



**REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS
INDUSTRIALES.**

REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES.

Índice	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. TIPOS DE INSTALACIONES.....	4
3. PARÁMETROS DEL PAVIMENTO QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LAS CARRETILLAS.....	4
4. MÉTODOS PARA EVALUAR LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.....	8
4.1. MÉTODOS TRADICIONALES CON REGLAS.....	9
4.1.1 REGLA FIJA DE TRES METROS.....	9
4.1.2 REGLA RODANTE DE TRES METROS.....	11
4.1.3 ESPECIFICACIONES CON REGLAS.....	12
4.2. EL SISTEMA DE NÚMEROS F.....	13
4.2.1 NÚMEROS F_F Y F_L PARA TRÁFICO ALEATORIO.....	13
4.2.2 NÚMEROS F_{MIN} PARA TRÁFICO GUIADO.....	17
4.3. MÉTODO DE LA TR34.....	19
4.3.1 TR34 PARA TRÁFICO ALEATORIO.....	20
4.3.2 TR34 PARA TRÁFICO GUIADO.....	23
4.3.3 TR34-APÉNDICE C: TRÁFICO GUIADO.....	24
4.4 EQUIVALENCIA ENTRE NÚMEROS F Y VALORES TR34.....	27
4.4.1 EQUIVALENCIAS EN TRÁFICO ALEATORIO.....	27

4.4.2 EQUIVALENCIAS EN TRÁFICO GUIADO.....	28
4.5. NORMA DIN.....	29
5. EQUIPOS DE MEDIDA.	31
6. FACTORES QUE AFECTAN A LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.	33
6.1. PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA OBRA.....	33
6.2. CALIDAD Y SUMINISTRO DEL HORMIGÓN.....	34
6.3. COLOCACIÓN DE ENCOFRADOS.....	35
6.4. MAQUINARIA, HERRAMIENTAS Y MÉTODOS.	35
7. PAVIMENTOS SUPER PLANOS.	37
8. COMO ESPECIFICAR LA REGULARIDAD SUPERFICIAL. .	38
9. ARREGLOS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.....	40
10. REFERENCIAS.....	41
ANEJO N° 1. EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS CON NÚMEROS F. (RESUMEN DE LA NORMA ASTM E 1155M – 96).....	43
OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	43
DEFINICIÓN.....	43
RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO.....	44
EQUIPO DE ENSAYO.....	44
ORGANIZACIÓN DE LA SUPERFICIE.....	44
CÁLCULOS.....	45

REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES.

1. INTRODUCCIÓN.

El grado con que la superficie de un pavimento se aproxima a la teórica de proyecto se conoce como regularidad superficial. Este término es especialmente utilizado en carreteras en donde la superficie del pavimento no es plana ni horizontal, aunque debe estar exenta de irregularidades superficiales. En instalaciones industriales, grandes superficies comerciales o en edificación, en donde los pavimentos, soleras, forjados, etc. deben ser planos y horizontales se utiliza coloquialmente el término “planeidad” para definir el grado de semejanza con el plano, y “horizontalidad” o “nivelación” su aproximación a la horizontal.

La regularidad superficial es uno de los parámetros que más afecta al funcionamiento de instalaciones industriales. Tal es el caso de almacenes de distribución en donde se almacenan, en estantes o apilados, bienes que se mueven con carretillas elevadoras; fábricas en donde se mueven cargas con rodamientos neumáticos (colchones de aire); estudios de cine o televisión; etc., en donde la regularidad superficial es de importancia singular. En otros establecimientos en los que la regularidad no sea crítica, si que es importante su control para asegurarse que al cliente se le proporciona la calidad que esté pagando.

Es importante reconocer que una superficie perfectamente plana no se puede conseguir y que los procedimientos que se utilizan para conseguir pavimentos planos o muy planos son más costosos que aquellos utilizados para conseguir una regularidad superficial normal. El proyectista debe conocer las tolerancias que son necesarias para el correcto funcionamiento de la instalación que diseña e incluirlas en las especificaciones técnicas. Unas tolerancias equivocadamente indulgentes producirán pavimentos inadecuados para el uso deseado y acarrearán costosos arreglos una vez acabada la obra. Por otra parte, tolerancias excesivamente estrictas normalmente encarecen innecesariamente las obras.

El sistema que se utilice para valorar la regularidad superficial debe estar bien elegido y definido. Si no existe un buen método para definir la regularidad superficial, se desconocerá si se está pagando lo justo por la calidad entregada; se producirán

disputas innecesarias entre la propiedad y la contrata; y será muy difícil establecer los arreglos necesarios y el responsable de ellos.

2. TIPOS DE INSTALACIONES.

Los tipos de instalaciones industriales son muy variadas y su descripción no es motivo de este escrito. En lo que afecta a la regularidad superficial conviene distinguir entre las que tienen un tráfico de vehículos con trayectorias determinadas, normalmente porque los vehículos están guiados por perfiles metálicos o por inducción magnética, que llamaremos instalaciones con tráfico definido o guiado; y las que tienen un tráfico vehicular o peatonal sin trayectorias determinadas. Las primeras suelen ser almacenes con estanterías de diversas alturas y con pasillos muy estrechos, normalmente de menos de dos metros de anchura. Las segundas, que constituyen la gran mayoría de las instalaciones, son de lo más diverso: desde almacenes en donde el tráfico es variable, hasta centros comerciales para tráfico peatonal, pasando por instalaciones deportivas, fábricas, estudios de cine y televisión, etc.

3. PARÁMETROS DEL PAVIMENTO QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LAS CARRETILLAS.

Antes de definir los sistemas de valoración de la regularidad superficial es conveniente conocer que elementos del pavimento afectan a la estabilidad y al funcionamiento de las carretillas elevadoras ya que éstas constituyen uno de los principales grupos que circulan por los pavimentos industriales.

Las carretillas elevadoras están diseñadas para operar a pleno rendimiento y con seguridad en pavimentos planos y horizontales. Si las condiciones del pavimento difieren de la horizontalidad, la estabilidad de la carretilla podría peligrar o la carga podría caerse por lo que sería necesario limitar su velocidad.

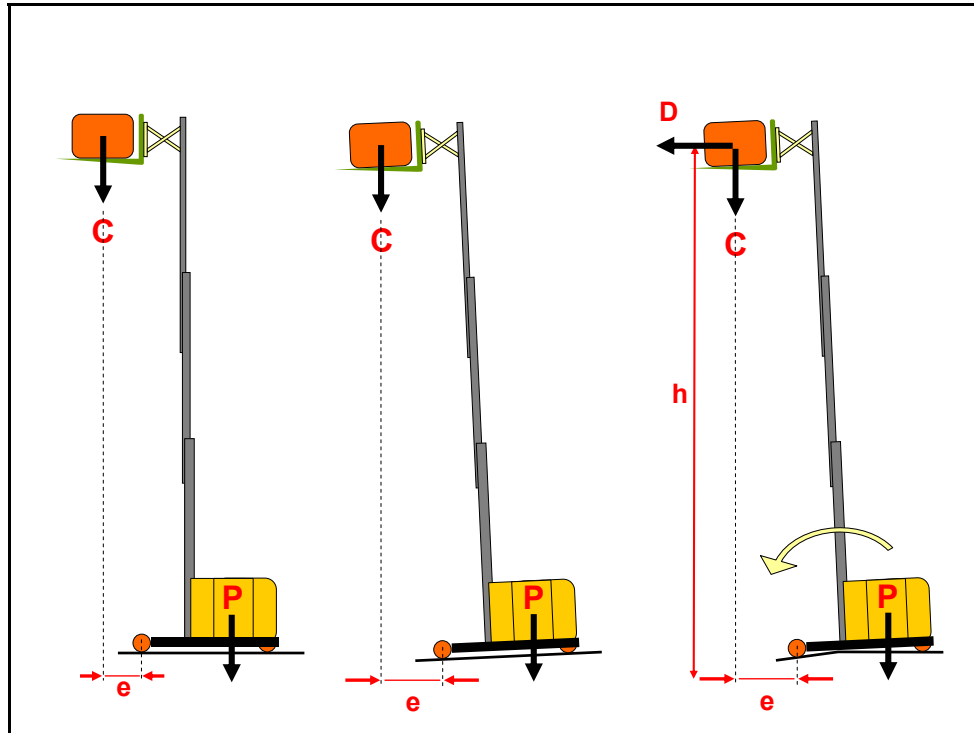


Fig. 1.- Estabilidad longitudinal de carretillas elevadoras.

Si la inclinación longitudinal del suelo es grande, las solas condiciones geométricas pueden hacer que el momento que produce la carga sea superior al momento producido por el contrapeso de la carretilla y producir el vuelco o la pérdida de carga. Si además la carretilla está en movimiento y existen variaciones en la inclinación del pavimento, se producirán movimientos de cabeceo que inducirán fuerzas dinámicas a la altura de la carga las cuales pueden incrementar ese riesgo de vuelco o pérdida de carga. Son por tanto, la inclinación longitudinal y la variación de esta inclinación dos parámetros fundamentales que afectan a la estabilidad y al rendimiento de las carretillas (Fig. 1).

Realizando un razonamiento similar con el posicionamiento transversal se concluiría que también la inclinación transversal del pavimento y su variación en el sentido de avance de la carretilla, que producirá movimientos de balanceo, también afectan a la estabilidad de ésta (Fig. 2).

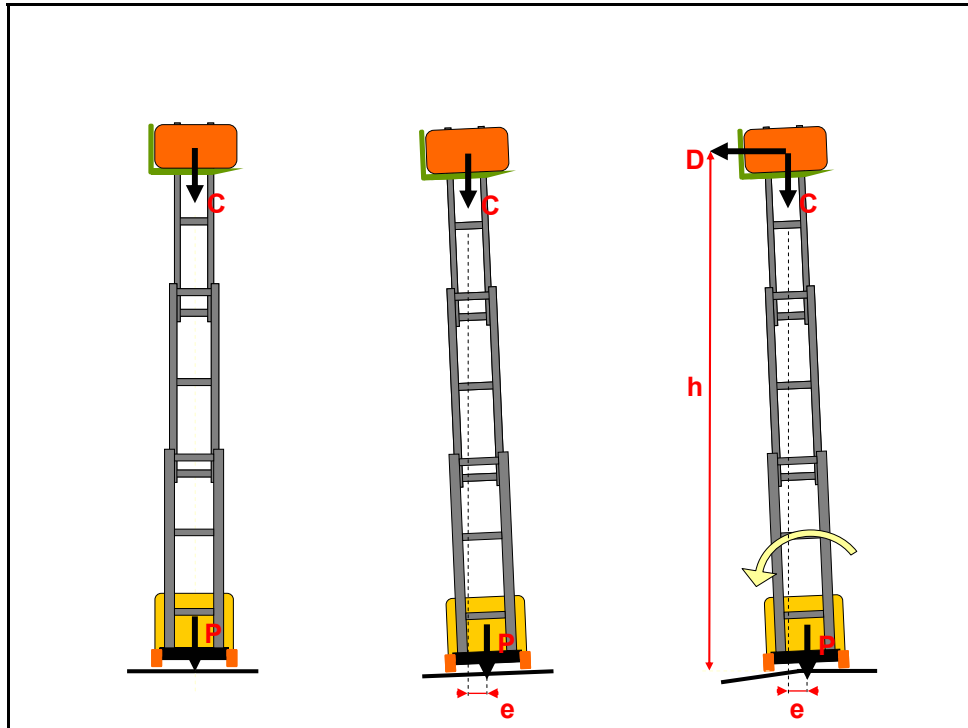


Fig. 2.-Estabilidad transversal de carretillas elevadoras.

En pasillos muy estrechos en donde el tráfico de vehículos es guiado, los condicionamientos no son sólo por motivos de estabilidad de la carretilla, sino por simples condiciones geométricas que influyen en el funcionamiento de la instalación.

En la figura 3 y en la tabla que la acompaña, se muestra como una pequeña inclinación horizontal del pavimento puede verse ampliamente incrementada en la parte alta del mástil. Si, además, el vehículo está en movimiento, se producirán fuerzas dinámicas horizontales en la parte superior y los desplazamientos laterales se verán duplicados o triplicados por la flexión del mástil y por las holguras que existan en las uniones de las piezas del mástil. En pavimentos en los que la regularidad superficial no sea buena, la inclinación transversal que exista en la base de la carretilla provocará colisiones de la carga o de la cabeza de la carretilla con las estanterías. Esto es particularmente importante, cuando el espacio libre entre la carga en la carretilla y los productos en las estanterías, es del orden de 100 o 150 mm, como suele ser habitual en almacenes con pasillos muy estrechos y tráfico guiado.

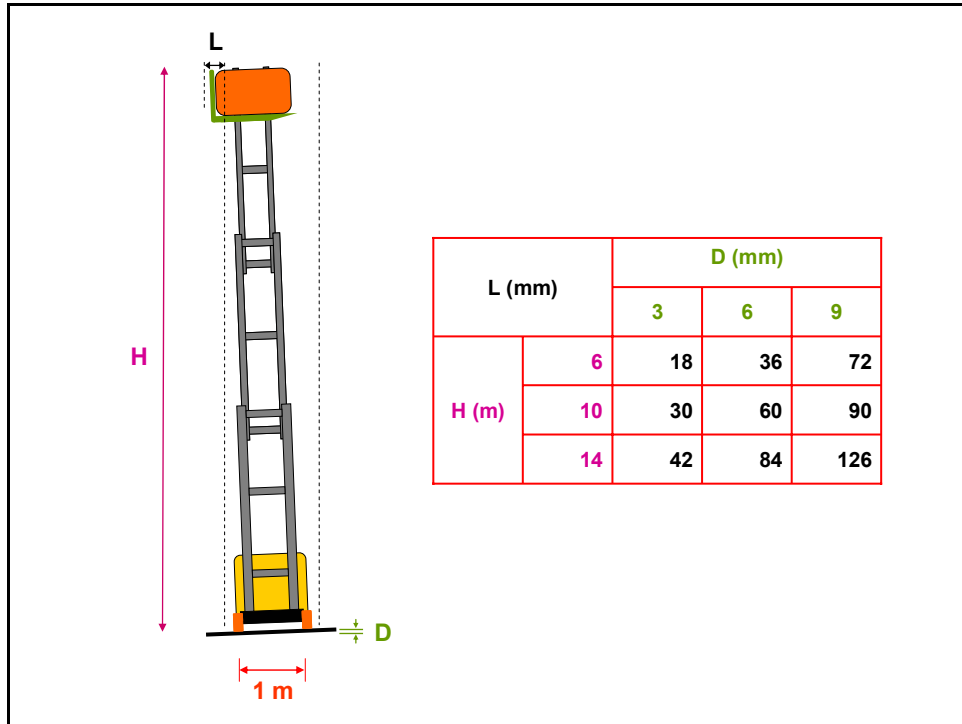


Fig. 3.-Efectos de la inclinación transversal en pasillos muy estrechos.

En resumen, en pasillos muy estrechos con tráfico guiado la inclinación transversal entre rodadas y su variación longitudinal, son los parámetros que más influyen y que tienen una importancia primordial en el funcionamiento de las carretillas.

En el resto de instalaciones con tráfico aleatorio y también, por supuesto, en las de tráfico guiado los parámetros del pavimento a considerar son (Fig. 4):

- Las inclinaciones longitudinales y transversales.
- Las variaciones de inclinación longitudinal y transversal en el sentido de marcha de las carretillas.

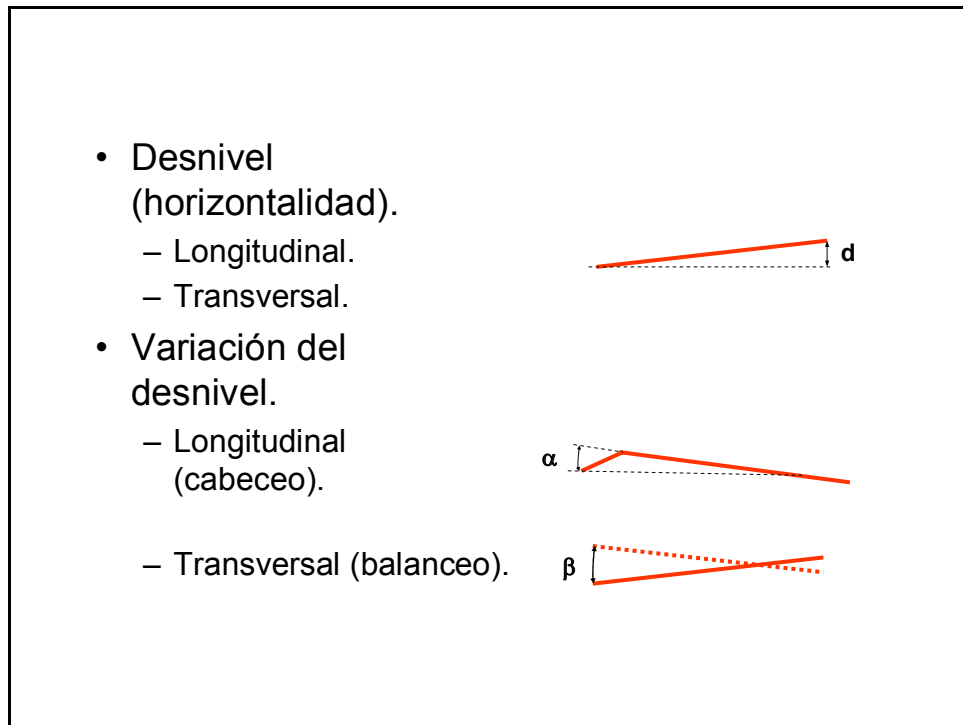


Fig. 4.-Parámetros del pavimento que afectan al funcionamiento de carretillas.

En instalaciones en donde el tráfico es aleatorio, los parámetros anteriores se pueden controlar conociendo la pendiente y la curvatura de las trayectorias por donde circularán los vehículos. Como estas trayectorias no son conocidas, es corriente realizar un muestreo utilizando diferentes sistemáticas, como se verá más adelante.

En instalaciones en donde el tráfico está guiado y las trayectorias de las carretillas son conocidas, la mejor opción para comprobar la regularidad superficial del pavimento es evaluando directamente los parámetros indicados en la figura 4 en las rodadas por donde circulan las carretillas.

4. MÉTODOS PARA EVALUAR LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.

Existen cuatro métodos para la evaluación de la regularidad los cuales se describen en los epígrafes siguientes. De ellos los más apropiados son los de los números F y los descritos en el informe TR34. Los métodos basados en reglas de tres metros (o de otras longitudes) y el método de la norma DIN, que se basa en la medida con reglas, presentan algunas deficiencias o inconvenientes y deberían emplearse con precaución.

4.1. MÉTODOS TRADICIONALES CON REGLAS.

Tradicionalmente, el método empleado para evaluar la calidad de la terminación de un pavimento, su “planeidad”, ha sido mediante reglas de diferente longitud, normalmente de tres metros. Se apoyaba la regla sobre la superficie y se medía el desnivel vertical entre la superficie del pavimento y la de la regla. La tolerancia especificada se debería cumplir en cualquier punto de la regla y con la regla colocada en cualquier posición del pavimento.

Se han utilizado reglas fijas y reglas rodantes, las primeras se han utilizado principalmente en obras de edificación y las segundas en obras de carretera.

4.1.1 REGLA FIJA DE TRES METROS.

La medida con regla fija se realiza colocando la regla sobre la superficie del pavimento, que queda apoyada en dos puntos altos, y midiendo los desniveles entre la regla y la superficie del pavimento con galgas u otros procedimientos.

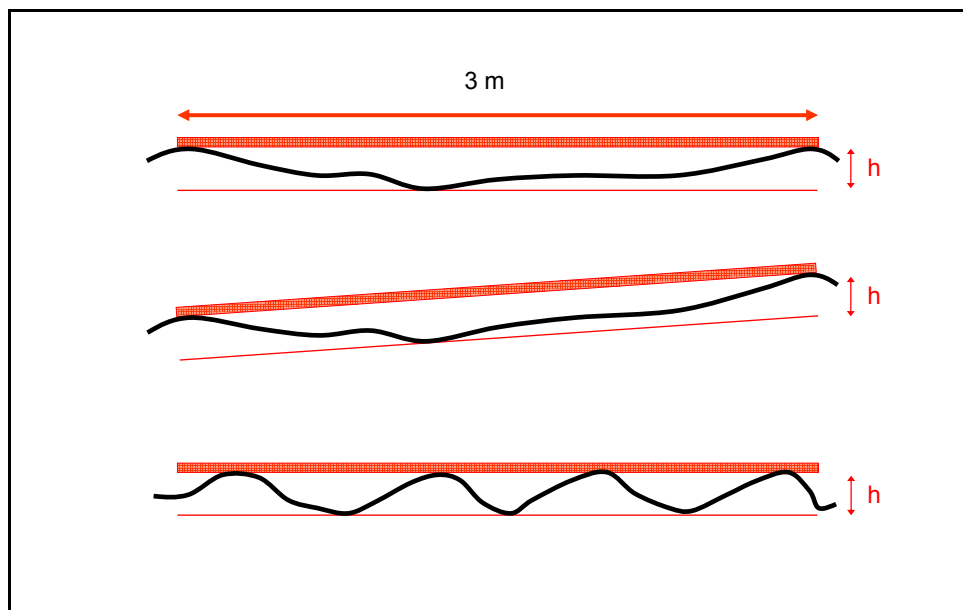


Fig. 5.- Desniveles con regla fija.

La utilización de las medidas con regla tiene tres inconvenientes: 1) la medida con regla no está sujeta a un ensayo normalizado en el que se explique como hay que hacer la medida, cuantas medidas y donde realizarlas; 2) el sistema no permite distinguir si el pavimento está horizontal o no; y 3) el método mide únicamente la

amplitud de la irregularidad pero no su longitud de onda, que tiene una importante incidencia en la circulación de vehículos (Fig. 5).

Con regla de tres metros, se da la circunstancia que pavimentos con terminaciones e irregularidades muy diferentes pueden cumplir las mismas tolerancias. Tal puede ser el caso de los pavimentos representados en la figura 6 en donde se recogen diferentes casos en los que la igualdad de medida con regla fija de tres metros no implica una regularidad superficial similar, como se demuestra con las valoraciones de números F_F (sistema mucho más apropiado y que se verá más adelante).

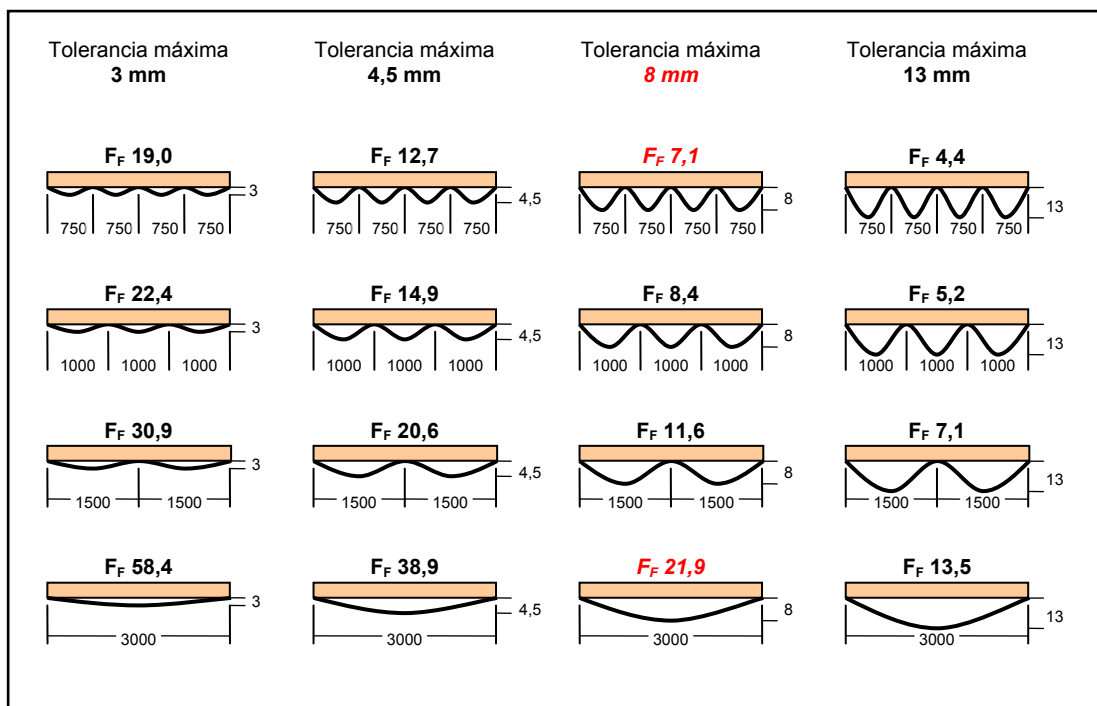


Fig. 6.- Diferentes casos de valoración con regla de tres metros.

En la figura 6 se observa como un pavimento muy irregular, como el de la columna tercera de la primera fila, con un número F_F 7,1 (muy malo), si se mide con regla de tres metros aparenta la misma calidad (8 mm) que otro bastante mejor, como el de la cuarta fila de la tercera columna, que tiene un número F_F 21,9.

El método de medida de la regla es complicado, ambiguo e imperfecto. Ni el procedimiento de medida, ni el de calibración, ni el número de ensayos o donde realizarlos está normalizado. En general, los ensayos no son repetibles, dando lugar a muchas discusiones entre propiedad y contratistas. En general, se desconoce la

calidad de los pavimentos en términos de regla de tres metros y normalmente se piensa que muchos pavimentos cumplen unas tolerancias que realmente no son tales.

4.1.2 REGLA RODANTE DE TRES METROS.

La regla rodante de tres metros, que posibilita un ensayo mucho más rápido que el de la regla fija, ha sido muy empleada para la valoración de la regularidad superficial de pavimentos de carretera. Actualmente no se utiliza pues presenta los mismos inconvenientes que la regla fija y alguno más.

El sistema consiste básicamente en un bastidor recto apoyado en dos ruedas extremas que marcan un plano de referencia y una rueda palpadora central con la que se mide el desnivel entre el plano de referencia y las irregularidades del pavimento. Al ir el mecanismo sobre ruedas se puede empujar a lo largo de la trayectoria medida y generar un gráfico de irregularidades medidas. El método está desarrollado en la norma NLT-334/87 (1).

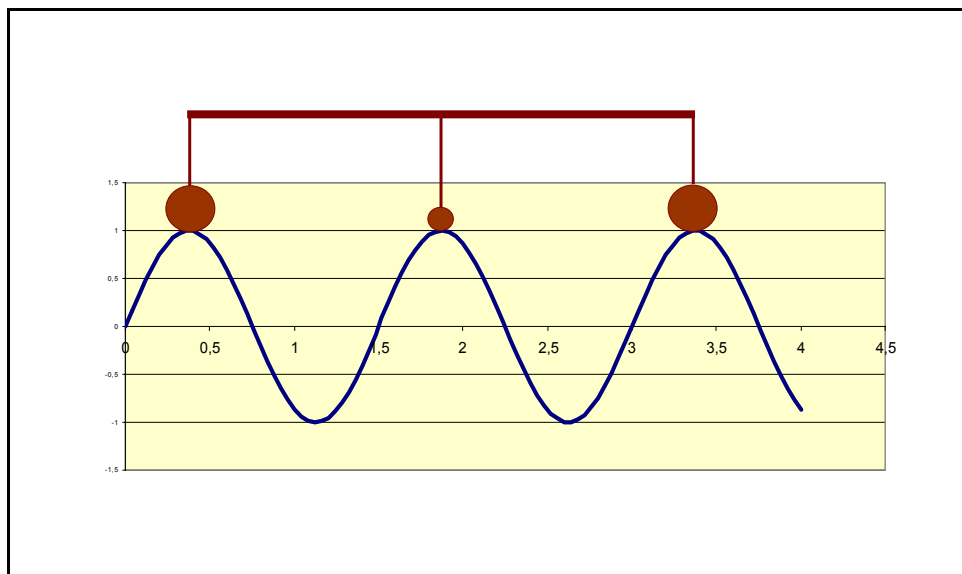


Fig. 7.-Regla rodante de tres metros.

Al estar basado el ensayo con regla rodante en la medida del desnivel entre regla y pavimento en el punto medio de la regla, cuando las irregularidades del pavimento están en fase con las ruedas de la regla, las tres ruedas siempre están en el mismo plano y no se miden irregularidades aunque éstas existan y puedan tener amplitudes importantes. Tal es el caso que se presenta en la figura 7 en donde las irregularidades

tienen una longitud de onda de 1,5 m y en otros en los que la longitud de las irregularidades sean divisores de tres metros (1,5; 0,75; 0,375; etc.).

4.1.3 ESPECIFICACIONES CON REGLAS.

En España se han utilizado especificaciones con regla tanto en pavimentos de carreteras como en solados. En carreteras el Pliego de Prescripciones Técnicas de Pavimentos de Hormigón Vibrado de la Dirección General de Carreteras especificaba que las irregularidades medidas con regla rodante de tres metros no fueran superiores a 3 mm, para velocidades de proyecto superiores a 100 km/h, ni a 4 mm, para velocidades de proyecto inferiores a 100 km/h (2). Actualmente la evaluación de la regularidad superficial en carreteras se realiza mediante el IRI (Índice de Regularidad Internacional), que solo es aplicable para pavimentos de carreteras y con restricciones en los de aeropuertos (3 y 4).

La norma NTE-RSS de soleras (5) y la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE (6), también establecen tolerancias de planeidad con una regla fija de tres metros, pero la EHE en 1999 en su anejo 10 de tolerancias ya indicaba que **“el método de la regla es muy imperfecto y hoy va siendo sustituido por la evaluación estadística de medidas de planeidad y de nivelación”**.

Aunque NO EXISTE UNA CORRELACIÓN DIRECTA entre números F y desniveles medidos con regla de tres metros, se presenta a continuación una tabla con equivalencias aproximadas, que puede servir de referencia.

Tabla 1.- Equivalencias aproximadas entre números F y regla de tres metros.

F_F	Desnivel con regla de tres metros
12	12 mm
20	8 mm
25	6 mm
32	5 mm
50	3 mm

El uso de las reglas para controlar la regularidad está desapareciendo, tanto en carreteras como en pavimentos industriales, y está dejando paso a sistemas más apropiados para valorar la terminación, que evitan ambigüedades y eliminan discusiones entre la propiedad y la empresa contratista.

4.2. EL SISTEMA DE NÚMEROS F.

4.2.1 NÚMEROS F_F Y F_L PARA TRÁFICO ALEATORIO.

La problemática anterior, con reglas, indujo al comité 117 del ACI (Instituto Americano del Hormigón) a iniciar, a finales de los años 1970, un estudio de las terminaciones superficiales que se conseguían en la construcción de pavimentos industriales. Se estudió el efecto de las irregularidades en los equipos de manutención en almacenes y se desarrolló un sistema de evaluación que mejorase el de la regla de tres metros (diez pies en el sistema americano). Como resultado de ese proyecto del ACI se adoptó el sistema de números F (Face Numbers) de evaluación de la regularidad superficial, el cual está definido con todo detalle en la norma ASTM E1155 y su versión métrica ASTM E1155M (7). Un resumen en español de esta norma se presenta en el Anejo nº 1.

El sistema de números F utiliza dos parámetros para caracterizar la regularidad superficial, el número F_F que define la planeidad y el número F_L que define la nivelación u horizontalidad del pavimento. La medida básica de los números F_F y F_L se realiza sobre líneas rectas de la superficie del pavimento. Sobre cada una de estas líneas es necesario realizar medidas de precisión del perfil longitudinal a intervalos de longitud constante que suele ser de 300 mm, en el sistema de unidades métrico, y de un pie en el sistema americano. También se pueden utilizar otros intervalos de medida como 250 mm o 333 mm pero siempre en torno a los 300 mm.

El método de evaluación de una instalación es estadístico. El procedimiento requiere que una superficie con los mismos requisitos de regularidad se divida en secciones rectangulares. En cada una de las secciones se replantean líneas de medida de tal forma que la longitud total que se mida, en metros, sea al menos igual a una décima parte del área de la sección, en metros cuadrados. Sobre cada una de las líneas rectas en las que se realizan las medidas se calcula el desnivel entre puntos colindantes (separados 300 mm), obteniéndose una representación de las pendientes; y por diferencia de pendientes contiguas se obtiene una representación de las curvaturas de la superficie. La curvatura se representa mediante el parámetro, q , en milímetros (Fig. 8).

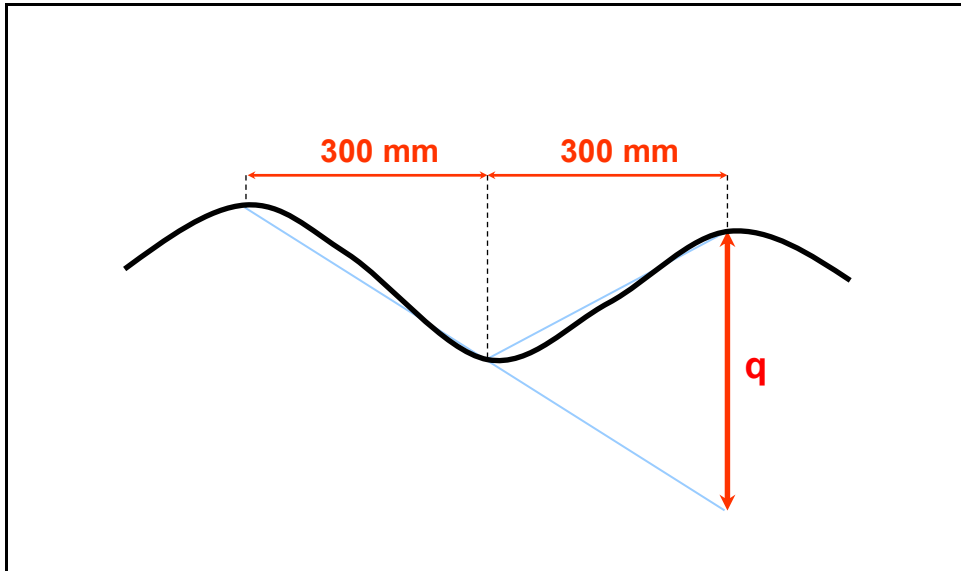


Fig. 8.-Valoración de la curvatura, q.

Asimismo se miden los desniveles entre puntos separados tres metros, z (mm), como indicadores de la horizontalidad (Fig. 9).

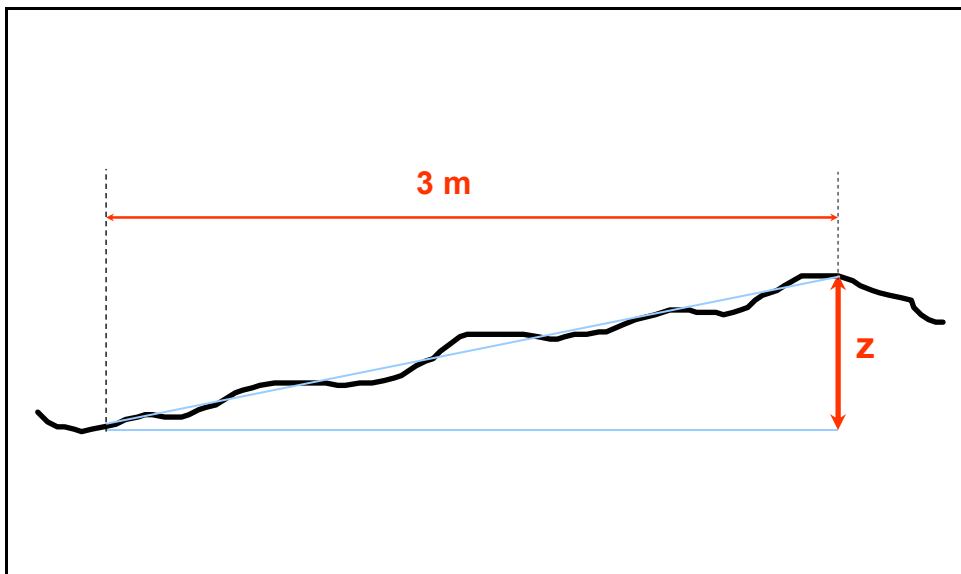


Fig. 9.-Valoración del desnivel, z.

Se calcula la media y la desviación típica de los valores q (\bar{q} y s_q) y de los valores z (\bar{z} y s_z) y se definen los números F de la línea medida como:

$$F_F = \frac{115,84}{3s_q + |q|}$$

$$F_L = \frac{314,67}{3s_z + |z|}$$

Para obtener los números F de una sección compuesta de dos o más líneas de medida, se calcula un número F, combinado de cada dos originales, utilizando la fórmula siguiente:

$$F_{j+k} = F_j \cdot F_k \sqrt{\frac{r_j + r_k}{r_k F_j^2 + r_j F_k^2}}$$

siendo r_j y r_k los números de medidas realizadas en las líneas j y k, y F_{j+k} el valor del número F combinado de ambas líneas.

Procediendo de forma iterativa con todas las líneas de la sección, se obtendrían los números F de la sección.

La disposición de las líneas en la sección debe ser tal que no se favorezca a ninguna dirección en particular. Por ello se disponen líneas a 45° como en el ejemplo de la figura 10, o paralelas a los lados y con iguales longitudes en cada dirección.

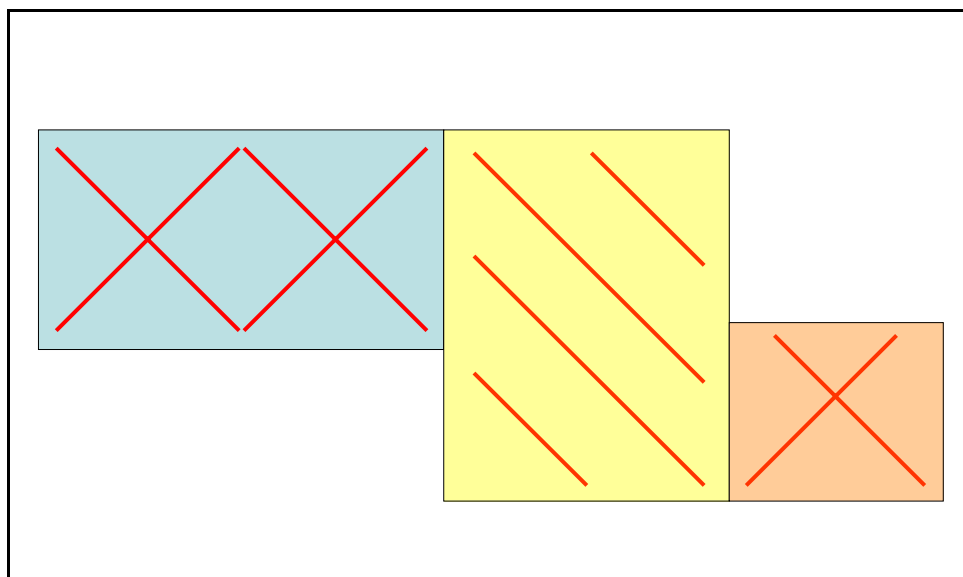


Fig. 10.- Ejemplo de disposición de líneas de medida.

La aplicación del sistema de números F está definida en los informes ACI 117 (8) y ACI 302.1R-04 (9) del Instituto Americano del Hormigón (American Concrete Institute). El valor de los números F varía normalmente entre 10 y 100, siendo este número mayor cuanto mejor sea la regularidad superficial del pavimento.

Las especificaciones con números F se dan según dos niveles. Por un lado los valores totales que se aplican al conjunto del pavimento (superficies), que se denominan valores globales y que definen la calidad media de toda la obra; y por otro los valores locales o individuales, correspondientes a cada una de las secciones y que suelen ser del orden de 2/3 de los valores globales y que definen la calidad mínima permitida. No se permite que ninguna sección presente unos números F inferiores a los locales. Si en una superficie una sección tiene valores superiores a los mínimos locales aunque inferiores al global, deberá compensarse en otras secciones que tengan valores superiores al especificado como global. De esta manera las empresas especializadas en pavimentos industriales pueden llegar a alcanzar buenas regularidades superficiales sin tener que ser penalizadas innecesariamente por pequeños defectos locales. Si el pavimento cumple la especificación global y la local, el pavimento se acepta. Las secciones en donde no se cumpla la especificación local, será necesario corregirlas mediante fresado u otro procedimiento. Si se cumple la especificación local en todas las secciones pero no se cumple la especificación global, el pavimento no se acepta, o si se acepta se le impone una penalización económica al contratista.

En la Tabla 2 se recogen los valores globales de los números F para distintos tipos de pavimentos de soleras de hormigón, de acuerdo con las recomendaciones recogidas por en el informe ACI 302.1R-04.

Tabla 2.- Números F para soleras.

Regularidad	F_F	F_L
Corriente	20	15
Normal	25	20
Plana	35	25
Muy plana	45	35
Súper plana	>50	>50

En las zonas de juntas de construcción no se debe aplicar las tolerancias generales de la superficie, pues se trata de zonas singulares del pavimento. De hecho, la norma ASTM E1155 establece que no deben realizarse medidas a una distancia inferior a

600 mm de las mismas. Los proyectistas que trabajan con pavimentos industriales tratan de colocar las juntas en aquellas zonas donde la regularidad superficial no supone ningún problema, o bien establecen unas especificaciones particulares para las mismas.

El método de números F ha tenido una gran aceptación en muy pocos años debido a que:

- controla tanto la amplitud como la longitud de onda de las irregularidades, planeidad,
- controla la horizontalidad del pavimento, nivelación,
- es un método de medida sencillo, normalizado, muy bien definido y reconoce la naturaleza estadística del ensayo,
- permite catalogar muy fácilmente los pavimentos mediante dos números,
- permite obtener resultados parciales según se va construyendo el pavimento, lo cual permite a la empresa constructora corregir sus métodos para ajustarse a las especificaciones establecidas,
- facilita la recepción de las obras y permite establecer penalizaciones y gratificaciones económicas según sean las especificaciones establecidas y los resultados obtenidos.

4.2.2 NÚMEROS F_{MIN} PARA TRÁFICO GUIADO.

El sistema de números F está pensado principalmente para pavimentos sometidos a tráficos de trayectoria indeterminada. Existe una variante al sistema que permite extender el cálculo de los números F a pavimentos para tráficos con trayectoria definida.

En este tipo de instalaciones en las que se conoce la trayectoria de las carretillas, es preferible medir directamente los parámetros que afectan al funcionamiento de las carretillas, que según se ha descrito anteriormente son: la inclinación longitudinal y la transversal y la variación de inclinaciones a lo largo de la trayectoria. Estos parámetros se miden y se convierten a números F.

Para aplicar el sistema F_{MIN} es necesario conocer las características geométricas de la carretilla, en particular la separación transversal entre las ruedas delanteras y la distancia entre el eje delantero y el trasero de la carretilla.

Si para una instalación se especifica un número F_{MIN} es necesario calcular los desniveles (Δh) máximos permitidos entre las ruedas de la carretilla, tanto longitudinales como transversales; y las variaciones máximas de pendiente (Δp) permitidas tanto longitudinales como transversales, a lo largo del pasillo. Las ecuaciones que permiten calcular estos valores máximos son:

$$\Delta h_{\max} = \frac{54,23\sqrt{14,59 \cdot L + 1} - 48,26}{F_{MIN}}$$

$$\Delta p_{\max} = \frac{-5,167 \cdot L^2 + 14,4 \cdot L + 23,11}{F_{MIN}} \quad \text{para } 0,3 \leq L \leq 1,4 \text{ m,}$$

y

$$\Delta p_{\max} = \frac{33}{F_{MIN}} \quad \text{para } L > 1,4 \text{ m}$$

En estas fórmulas L es la distancia, en metros, entre el eje delantero y el trasero de la carretilla, cuando se calculen los desniveles y variaciones de pendientes longitudinales; y la separación entre las ruedas izquierda y derecha de la carretilla, cuando se calculen los parámetros transversales. Los valores de Δh_{\max} son en milímetros y los de Δp_{\max} en porcentaje (% , mm/dm, cm/m).

El sistema de números F_{MIN} es, junto con el método descrito en el Apéndice C del TR34, el más adecuado para evaluar la regularidad superficial en instalaciones con pasillos muy estrechos. Como, además, en estos casos la altura de almacenamiento suele ser muy alta es corriente que las tolerancias de regularidad superficial sean muy estrictas. Este tipo de pavimento de alta planimetría suele tener especificaciones con números altos los cuales son difíciles de conseguir, aunque se han conseguido en los EE.UU. pavimentos con números F_{MIN} de hasta 238.

Las tolerancias necesarias dependen de la altura de elevación de las carretillas, del espacio libre existente entre carretilla y estantería, y de la velocidad a la que se

pretenda que circule la carretilla. Para permitir las máximas velocidades que son capaces de conseguir las carretillas guiadas y sacarles por tanto el mayor rendimiento, es conveniente especificar números F_{MIN} superiores a 100.

A nivel indicativo, en pasillos muy estrechos con márgenes entre las cargas en las carretillas y las estanterías del orden de 100 o 150 mm, se pueden utilizar las tolerancias siguientes:

- Pasillos con estanterías de hasta 8 m, $F_{MIN} > 60$
- Pasillos con estanterías entre 8 y 12 m, $F_{MIN} > 80$
- Pasillos con estanterías superiores a 12 m, $F_{MIN} > 100$

La ejecución de pavimentos de alta planimetría conlleva unos costos superiores a los pavimentos de hormigón normales y es muy corriente que con especificaciones de F_{MIN} de 100 o superior sea necesario fresar los pavimentos en zonas localizadas.

4.3. MÉTODO DE LA TR34.

En 1988 la Sociedad del Hormigón (Concrete Society) en el Reino Unido, presentó un informe, el TR34, sobre pavimentos de hormigón. En este informe se presentó una sistemática para la evaluación de la regularidad superficial de pavimentos. En esa primera versión no se distinguía entre tráfico aleatorio y tráfico guiado. En 1994, en una segunda edición, se distinguió entre pavimentos para tráfico guiado y aleatorio, generándose una metodología para cada tipo de pavimento y se presentaron las tablas 7.1 y 7.2 de las antiguas versiones del TR34, con una serie de especificaciones para varias categorías de pavimento (10). Posteriormente, en 1997, se publicó un suplemento a la TR34, en la que se modificaba las condiciones de los pavimentos con tráfico aleatorio, presentándose la tabla 7.2 R (11). En marzo de 2003 se ha publicado la nueva edición de la TR34 (12) con cambios mínimos a las tablas de 1997 (ahora tablas 4.2 y 4.3), pero añadiéndose un Apéndice C con una metodología nueva, y mejor, para la evaluación de pavimentos con tráfico guiado.

La revisión actual del TR34 considera cuatro propiedades del suelo para valorar la regularidad superficial:

- Propiedad I: El desnivel longitudinal cada 300 mm.

- Propiedad II: La variación de inclinación longitudinal cada 300 mm, como indicador de la curvatura del pavimento.
- Propiedad III: El desnivel transversal entre rodadas, como indicador de la inclinación transversal.
- Propiedad IV: Desnivel entre puntos separados tres metros, como indicador de la horizontalidad.

Las propiedades II y IV son idénticas a los valores q y z , usados para la valoración de los números F_F y F_L del sistema de números F de la ACI y la ASTM.

El sistema distingue entre pavimentos con tráfico aleatorio y con tráfico guiado.

4.3.1 TR34 PARA TRÁFICO ALEATORIO.

La metodología para la evaluación de pavimentos con tráfico indeterminado se ha mantenido con las distintas ediciones de la TR34 aunque las especificaciones exigidas han ido cambiando ligeramente.

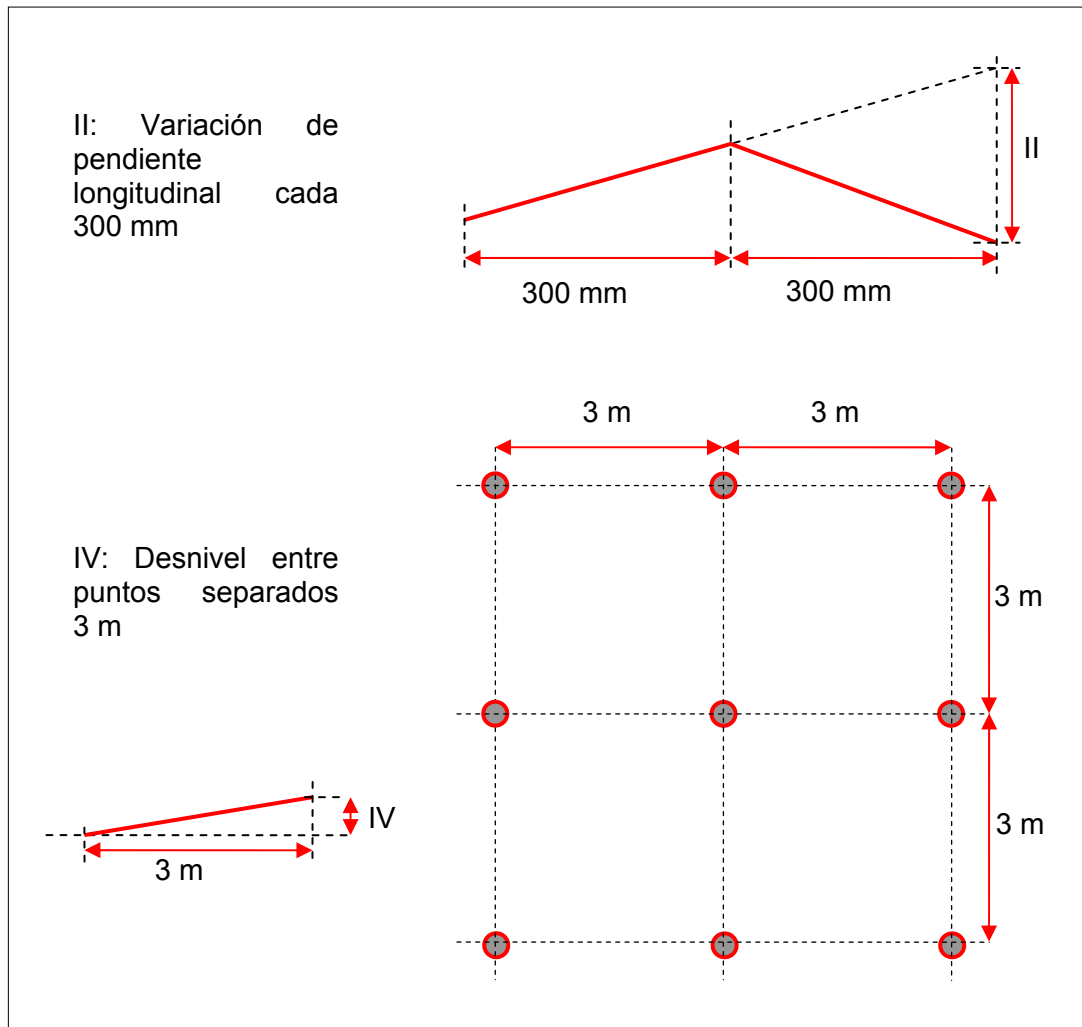


Fig. 11.- Propiedades medidas en instalaciones con tráfico aleatorio.

En estos pavimentos se define sobre la superficie una malla cuadriculada de puntos espaciados tres metros entre si. Sobre la cuadrícula se replantean líneas de tres metros en número tal que su longitud total sea igual o superior a una décima parte del área de la superficie, y sobre estas líneas se miden las propiedades II y IV (Fig. 11).

La disposición de las líneas de medida puede ser cualquiera evitando que se ponderen más unas direcciones que otras. No se recomiendan medidas próximas a los bordes de la solera, fijándose una franja de exclusión de 1,5 m de los bordes. Un ejemplo de disposición de las líneas de medida se presenta en la figura 12.

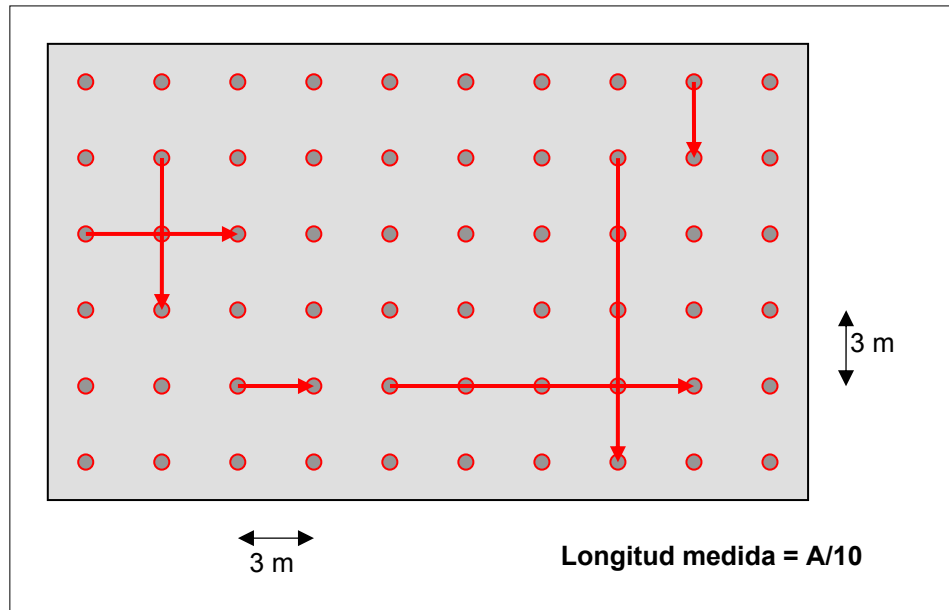


Fig. 12. Ejemplo de disposición de líneas de medida.

Según la TR34, los pavimentos con tráfico aleatorio se clasifican en tres categorías: FM1, FM2 y FM3. La categoría FM1 se especifica para pavimentos con requisitos estrictos de regularidad superficial. La ejecución de este tipo de pavimentos es difícil y puede resultar onerosa. La categoría FM2 es apropiada en pasillos anchos con alturas de almacenamiento superiores a ocho metros y en zonas de transferencia a pasillos muy estrechos. La FM3 es la adecuada para pasillos anchos con alturas de almacenamiento inferiores a ocho metros y en fábricas y establecimientos comerciales sin requisitos especiales de regularidad superficial. Los criterios de clasificación se presentan en la tabla 3.

Tabla 3.- Clasificación de pavimentos con tráfico aleatorio (según TR34).

TIPO DE PAVIMENTO	TOLERANCIAS (mm)			
	Variación de pendiente (Prop. II)		Desnivel (Prop. IV)	
	95%	100%	95%	100%
FM1	2,50	4,00	4,50	7,00
FM2	3,50	5,50	8,00	12,00
FM3	5,00	7,50	10,00	15,00

Se exige que para cada categoría de pavimento y propiedad medida al menos el 95% de las medidas sea inferior al umbral del 95% y que no haya ninguna medida superior al umbral del 100%.

4.3.2 TR34 PARA TRÁFICO GUIADO.

En pavimentos con tráfico guiado el método tradicional de la TR34 requiere la medida de las propiedades I, II y III en las rodadas de las carretillas. En la última edición se ha añadido, además, otro procedimiento alternativo mejor (apéndice C de la TR34), que se presenta en el epígrafe 4.3.3.

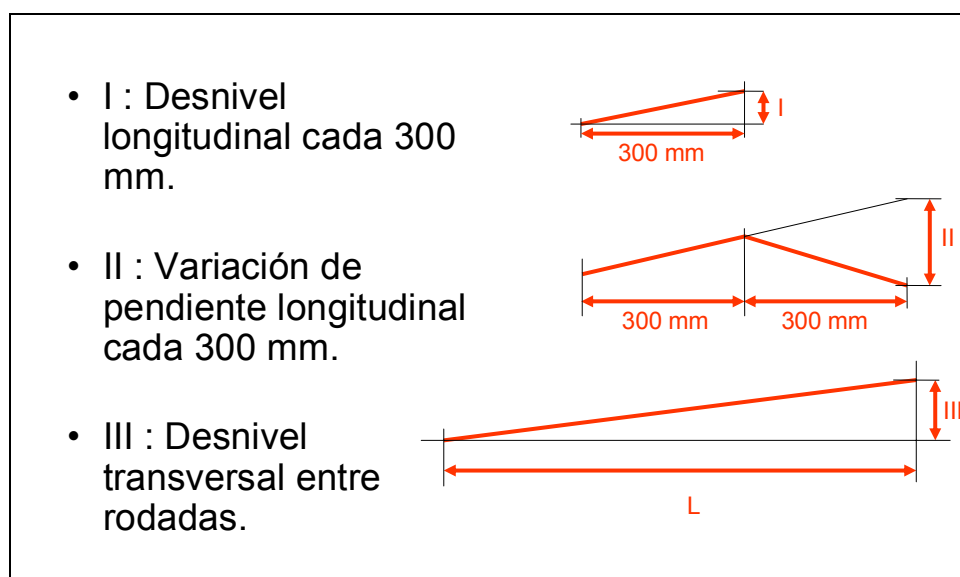


Fig. 13.- Propiedades medidas en pavimentos con tráfico aleatorio.

En la figura 13 se presentan las propiedades medidas en el procedimiento tradicional. En esta figura, L es la separación entre las ruedas delanteras de las carretillas.

En el informe TR34 (12) se clasifican los pavimentos con tráfico guiado en tres categorías: SF o súper plano, categoría 1 y categoría 2; según se indica en la tabla 4.

Tabla 4.- Tolerancias para tráfico guiado (según TR34).

TIPO DE PAVIMENTO	TOLERANCIAS (mm)							
	Desnivel longitudinal (Prop. I)		Variación de pendiente (Prop. II)		Desnivel transversal (Prop. III)			
					Separación entre rodadas $\leq 1,5$ m		Separación entre rodadas $> 1,5$ m	
	95% (A)	100% (B)	95% (A)	100% (B)	95% (A)	100% (B)	95% (A)	100% (B)
Súper plano	0,75	1,00	1,00	1,50	1,50	2,50	2,00	3,00
Categoría 1	1,50	2,50	2,50	3,50	2,50	3,50	3,00	4,50
Categoría 2	2,50	4,00	3,25	5,00	3,50	5,00	4,00	6,00

En el TR34 se recomienda que la especificación de "súper plano" se adopte en instalaciones con pasillos muy estrechos y con estanterías de más de 13 metros de altura.

La categoría 1 se recomienda para instalaciones con pasillos muy estrechos y altura de estanterías de 8 a 13 metros, y la categoría 2 para instalaciones con pasillos muy estrechos y altura de almacenamiento inferior a ocho metros.

4.3.3 TR34-APÉNDICE C: TRÁFICO GUIADO.

En la última edición del TR34, del año 2003, se ha presentado un procedimiento alternativo para la evaluación de los pavimentos en donde el tráfico es guiado. Los parámetros que se miden con esta metodología son los mismos que los que utiliza el método de los F_{MIN} . Estos parámetros son (figuras 14 y 15):

- A: Desenivel transversal, en mm, entre las dos ruedas delanteras: d_i . Así se evalúa la inclinación transversal.
- B: Diferencia de desniveles transversales al avanzar la carretilla 300 mm: $d_i - d_{i-1}$. Así se evalúa la variación de inclinación transversal.

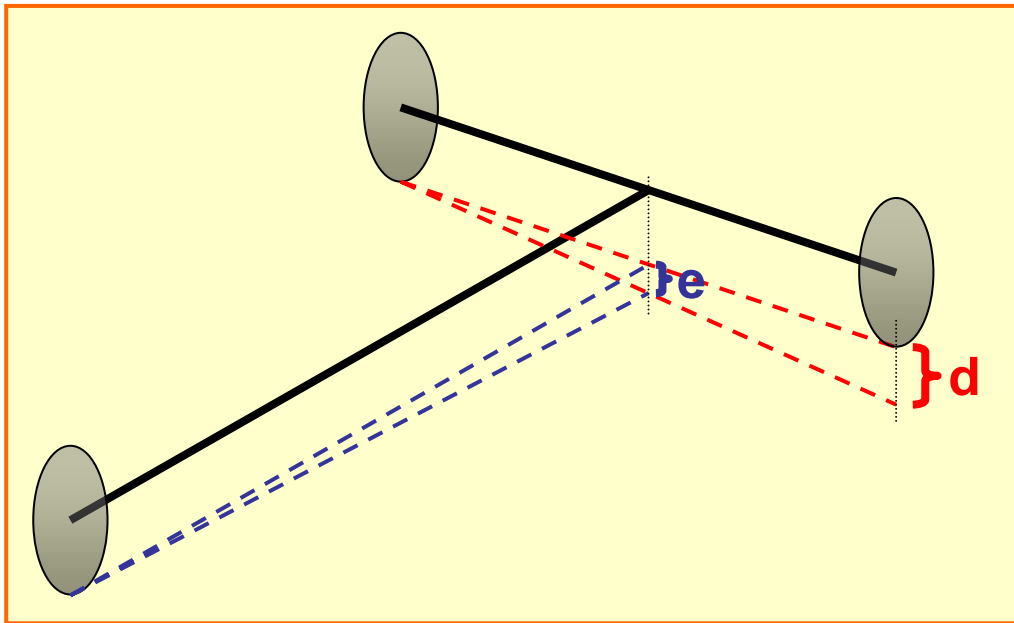


Fig. 14.- Desniveles longitudinales y transversales.

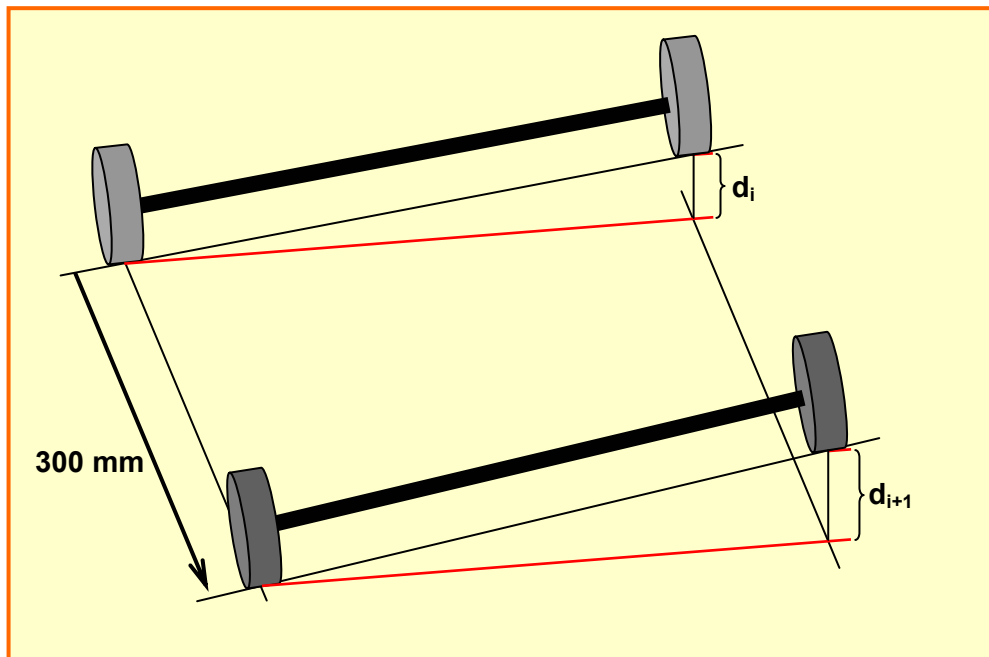


Fig. 15.- Variación de desniveles transversales.

- C: Desnivel longitudinal, en mm, entre el eje delantero y el trasero: e_i . Así se evalúa la inclinación longitudinal.

Si el eje trasero solo tiene una rueda, es el desnivel entre el punto medio del eje delantero y la rueda trasera.

Si el eje trasero tiene dos ruedas, es el desnivel entre los puntos medios de los dos ejes.

- D: Diferencia de desniveles longitudinales al avanzar la carretilla 300 mm: $e_i - e_{i-1}$. Así se evalúa la variación de la inclinación longitudinal.

Las tolerancias vienen definidas en función de la altura de elevación de la carretilla, H; de la anchura entre las ruedas delanteras de la carretilla, T; y de la separación entre el eje delantero y trasero, L.

H: altura de elevación, m

T: ancho entre ruedas delanteras, m

L: separación entre eje delantero y trasero, m

Tabla 5.- Tolerancias según el Apéndice C de la TR34.

Categoría	Altura de elevación, H (m)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
DM1	> 13	$1,3 \times T$	$0,75 \times 1,3 \times T$	$1,1 \times 1,3 \times L$	1,3
DM2	8 - 13	$2,0 \times T$	$0,75 \times 2,0 \times T$	$1,1 \times 2,0 \times L$	2,0
DM3	< 8	$2,5 \times T$	$0,75 \times 2,5 \times T$	$1,1 \times 2,5 \times L$	2,5

4.4 EQUIVALENCIA ENTRE NÚMEROS F Y VALORES TR34.

4.4.1 EQUIVALENCIAS EN TRÁFICO ALEATORIO.

En instalaciones con tráfico aleatorio, el sistema de números F y el del TR34 utilizan las mismas características para su evaluación. En ambos casos se utilizan los mismos parámetros y ambos consideran que la distribución de medidas asemeja una distribución normal. Es por tanto posible realizar una equivalencia entre los valores de los números F y los valores utilizados por el TR34. En la tabla 6, se presentan dichas equivalencias.

Tabla 6.- Equivalencia entre números F y valores TR34 para tráfico aleatorio.

Planeidad		Nivelación	
F _F	TR34 (95% de prop. II) (mm)	F _L	TR34 (95% de prop. IV) (mm)
15	5,15	10	20,98
30	2,57	30	6,99
50	1,54	50	4,20
100	0,77	100	2,10
15,4	5,0 (FM3)	21,0	10,0 (FM3)
22,1	3,5 (FM2)	26,2	8,0 (FM2)
30,9	2,5 (FM1)	46.6	4,5 (FM1)

En la figura 17 se presenta, en un gráfico de números F, el comparativo entre las especificaciones del ACI y las del TR34 para tráficos aleatorios.

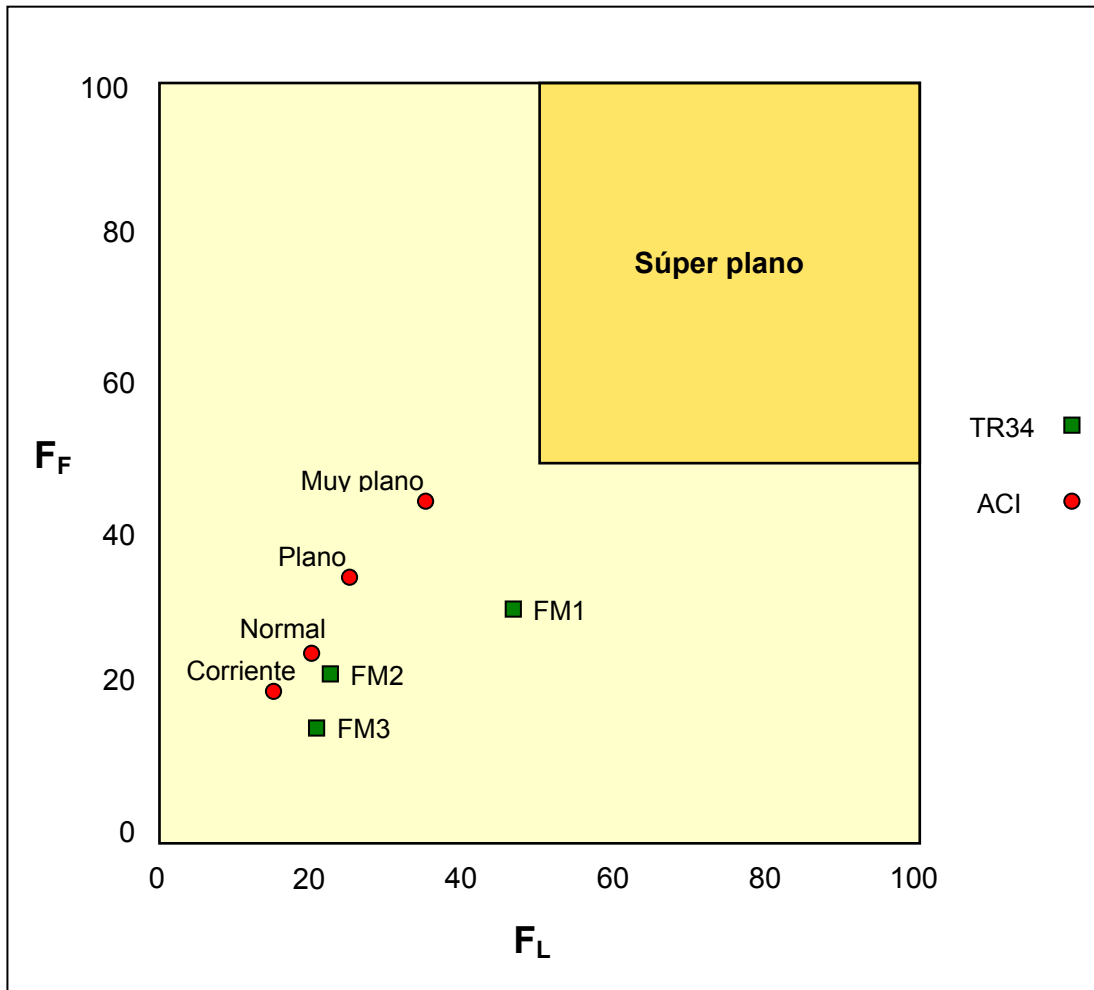


Fig. 16.- Comparativo entre la clasificación del ACI 302 y del TR34.

Se observa en la figura 16 que los requisitos del TR34 son más estrictos en términos de nivelación, pero en cambio son muy tolerantes en términos de planeidad. Los llamados pavimentos súper planos por el ACI son mucho más estrictos que los pavimentos FM1 del TR34, que podrían ser equivalentes a los pavimentos planos del ACI.

4.4.2 EQUIVALENCIAS EN TRÁFICO GUIADO.

Los parámetros que se utilizan en el sistema de números F_{MIM} y en el sistema del Apéndice C de la TR34 son exactamente los mismos. Es por tanto posible utilizar una equivalencia directa entre las tolerancias de ambos sistemas. Tanto en un sistema como en otro las tolerancias están definidas en función del ancho y del largo de la carretilla. Se presenta en la tabla 7 la correspondencia que existe entre las tolerancias fijadas por el Apéndice C de la TR34 y sus correspondientes números F_{MIN} para varios

anchos y largos de carretilla, entendiéndose como ancho la separación entre ruedas frontales y como largo la distancia entre el eje delantero y el trasero.

Tabla 7.- Equivalencia entre tolerancias del Apéndice C y números F_{MIN} .

Categoría	Transversal					Longitudinal				
	Ancho	Desnivel		Pendiente		Largo	Desnivel		Pendiente	
	T (m)	A (mm)	F_{MIN}	B (mm)	F_{MIN}	L (m)	C (mm)	F_{MIN}	D (mm)	F_{MIN}
DM1 (> 13 m)	1,00	1,30	127,59	0,98	99,52	1,50	2,15	98,45	1,30	76,15
	1,20	1,56	118,62	1,17	84,49	1,70	2,43	93,46	1,30	76,15
	1,40	1,82	111,41	1,37	72,53	1,90	2,72	89,20	1,30	76,15
	1,60	2,08	105,44	1,56	63,46	2,10	3,00	85,51	1,30	76,15
	1,80	2,34	100,38	1,76	56,41	2,30	3,29	82,25	1,30	76,15
DM2 (8 – 13)	1,00	2,00	82,93	1,50	64,69	1,50	3,30	63,99	2,00	49,50
	1,20	2,40	77,10	1,80	54,92	1,70	3,74	60,75	2,00	49,50
	1,40	2,80	72,41	2,10	47,14	1,90	4,18	57,98	2,00	49,50
	1,60	3,20	68,53	2,40	41,25	2,10	4,62	55,58	2,00	49,50
	1,80	3,60	65,25	2,70	36,67	2,30	5,06	53,46	2,00	49,50
DM3 (< 8 m)	1,00	2,50	66,35	1,88	51,75	1,50	4,13	51,19	2,50	39,60
	1,20	3,00	61,68	2,25	43,93	1,70	4,68	48,60	2,50	39,60
	1,40	3,50	57,93	2,63	37,71	1,90	5,23	46,39	2,50	39,60
	1,60	4,00	54,83	3,00	33,00	2,10	5,78	44,46	2,50	39,60
	1,80	4,50	52,20	3,38	29,33	2,30	6,33	42,77	2,50	39,60

4.5. NORMA DIN.

La normativa alemana DIN hace referencia en dos de sus normas al tema de la regularidad superficial de pavimentos. La norma DIN 18202, de estructuras de edificación, establece tolerancias de pavimentos en general; y la norma DIN 15185 establece tolerancias para instalaciones de tráfico guiado.

La norma DIN 18202 establece criterios basado en medidas de desniveles bajo reglas de distinta longitud. Ya se han comentado anteriormente los problemas que se presentan en la medida con reglas. Al usar reglas de diferentes longitudes la norma DIN trata de reducir los problemas referidos para este tipo de instrumentos.

La norma DIN 15185, requiere las medidas de los desniveles transversales entre las dos rodadas definidas por las trayectorias de las carretillas y de los desniveles longitudinales bajo reglas de varias longitudes.

Las tolerancias que marca la norma DIN 18202 para tráfico aleatorio son las que se presentan en la tabla 8.

Tabla 8.- Tolerancias para tráfico aleatorio (según DIN 18202).

Clase	Aplicación	Tolerancia en mm sobre una regla de:				
		0,1 m	1 m	4 m	10 m	15 m
1	Hormigones no acabados o de base.	10	15	20	25	30
2	Hormigones acabados de poca utilidad.	5	8	12	15	20
3	Pavimentos normales.	2	4	10	12	15
4	Pavimentos con mayores exigencias.	1	3	9	12	15

Las tolerancias especificadas por la norma DIN 15185 para tráfico guiado, se presentan en las tablas 9 y 10.

Tablas 9 y 10.- Tolerancias para tráfico definido (según DIN 15185).

Altura de elevación	Desnivel transversal, en mm, para una separación, en m, entre rodadas de:			
	≤ 1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,0	2,0 – 2,5
≤ 6 m	2,0	2,5	3,0	3,5
> 6 m	1,5	2,0	2,5	3,0

Altura de elevación	Desnivel, en mm, bajo una regla de:			
	1 m	2 m	3 m	4 m
Cualquiera	2	3	4	5

5. EQUIPOS DE MEDIDA.

Existen diferentes equipos para medir la regularidad superficial del pavimento. Entre los más usuales pueden citarse los siguientes:

- Reglas
- Equipos tipo Dipstick®
- Niveles ópticos, incluidos los equipos con láser
- Perfilógrafos

A pesar de que su especificación ha sido ampliamente empleada no existen normas que describan las condiciones exigibles a las reglas para medir la regularidad superficial. Éstas deben tener un canto suficiente (> 150 mm) para evitar que se produzca una flecha excesiva (superior al 10% de la tolerancia mínima exigida a la superficie sobre la que se vayan a efectuar las medidas). Asimismo, debe cuidarse que no existan deformaciones o pérdidas de alineación producidas durante su fabricación o durante su permanencia en obra. Ya se ha mencionado las imprecisiones que tienen las mediciones realizadas con regla por lo que no va a insistirse en ello.

Los Dipstick® miden la inclinación o la diferencia de nivel existente entre dos puntos separados una distancia conocida, generalmente 300 mm. Con ellos se consiguen



precisiones mejores de $\pm 0,10$ mm. Estos equipos van equipados con un pequeño ordenador con capacidad suficiente para almacenar las medidas realizadas y efectuar los cálculos necesarios.

Los Dipstick® son los equipos más apropiados para evaluar la regularidad superficial. Son equipos de gran precisión, son sencillos de manejo, son utilizables para medir: números F, las propiedades del TR34 y los parámetros DIN, proporcionan perfiles longitudinales exactos y se pueden utilizar para verificar la nivelación de los encofrados, aspecto que como se verá es fundamental para la ejecución de pavimentos de alta planimetría.

Otra forma de medir la regularidad del pavimento es a través de niveles ópticos o niveles láser, con los que pueden calcularse los diferentes números F o parámetros del TR34, sin embargo debe asegurarse que tengan precisiones de al menos la décima de milímetro, que no siempre ocurre.

Por último para evaluar la regularidad superficial en instalaciones con tráfico guiado, se utilizan perfilógrafos. Los perfilógrafos son equipos de medida rodantes capaces de registrar, de forma continua, el desnivel entre sus ruedas. Están equipados con cuatro o más ruedas sensoras cuya separación puede ajustarse de manera que simulen la separación entre las ruedas de cualquier vehículo industrial, y permiten obtener tanto las diferencias de nivel transversal como longitudinal de la zona sobre la que circulan, aunque no proporcionan el perfil longitudinal de cotas.



Hay distintos modelos de perfilógrafos dependiendo de la norma que se vaya a utilizar: TR34, F_{MIN} , Apéndice C de la TR34 o DIN 15185. Estos equipos están especialmente indicados para pasillos con tráficos definidos cuando se conocen las carretillas que circularán por ellos pues permiten



obtener a priori los movimientos de cabeceo y balanceo que experimentarán los vehículos.

La precisión de estos equipos depende de la distancia entre ruedas sensoras. Para separaciones inferiores a dos metros la precisión que puede alcanzarse es del orden de $\pm 0,1$ mm.

6. FACTORES QUE AFECTAN A LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.

Son muchos los factores que afectan a la regularidad superficial de los pavimentos de hormigón. La planificación que se haga; la calidad del hormigón y su suministro; los encofrados, la maquinaria y herramientas utilizadas; y los métodos y el cuidado empleado durante el acabado de la superficie, todos afectan a la regularidad superficial.

Como regla general puede apuntarse que el cuidado puesto en la colocación de los encofrados y durante el vertido y extendido del hormigón, afectarán principalmente a la horizontalidad del pavimento (F_L), y el cuidado y dedicación durante la fase de acabado de la superficie a la planeidad (F_F).

6.1. PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA OBRA.

La planificación de la obra es uno de los aspectos más importantes, especialmente cuando las tolerancias que se exigen son difíciles de conseguir. Es necesario realizar reuniones entre la propiedad, la ingeniería o la dirección facultativa y el contratista en donde se discutan los requisitos de la instalación y los métodos constructivos a emplear. Hay que considerar el tamaño y disposición de los paños de hormigonado, la maquinaria que se va a utilizar, los encofrados, el tipo y disposición de las juntas, las técnicas de terminación de la superficie, etc.

El tamaño y disposición de los paños de hormigonado es uno de los aspectos a considerar. Con la premisa de que los encofrados se colocan correctamente, cuanto menor sea el tamaño de los paños de hormigonado, mejor serán los resultados. Es preferible hormigonar por calles



longitudinales a hacerlo por paños cuadrados. Cuanto más estrechas sean las calles, mejores resultados se obtendrán. Para conseguir pavimentos muy planos se recomienda utilizar anchuras inferiores a seis metros.

La disposición de las juntas de construcción es otro aspecto que va ligado con la planificación de los paños o bandas de hormigonado. En la zona próxima a las juntas se producen irregularidades, principalmente debidas al combado de las losas. Es conveniente, disponer las juntas de construcción en zonas en donde no haya tráfico de carretillas. En instalaciones con requisitos estrictos de regularidad superficial es probable que haya que fresar las juntas de construcción.

6.2. CALIDAD Y SUMINISTRO DEL HORMIGÓN.

El hormigón tiene que ser trabajable y además facilitar un período de acabado lo suficientemente amplio para que se puedan realizar con holgura las labores de la fase de acabado. La consistencia debe ser fluida, con un asiento en cono de Abrams comprendido entre 9 y 12 cm.

El suministro de hormigón debe ser consistente, procurando que exista la menor variación posible entre las distintas amasadas, e ininterrumpido. Su vertido y extendido debe realizarse uniformemente a lo ancho del paño, para evitar que las reglas de nivelación cabalguen sobre los montones de hormigón.

El combado de las losas, por elevación de sus bordes o esquinas, es un fenómeno producido por las diferencias de humedad y de temperatura que se producen a lo largo del espesor de las mismas, dando lugar a una mayor retracción en la zona superficial que en la inferior en donde suele haber una mayor humedad y temperatura. Este fenómeno se refleja al cabo de algunos meses, por lo que escapa de los controles de regularidad superficial que se realizan a los pocos días de la construcción del pavimento.

Existen medidas preventivas para evitar o, al menos, limitar este efecto como:

- 1) igualar temperaturas y humedades entre la parte superior e inferior de las losas;
- 2) emplear hormigones de baja retracción (sin que se reduzca la trabajabilidad), mediante la utilización de áridos con mayores tamaños máximos, áridos con menor absorción, menores contenidos de cemento y menores relaciones agua/cemento;
- 3) realizar un curado adecuado del hormigón, especialmente en los primeros días;
- 4) usar una base permeable (porosa), seca o casi seca;
- 5) disponer juntas a distancias

cortas; o 6) disponer una partida generosa de armaduras en la parte superior de la losa.

Cuando se produce un apreciable combado de las losas que afecta a la regularidad superficial del pavimento, se suele corregir mediante el fresado de la superficie. Cuando la deformación es muy grande, se puede producir además una pérdida de capacidad de transferencia de cargas entre losas, e incluso una pérdida de contacto con la capa inferior. En estos casos, las actuaciones son más complicadas y pueden consistir en la inserción de pasadores en las juntas o bien en la inyección de un mortero bajo las losas para evitar el descalce de las mismas.

6.3. COLOCACIÓN DE ENCOFRADOS.

El tipo, estado, la colocación y la nivelación de los encofrados es uno de los factores que más influyen en la regularidad superficial, especialmente en pavimentos planos y muy planos, colocados en bandas estrechas en los que los encofrados se utilizan de maestras para conseguir la superficie deseada.

Los encofrados deben estar perfectamente sujetos y permanecer así durante todas las fases de la obra, incluso la de acabado, para lo que deben utilizarse piquetas u otros elementos de sujeción a la base que aguanten el empuje del hormigón y las operaciones de vertido, extendido, nivelado y acabado.

Los bordes superiores de los encofrados deben situarse a los niveles designados en el proyecto. Si están constituidos por tabloncillos de madera estos deben venir cepillados con el borde completamente recto. Después de colocados y verificados volverán a cepillarse si fuera necesario. Los encofrados metálicos y con algún mecanismo de ajuste de la altura del borde superior son preferibles. Es importante que los bordes estén mecanizados, sean totalmente rectos y estén limpios de restos de hormigón.

Con los equipos de nivelación normales es difícil conseguir colocar los encofrados con errores menores de ± 3 mm, por lo que si son necesarias tolerancias menores habrá que utilizar algún sistema especial.

6.4. MAQUINARIA, HERRAMIENTAS Y MÉTODOS.

La maquinaria y las herramientas también afectan a la regularidad superficial. Es importante que las reglas, tanto las de nivelado (“screeds”) como las de rectificado

(“straight edges”); llanas; allanadoras manuales o mecánicas; fratasas, fratasadoras mecánicas y demás herramientas se encuentren en perfecto estado y siempre rectas y sin deformaciones.

Las reglas de nivelación suelen ser en muchas ocasiones vibrantes produciendo ya una compactación del hormigón. La mayoría se apoyan sobre maestras para conseguir el nivel de proyecto, pero cada vez se utilizan más las niveladas por sistemas láser, que permiten obtener buenos rendimientos con una calidad muy satisfactoria.



Las operaciones de allanado y fratasado, que son muy importantes para conseguir una superficie lisa y con la textura deseada, tienden a producir oscilaciones en la superficie del hormigón, por lo que, si las especificaciones de regularidad superficial son estrictas, será necesario rectificar la superficie con reglas después de esas operaciones.

El uso de llanas anchas y con mangos largos (“bull float”) en lugar de las corrientes que se sujetan con un asa, y reglas de rectificación con mangos largos como las que se utilizan en pavimentos de carretera (“highway straightedge”), facilitan el acabado sobre todo cuando se quiere realizar transversalmente o a un ángulo con la dirección de extendido.

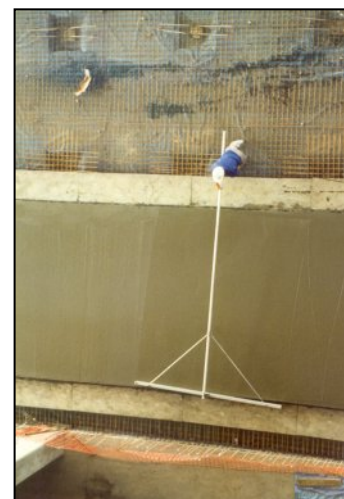
En las allanadoras mecánicas (“power float”) se pueden sustituir las llanas o talochas convencionales (normalmente cuatro) por un plato único (“pan float”) que proporciona una mejor terminación.

7. PAVIMENTOS SUPER PLANOS.

Se entiende por pavimentos súper planos, todos aquellos que tienen unas altas exigencias en cuanto a la regularidad superficial. Su clasificación es muy diferente en función del país y del sistema empleado, pero como regla general puede decirse que son pavimentos con F_F y F_L superiores a 50, o con F_{MIN} del orden de 100.

Este tipo de pavimentos comenzaron a ejecutarse en bandas muy estrechas, del orden de 2 m de anchura y con encofrados que se podían nivelar con precisión mediante tornillos. En la actualidad se ejecutan con anchuras superiores, similares a las utilizadas en la técnica de hormigonado por bandas estrechas, y siguiendo los pasos que se describen a continuación:

1. El hormigonado se debe realizar por bandas de una anchura no superior a 6 m.
2. Los encofrados deben ser metálicos con los bordes mecanizados y nivelarse con la mayor precisión posible utilizando niveles ópticos con una precisión de 0,1 mm. Se deben comprobar antes del hormigonado y ajustar el borde superior, si fuese necesario.
3. El hormigón debe tener una consistencia fluida, con un asiento en cono de Abrams comprendido entre 9 y 12 cm, procurando que exista la menor variación posible entre las distintas amasadas y que no se produzca exudación.
4. Colocar y extender el hormigón uniformemente a lo ancho de extendido.
5. Nivelar el hormigón con regla manual o vibrante.
6. Compactar con vibradores de aguja si no se ha realizado con regla vibrante.
7. Allanar la superficie con una llana ancha y con mango (“bull float”).
8. Rectificar la rasante longitudinalmente con regla manual, y transversalmente o a 45° con regla de carreteras de tres metros con un solape entre pasadas de al menos 1,5 m.
9. Esperar a que desaparezca el agua de exudación. No conviene realizar ninguna labor de acabado mientras haya agua en la superficie.
10. Allanado mecánico, tipo helicóptero, con llanas (“power float”) o mejor con plato (“pan float”).



11. Volver a rectificar la rasante longitudinalmente con regla manual, y transversalmente o a 45° con regla de carreteras de tres metros con solapes entre pasadas de las reglas.
12. Fratasado mecánico tipo helicóptero ("power trowel").
13. Volver a rectificar la rasante longitudinalmente con regla manual, y transversalmente o a 45° con regla de carreteras.
14. Continuar fratasando y rectificando la superficie hasta conseguir la textura superficial deseada.
15. Comprobar la regularidad superficial en un plazo de 72 horas.
16. Fresar las juntas de construcción en donde se habrá producido un combado de las losas y las zonas en donde no se cumplan las tolerancias.

Hoy en día, con el uso extendido de niveladoras láser, que consiguen unos rendimientos diarios (1500 – 2000 m²/día) muy superiores a los que se consiguen por bandas estrechas (300 – 400 m²/día), y con el desarrollo de fresadoras láser de precisión, algunas empresas, para la construcción de instalaciones para carretillas guiadas en pasillos estrechos, están optando por construir el pavimento con niveladoras láser y realizar el fresado posterior de los pasillos por donde circularán las carretillas guiadas. Con este procedimiento se reducen grandemente los plazos de construcción, se garantizan los resultados de regularidad superficial requerida y los costes no son superiores a los de los métodos de pasillo estrecho.

8. COMO ESPECIFICAR LA REGULARIDAD SUPERFICIAL.

En muchas ocasiones se encuentra el proyectista ante la duda de que tolerancias de regularidad superficial especificar. El problema es importante y las consecuencias económicas de una mala elección son muy costosas para la propiedad. Un pavimento al que se le ha especificado unas tolerancias muy generosas puede resultar en unas instalaciones que no cumplirán los objetivos de producción deseados; y al contrario si las tolerancias marcadas son innecesariamente rigurosas, el coste de construir tal pavimento será inútilmente caro.

En los epígrafes anteriores se ha comentado que los pavimentos cuanto más planos más cuidados y más mano de obra conllevan. En las tablas 11 y 12 se presentan los costes relativos para conseguir distintos grados de regularidad superficial, según Face (13) y Tipping (14). En ambos casos se considera un coste unitario, el necesario para construir un pavimento de calidad corriente según el criterio de la ACI (F_F20/F_L15), y se presentan los costes relativos para conseguir calidades mejores.

Tabla 11.- Costes según Face

Calidad del pavimento		Costes relativos	
F_F	F_L	Encofrado	Acabado
19	13	1,0	1,0
25	17	1,0	1,1 - 1,2
38	25	1,5 - 1,9	1,1 - 1,3
50	33	4,2 - 5,2	1,1 - 1,5
75	50	8,3 - 8,9	1,7 - 2,1
100	66	8,9 - 9,5	1,9 - 2,3
150	100	9,5 - 10,1	2,1 - 2,5

Tabla 12.- Costes según Tipping

Calidad del pavimento		Costes relativos	
F_F	F_L	Encofrado	Acabado
20	15	1,00	1,00
25	20	1,00 - 1,02	1,00 - 1,05
36	24	1,33 - 1,70	1,10 - 1,20
45	30	1,75 - 2,50	1,40 - 1,60
$F_{MIN} 100$		2,00 - 4,50	1,80 - 2,20

Como se observa, aunque los dos autores no coinciden exactamente en los incrementos de costes, si es evidente que estos aumentan tremendamente según aumentan los números F.

La mejor opción para especificar las tolerancias de regularidad superficial, es basarse en instalaciones existentes, similares a las que se van a construir y que operen satisfactoriamente. Basta con realizar unas medidas de regularidad superficial en tales instalaciones para conocer las tolerancias necesarias. Si no se dispone de unas instalaciones que sirvan de referencia, se pueden utilizar las recomendaciones de la guía ACI 302.1R-04 (9) o las del informe TR34 (12).

Si el tráfico es aleatorio el método más sencillo y completo es el de los números F, que además permite clasificar muy fácilmente los pavimentos, mediante dos números, F_F y

F_L , y también permite imponer criterios de aceptación y penalización en caso de que no se cumplan totalmente las tolerancias.

En pavimentos de tráfico guiado el sistema F_{MIN} y el del Apéndice C del TR34 son los que mejores parámetros de evaluación consideran. Como tolerancias se pueden utilizar las del TR34 o las indicadas en el epígrafe del sistema F_{MIN} .

Los sistemas de reglas se deben evitar por los motivos que se han explicado en los epígrafes correspondientes.

9. ARREGLOS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.

Los arreglos en los pavimentos para mejorar la regularidad superficial son siempre caros y en algunos casos difíciles de ejecutar. Las soluciones pueden ser demoliciones de las losas y reconstrucciones del pavimento; añadido de capas de distintas características y espesores; o fresados superficiales.

Los arreglos mediante demolición y reconstrucción posterior no merecen mayor comentario. Son muy costosos y solo se realizan excepcionalmente normalmente cuando existen problemas estructurales.

Los arreglos utilizando capas añadidas al hormigón son bastante utilizados y pueden dar buenos resultados si se realizan correctamente. Como siempre que se añade una capa sobre otra se corre el riesgo de que no haya una buena unión entre las capas, se produzcan despegues y descarnaduras posteriores. Es importante preparar la superficie de hormigón antes de proceder al colocado de la capa de regularización y, si procede, aplicar algún producto de imprimación que mejore la adherencia entre las dos capas. Conviene que el material de regularización sea lo más parecido al material de base para que los coeficientes de dilatación térmica entre ambos materiales sean similares y que los esfuerzos térmicos que se producen en el contacto de las capas por variaciones de temperatura sean mínimos.

Se pueden utilizar productos a base de cemento, resinas sintéticas o mezclas de ambos. Hay que tener en cuenta que las resinas epoxi y los morteros con resinas epoxi tienen una cierta viscosidad, y aunque algunos materiales se denominen “autonivelantes” no lo son realmente. Lo que si son es “auto alisantes” o “auto suavizantes” pero al extenderse sobre una superficie de hormigón, reflejan, aunque suavizadas, las irregularidades del hormigón inferior. Cuando se necesita una

superficie muy plana, como es el caso de instalaciones con pasillos estrechos, que requieren unas tolerancias muy estrictas de regularidad superficial, el uso de estas soluciones no suele ser adecuado.

El fresado manual de zonas específicas en donde la irregularidad sobresale del resto de la superficie puede ser una solución a considerar cuando las exigencias de regularidad superficial no son muy estrictas, pero el fresado manual es muy difícil de controlar y a veces mientras se arreglan unas irregularidades se están produciendo otras.

En instalaciones con pasillos estrechos, en donde el tráfico de carretillas es guiado o las tolerancias de regularidad superficial son muy ajustadas, una solución que produce excelentes resultados es la regularización con fresadora láser. Con este procedimiento se corrigen las dos o tres bandas de rodadura por donde ruedan las carretillas o si se prefiere el ancho completo del pasillo. Normalmente se fresan espesores del orden de milímetros y el proceso de fresado es limpio e interfiere mínimamente con la operativa de la instalación.



10. REFERENCIAS.

- (1) Norma NLT-334/88 (1988): “Medida de la regularidad superficial de un firme con regla rodante de tres metros”; CEDEX, MOPT. Madrid, 1988.
- (2) Orden Circular nº 311/90 CyE (1990): “Pliego de prescripciones técnicas de pavimentos de hormigón vibrado”; MOPT. Madrid.
- (3) Orden Circular nº 308/89 CyE (1989) y Nota complementaria (1991). “Sobre recepción definitiva de obras”. MOPT. Madrid.

- (4) Sánchez, B. y Sánchez, I. (1991): "Hacia un control efectivo de la regularidad superficial". RUTAS, nº 26. Madrid.
- (5) Norma NTE-RSS (1973): "Soleras". MOPTMA. Madrid.
- (6) Instrucción de Hormigón Estructura. EHE. (1999). Ministerio de Fomento. Madrid.
- (7) ASTM E 1155M – 96 (2001): "Standard Test Method for Determining F_F Floor Flatness and F_L Floor Levelness Numbers [Metric]. ASTM. Filadelfia, Pensilvania, EE.UU.
- (8) ACI 117-90 (1990): "Standard Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Materials". ACI. Farmington Hills, Michigan, EE.UU.
- (9) ACI 302.1R-04 (2004): "Guide for Concrete Floor and Slab Construction". ACI. Farmington Hills, Michigan, EE.UU.
- (10) Technical Report 34, Second Edition (1994): "Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction". Concrete Society, Crowthorne, Reino Unido.
- (11) Supplement to Technical Report 34 (1997): "Concrete industrial ground floors. Specification and control of surface regularity of free movement areas". Concrete Society, Crowthorne, Reino Unido.
- (12) Technical Report 34, Third Edition (2003): "Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction." Concrete Society, Crowthorne, Reino Unido.
- (13) Face, A. (1987): "Specifying Floor Flatness and Levelness: The F-Number System". The Construction Specifier. Alexandria, Virginia, EE.UU.
- (14) Tipping, E. (1992): "Bidding and building to F-number floor specs". Concrete Construction. Addison, Illinois, EE.UU.

ANEJO N° 1.**EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS
CON NÚMEROS F. (RESUMEN DE LA NORMA ASTM E 1155M – 96)*****OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.***

Esta norma define el procedimiento que debe seguirse para la evaluación de la regularidad superficial de pavimentos utilizando el sistema de números F (Face Floor Profile Numbers).

El método tiene aplicación en superficies en donde el tráfico de vehículos o de peatones es irregular, como pueden ser los pavimentos industriales, almacenes, grandes superficies o en edificación. El método es también aplicable cuando el tráfico de vehículos sobre la superficie es guiado y estos circulan sobre unas rodadas definidas, aunque en este caso existen otros métodos más apropiados.

El procedimiento proporciona información gráfica y estadística de la regularidad superficial. Su utilidad principal es la de verificar conformidades de la obra terminada con las especificaciones contractuales de regularidad. También se puede utilizar para investigar las deformaciones que experimentan los pavimentos industriales.

DEFINICIÓN.

La regularidad superficial define el grado de aproximación de una superficie terminada a la superficie teórica de proyecto. Normalmente las superficies de los pavimentos industriales, almacenes, grandes superficies, etc., son planas y horizontales.

El sistema de números F es un método estadístico para evaluar la regularidad superficial de pavimentos. Está basado en dos números: el número F_F o número de la planeidad que representa la curvatura del pavimento sobre una distancia horizontal de 600 mm –calculada a través de las diferencias de elevación existentes entre puntos separados entre sí 300 mm–, y el número de la nivelación o F_L que define la pendiente del pavimento a lo largo de una distancia de 3 metros.

RESUMEN DEL MÉTODO DE ENSAYO.

Se marcan líneas rectas en diversas zonas de la superficie del pavimento. Sobre ellas se evalúan las cotas o las diferencias de nivel entre puntos separados 300 mm y se obtiene una aproximación poligonal del perfil del pavimento en cada línea de medida.

Con las diferencias de nivel entre los puntos separados 300 mm y el desnivel entre los puntos espaciados 3 m se obtienen estimaciones estadísticas de los números F_F y F_L de las líneas rectas. Los números F_F y F_L de las líneas de una sección se combinan para obtener la evaluación de la sección y combinando los valores de las secciones la valoración global de la superficie.

EQUIPO DE ENSAYO.

La parte más importante del equipo de ensayo es la que se utiliza para medir las cotas o diferencias de nivel entre puntos separados 300 mm. Normalmente se utilizan equipos inclinométricos desarrollados exclusivamente para este tipo de medida (equipos tipo **Dipstick**). Con ellos se consiguen precisiones mejores de $\pm 0,10$ mm. Estos equipos van equipados con un pequeño ordenador con capacidad suficiente para almacenar las medidas realizadas y efectuar los cálculos necesarios para obtener los números F.

Otros equipos para definir los desniveles son los niveles ópticos o los de láser aunque hay que asegurarse que proporcionen precisiones de 0,10 mm.

Otro equipamiento auxiliar es: cinta métrica, hilo y tiza para marcar las líneas rectas, libretas para anotar las medidas u ordenadores para almacenar los datos.

ORGANIZACIÓN DE LA SUPERFICIE.

Se define como superficie a medir aquella, dentro del edificio o de la nave, que tiene una misma especificación de regularidad superficial en términos de números F. Si hay varias zonas con distintas especificaciones, se definirán tantas superficies como especificaciones haya.

En cada una de las superficies se definen secciones de medida que cumplan las condiciones siguientes:

- El área debe ser superior a 12 m^2 y lados mayores de 2,4 m.

- No deben solaparse secciones.
- No deben incluir o cortar las juntas de construcción.

En las secciones se definen líneas de medida que cumplan los requisitos siguientes:

- De longitud mayor de 3,3 m.
- Estén a más de 600 mm de los bordes de la solera, forjado o losa, o de una junta de construcción (las juntas de retracción se ignorarán). Este límite se ignorará si elimina más del 25% de la sección.
- No habrá líneas paralelas separadas menos de 1,2 m.
- Las líneas se orientarán a 45° del lado mayor de la sección o paralelas a sus lados pero con igual número de puntos en ambas direcciones para no atribuir más peso a ninguna de las dos direcciones.

Se define un número mínimo de puntos de ensayo por sección como:

$$N_{\min} = \frac{A}{3} \quad \text{si } A > 150 \text{ m}^2$$

$$N_{\min} = 4\sqrt{A} \quad \text{si } A < 150 \text{ m}^2$$

con lo que quedará definido el número de líneas necesarias.

CÁLCULOS.

El procedimiento siguiente explica como calcular los números F de una línea de ensayo de longitud L (mm) cuando se conocen o se miden las cotas o los desniveles de puntos espaciados entre sí 300 mm. La notación que se utiliza es la siguiente:

L (mm): longitud de la línea de ensayo.

h_i (mm): altura o cota de un punto de medida i.

N: número de puntos en una línea de ensayo.

$$N = \frac{L}{300} + 1$$

d_i (mm): desnivel entre el punto i y el i-1.

$$d_i = h_i - h_{i-1}$$

donde $i \geq 1$.

Si no se conocen las cotas, al primer punto se le asigna una altura $h_0 = 0$ y se obtienen las cotas como

$$h_i = h_{i-1} + d_i$$

donde $i \geq 1$.

El cálculo es el siguiente:

- 1 En cada punto i se calcula la curvatura q_i (mm) como

$$q_i = d_i - d_{i-1}$$

donde $i \geq 2$. Existirán $N-2$ valores de curvatura q_i .

- 2 Calcular el desnivel z_i (mm) entre puntos separados tres metros

$$z_i = h_i - h_{i-10}$$

donde $i \geq 10$. Existirán $N-10$ valores de z_i .

Se calcula la media y la desviación típica de los valores q_i (\bar{q} y s_q) y de los de z_i (\bar{z} y s_z) y se definen los números F de la línea medida como:

$$F_F = \frac{115,84}{3s_q + |\bar{q}|}$$

$$F_L = \frac{314,67}{3s_z + |\bar{z}|}$$

Para obtener los números F de una sección compuesta de dos o más líneas de medida, se calculará un número F combinado de cada dos originales utilizando la fórmula siguiente:

$$F_{j+k} = F_j \cdot F_k \sqrt{\frac{r_j + r_k}{r_k F_j^2 + r_j F_k^2}}$$

siendo r_j y r_k los números de medidas de las líneas j y k , y F_{j+k} el valor del número F combinado de ambas líneas.

Procediendo de forma iterativa con todas las líneas de la sección, se obtendrían los números F de la sección.

Para cada sección se obtendrán los valores de confianza del 90% de cada número F :

$$CI_{90\%} = -1,82(\log_{10} r)^3 + 19,4(\log_{10} r)^2 - 71,69(\log_{10} r) + 92,62\%$$

siendo r el número de valores q_i o z_i usados en los cálculos.

Los intervalos de confianza son:

$$A = (100 - CI_{90\%}) \cdot \frac{F}{100}$$

$$B = (100 + CI_{90\%}) \cdot \frac{F}{100}$$

Para cada sección se mostrarán los números F obtenidos y los intervalos de confianza de 90% como:

$$F: F (A - B)$$

Por ejemplo:

$$F_F : 24,5 (23,0 - 26,0)$$

$$F_L : 15,3 (13,9 - 16,7)$$

Finalmente se obtienen los números F de la superficie total combinando los números F de las secciones que la componen ponderadamente en función de sus áreas:

$$F = \frac{\sum A_i F_i}{\sum A_i}$$

En este caso no se definen intervalos de confianza.