIELD, H. "The science of surface coatings". Van Nostrand Corporation Inc. London (1962).
- 23.- SWARAJ, P. "Surface coatings". 2ª Edición. Editorial John Wiley. New Dehli (1985).
- 24.- ROBERTS, A. "Organic coatings". National Bureau of Standards. Washington (1968).
- 25.- TURNER, G. "Introduction to paint chemistry and principles of paint technology". 2ª Edición. Editorial Chapman and Hall. London (1988).
- 26.- NAVARRO, A, BLANCO, M y RICO, E. "Materiales ópticos orgánicos". 1ª Edición. Editorial AAAEO. Madrid (1989).
- 27.- SOLOMON, D. "The chemistry of organic film formers". 1ª Edición. Editorial John Wiley. New York (1985).

- 28.- BLANCO, M. "Seguimiento de los materiales aplicados sobre hormigón". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid (1989).
- 29.- MORRISON y BOID. "Química Orgánica". 3ª Edición. Editorial Fondo Educativo Interamericano. Bogotá (1976).
- 30.- "Surface coatings". 2ª Edición, vol I. Editorial Chapman and Hall. London (1983).
- 31.- QUIS, P. "Study of monomers for road marking materials". Spektrum, vol II, nº 35, pp 54-56 (1990).
- 32.- "Thermoplastische markierungen". Gespo GmbH. Berlin (1984).
- 33.- "A model performance specification for the purchase of thermoplastic and preformed plastic pavement marking materials". ITE Journal, vol III, nº 3, pp 13-15 (1985).
- 34.- REIDT, W. "Methacrylatharze für fahrbahnmarkierungen". Kunststoffe im Bau, vol I, nº 1, pp 36 (1985).
- 35.- REIDT, W. "Perspektiven 1987 für kaltplasticmarkierungen". Symposium DSGS. Hoenroda (1987).
- 36.- HESS, M. "Paint film defects. Their causes and cure". 1ª Edición. Editorial Chapman and Hall. London (1965).
- 37.- POCKSTEINER, G y GROBWANG, H. "Lösungsmittelfreie strabenmarkierungsmaterialen mit einer funktionsdauer". Bundesministerium Bauen u Technik. Wien (1987).
- 38.- WILEY, P. "Pigment handbook". 1ª Edición, vol I. Editorial Patton. New York (1973).
- 39.- DEKKER, M. "Treatise on coatings". 1ª Edición, vol III. Editorial Myers and Long. New York (1980).
- 40.- WILEY, P. "Paint flow and pigment dispersion". 2ª Edición. Editorial Patton. New York (1979).
- 41.- COLLIER, C. "Paint technology manuals". 1ª Edición, vol IV. Editorial Chapman and Hall. London (1965).
- 42.- SWARD, G. "Paint testing manual". National Bureau of Standards. Washington (1972).

- 43.- MARSDEN, C y MANN, S. "Solvents guide". 1ª Edición. Editorial Cleavener-Hume. Copenhagen (1985).
- 44.- RIDDICK, J y BUNGER, W. "Techniques of chemistry". 2ª Edición, vol II. Editorial Patton. New York (1970).
- 45.- "Paint and surface coatings: theory and practice". 1ª Edición. Editorial Ellis Horwood. Chichester (1987).
- 46.- EDWIN, J. "Principles of spheric reflectorization". Prismo Safety Corporation. Huntingdon (1966).
- 47.- DE JAIFFE, R. "Demonstration of optical properties of glass beads". potters Industry Inc. New Jersey (1985).
- 48.- STEINMAN, J y LOWE, J. "Silane glass beads". Federal Highway Administration. Washington (1985).
- 49.- CRUMPTON, C y Mc CASKILL, G. "Glass beads in paint". Federal Highway Administration. Washington (1972).
- 50.- CABRERA, J y O'FLANERTY, C. "Durability of reflectorised road marking". Highway Engineer, vol XX, nº 4, pp 21-24 (1973).
- 51.- DALE, J. "Traffic marking beads". Better Roads, vol XXIX, nº 1, pp 16-21 (1969).
- 52.- "Microesferas de vidrio a emplear en marcas viales reflexivas". Plego de Prescripciones Técnicas Generales del Ministerio de Obras Públicas (FG-3). Madrid (1975).
- 53.- HISS, J. "Pavement marking paints". Department of Transportation. New York (1969).
- 54.- DE JAIFFE, R. "Retroreflectivity-wet and dry". Potters Industry Inc. Washington (1986).
- 55.- "National accident sampling system". Transport Research Board (TRB). Washington (1984).
- 56.- KRAUZE, D. "Etude de la signalisation horizontale-visibilité de nuit par temps de pluie de marquages expérimentaux appliqués en rive sur chaussée circulee". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris (1984).
- 57.- GORKUM, F. "La visibilité de nuit de sept produits de marquage routière". Routes et des Aerodromes, vol III, nº 4, pp 7-15 (1984).

- 58.- NIESSNER, C. "Wet night thermoplastic study in Georgia". Transport Research Board (TRB). Washington (1987).
- 59.- DAVIS, T. "Evaluation of temporary day-night visible raised pavement marker adequacy". Transport Research Board (TRB). Washington (1986).
- 60.- WOLTMAN, H. "Pavement markings and road signs give help to older drivers". World Highways, vol II, nº 6, pp 25 (1986).
- 61.- BRYDEN, J y CORINI, R. "Traffic paint performance in accelerated wear-tests". Transport Research Board (TRB). Washington (1987).
- 62.- PLAZA, L. "Especificación de colores. Sistema CIE-1931". Instituto de Optica Daza de Valdés (CSIC). Madrid (1953).
- 63.- CASTILLO, F y BLANCO, M. "Importancia de la medida del color en la seguridad vial". Ingeniería Civil, vol II, nº 76, pp 99-110 (1990).
- 64.- JUDD, D. "Problemas actuales del color". 1ª Edición. Editorial Alhambra. Madrid (1954).
- 65.- HARDY, A. "Hand book of colorimetry". 1ª Edición. Editorial The Technology Press. New York (1936).
- 66.- PLAZA, L. "Colorimetría". Acero y Energía, vol III, nº 17, pp 25-30 (1961).
- 67.- Publicación CIE, nº 13.2 (1974).
- 68.- Publicación CIE, nº 15.2 (1986).
- 69.- "Annual book of ASTM standards". 5ª Edición, vol VI.01. Editorial Wilbury. Philadelphia (1990).
- 70.- Publicación CIE, nº 54 (1982).
- 71.- Publicación CIE, nº 15 (1971).
- 72.- Publicación CIE, nº 39 (1978).
- 73.- Publicación CIE, nº 39.2 (1983).

- 74.- SORENSEN, K. "Optical methods for the measurement of road markings, road signs and road surfaces". Lysteknisk Laboratorium (LTL). Copenhagen (1986).
- 75.- NIESSNER, C. "Correlation study-subjective versus instrumental evaluation of pavement marking retroreflection". Transport Research Board (TRB). Washington (1987).
- 76.- ETHEN, J y WOLTMAN, H. "Minimum reflectance for night time visibility of pavement markings". 3 M Industry. Saint Paul (1985).
- 77.- "Reflection properties of road markings in head light illumination". Lysteknisk Laboratorium (LTL). Copenhagen (1982).
- 78.- "Reflection properties of road surfaces". Lysteknisk Laboratorium (LTL). Copenhagen (1986).
- 79.- Publicación CIE, nº 28 (1986).
- 80.- Publicación CIE, nº 30.2 (1982).
- 81.- Publicación CIE, nº 54 (1982).
- 82.- OBRO, P y SORENSEN, K. "A portable instrument for the measurement of road reflection properties". Lysteknisk Laboratorium (LTL). Copenhagen (1976).
- 83.- Publicación CIE, nº 66 (1985).
- 84.- BLANCO, M. "El envejecimiento de los materiales ópticos orgánicos". Ver y Oír, vol XIV, nº 2, pp 17-21 (1985).
- 85.- DECKER, C. "Degradation and stabilitation". 1ª Edición. Editorial Elsevier Applied Science. Amsterdam (1984).
- 86.- OGORKIEWCZ, R. "Termoplásticos: influencia de los procesos de transformación en sus propiedades". 1ª Edición. Editorial IPC. Madrid (1975).
- 87.- DAVIS, A y SIMS, D. "Weathering of polymers". 2ª Edición. Editorial Applied Science. London (1983).
- 88.- Publicación MELC, nº 13.14 (1990).
- 89.- BRYDEN, J y CORINI, R. "Traffic paint performance in accelerated wear-test". Transport Research Board (TRB). Washington (1987).

90.1.- "Pliego de prescripciones técnicas de los materiales a utilizar en la señalización horizontal de carreteras sobre pavimentos de hormigón". Vol III. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid (1988).

90.2.- "Pliego de condiciones de la señalización horizontal de carreteras sobre pavimentos flexibles". Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid (1990).

**ANEXO: METODOS DE ENSAYO DE LAS PROPIEDADES DE LOS
MATERIALES TERMOPLASTICOS DE APLICACION EN CALIENTE.**

**ENSAYO-I. VISCOSIDAD ZAHN A TEMPERATURA DE FUSION
(180°C).**

1. DEFINICION.

Por viscosidad Zahn, se entiende el tiempo que transcurre hasta vaciarse por su orificio inferior la copa del mismo nombre, llena del material fundido, a una temperatura dada.

2. PROCEDIMIENTO OPERATORIO.

El ensayo, se lleva a cabo con la copa Zahn número 6 (capacidad, 44 ml y diámetro del orificio, 6 mm) cuyo esquema está representado en la figura-I.1.

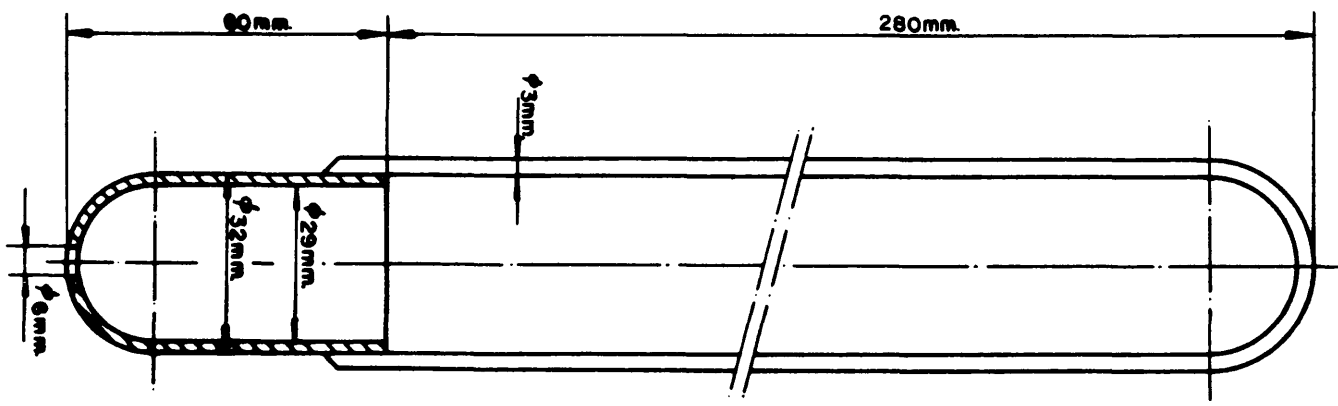


Fig. I.1 Copa Zahn número 6.

Para la realización del ensayo se funde el material a la temperatura de 180°C llenando y enrasando a continuación, la copa. Durante el proceso de llenado debe mantenerse tapado el orificio inferior de la misma.

ENSAYO-II. DETERMINACION DEL INDICE DE TIXOTROPIA.

1. DEFINICION.

Indice de tixotropía es el valor, en grados centígrados, de la diferencia entre las temperaturas a las que debe estar el material para obtener una viscosidad en copa Zahn número 6 de 20 segundos, operando sin y con agitación.

2. INTERPRETACION.

Para considerar el material apto, la mencionada diferencia de temperaturas deberá ser como máximo de 30°C.

ENSAYO-III. FLEXION. TEMPERATURA MINIMA DE NO ROTURA.

1. DEFINICION.

Es la temperatura mínima, en °C, que soporta, sin romper, una probeta estándar del material sometida en su centro geométrico a una carga continua.

2. PROCEDIMIENTO OPERATORIO.

Se prepara una probeta de material de dimensiones: 3*30*100 mm (espesor*ancho*longitud). A continuación, se

sitúa la probeta en la mesa de ensayos sujetándola por dos puntos de apoyo, tal y como se indica en la figura-III.1.

Una vez situada la probeta, se coloca en su centro geométrico una esfera de acero de 9.53 mm de diámetro y 3.50 g de masa.

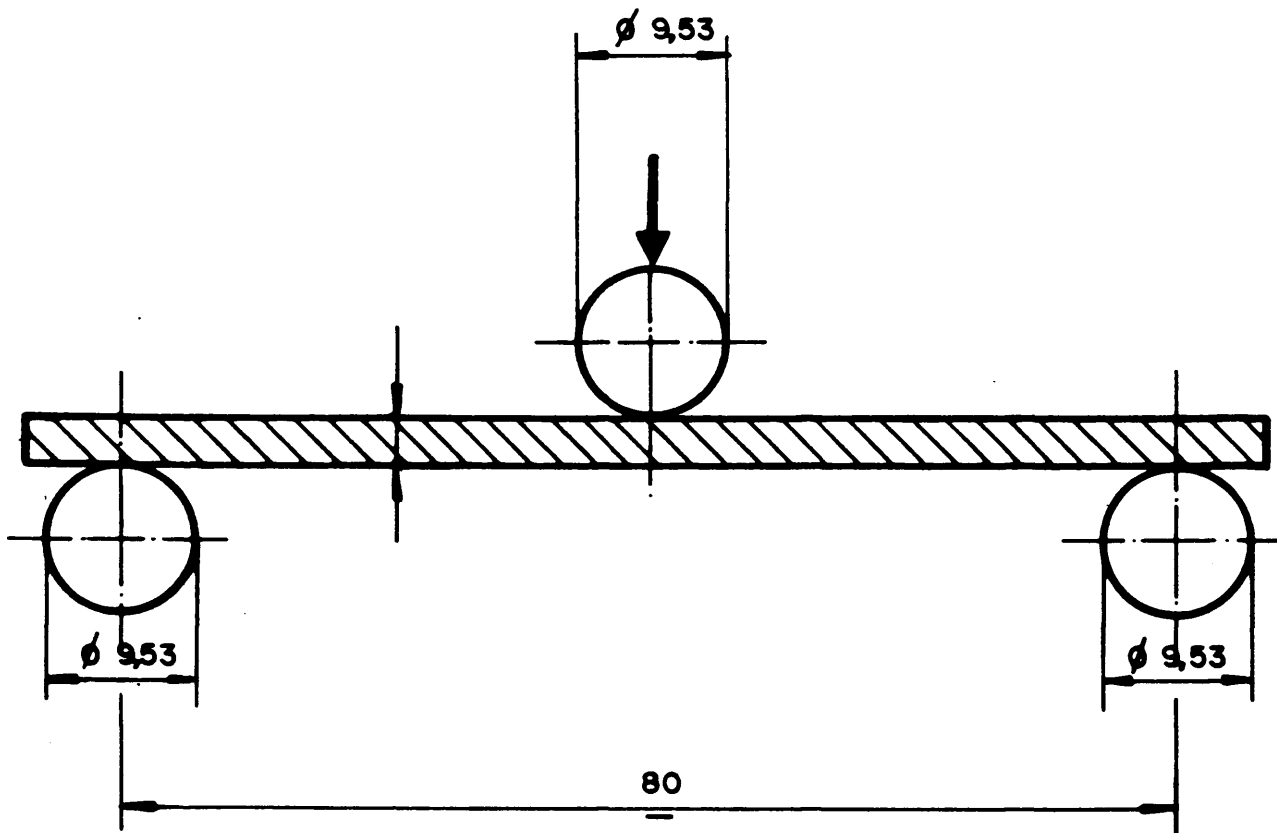


Fig.III.1 Esquema del ensayo de flexión.

A continuación, se determina la temperatura inicial del material y se procede a aplicar, sobre la esfera, una carga continua tal que someta al material a una deformación constante a razón de 2 mm/min. Al cabo de 1 min, si el material no rompe, se deja que recupere, a temperatura ambiente (23 20C), su posición inicial, durante 1 h. A continuación, se disminuye la temperatura de la probeta en 50C y se repite el ensayo de carga. Si el material no rompe, una vez dejado reposar, se disminuirá la temperatura otros 50C, y así sucesivamente hasta determinar la "mínima temperatura de rotura" que será, la inmediata anterior a la de rotura.

3. INTERPRETACION.

Dicho ensayo es una forma de determinar la capacidad que tienen los materiales termoplásticos de aplicación en caliente, de admitir deformaciones, en las condiciones más desfavorables (bajas temperaturas), donde su flexibilidad se ve muy disminuida.