



Sistemas de nivelación de capas en la construcción de firmes

Programa de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Departamento de ingeniería Civil-Transportes
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid
Junio 2010
Miguel López-Bachiller Fernández

INDICE

1. Introducción	3
2. Objetivos y metodología	4
3. Sistemas de nivelación	5
3.1 Automatización en los sistemas de nivelación.....	8
3.1.1 Descripción de los automatismos	10
3.1.2 Programas informáticos para la automatización de la nivelación	29
3.2 Requisitos necesarios para la automatización.....	31
3.2.1 Maquinaria	31
3.2.2 Proyecto	32
3.2.3 Materiales empleados en cada capa.....	35
4. Estudio teórico	36
4.1 Secciones estudiadas.....	38
4.2 Procedimiento de cálculo	40
4.3 Descripción del programa de cálculo utilizado.....	43
4.4 Parámetros de estudio de los materiales que componen las capas.....	44
4.5 Resultados	45
5. Análisis de resultados	50
6. Conclusiones	54
7. Referencias	56

1. Introducción

Hoy en día los avances tecnológicos impregnan las facetas más cotidianas de la vida, desde algo tan sencillo y eficaz como un abrelatas hasta los teléfonos móviles capaces de mantenernos en contacto en tiempo real con la otra punta del mundo o internet.

Se ha conseguido automatizar tareas tediosas más o menos complejas, como el aparcamiento de un coche, a cambio de sólo un poco de energía, pero contando con un gran desarrollo de investigación.

La maquinaria de las obras públicas no iba a escapar de esta corriente. La mejora en las condiciones de trabajo de los operadores han cambiado sustancialmente: servomecanismos, mejora en la visibilidad, aire acondicionado, asientos ergonómicos y otros dispositivos hacen que la comodidad en el manejo de las máquinas incentive a éstos a mejorar su productividad y nos permita hacer los mismos trabajos que hace unos años de manera mucho más eficiente.

Uno de estos avances técnicos es el guiado automático de las máquinas motoniveladoras, no sólo en llevarlas de un lado para otro [1], sino también en la colocación de la cuchilla a la cota exacta y con el peralte justo en cada punto de la obra al tiempo que avanza colocando la tierra de una capa determinada a su cota definitiva y dejándola casi perfecta.

Pero no todas las mejoras ni todas las automatizaciones implican un mejor y más barato producto final o una mejora en las condiciones de trabajo, o incluso una mala aplicación del invento puede llevar consigo consecuencias desastrosas, como ese mismo teléfono móvil cuando se utiliza mientras se conduce y puede producir accidentes de tráfico.

Este trabajo está encaminado a comprobar si la nivelación apoyada con sistemas automáticos implica un mejor resultado de las obras así construidas o al menos una mejora en los costes de la unidad de nivelación.

2. Objetivos y metodología

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia del método de nivelación en el número de ejes que puede soportar un firme. Así mismo, llegar a un cálculo económico con costes actuales (2010) para ver si el sobrecoste en el trabajo de nivelación empleando sistemas más precisos apoyados en la automatización es menor que el coste de los suplementos de la capa de MBC para conseguir las mismas prestaciones del firme construido.

En este trabajo no se analizará la posible disminución de coste por mejoras en el rendimiento al emplear sistemas automáticos o disminución de la mano de obra empleada.

La metodología para conseguirlo es la siguiente:

1. Estudiar los errores que se cometen habitualmente con los diferentes sistemas de nivelación empleados en motoniveladoras: tradicional y automáticos.
2. Seleccionar una serie de secciones de firmes flexibles de la vigente Instrucción de Carreteras 6.1.IC. [3]
3. Estudiar mediante un programa de cálculo multicapa el número de ejes equivalentes que soportan cada una de las secciones estudiadas suponiendo que los espesores construidos coinciden exactamente con los proyectados.
4. Estudiar esas mismas secciones con los espesores realmente construidos según cada sistema de nivelación. El estudio se hará sólo variando la cota de la coronación de tierras, normalmente ejecutada con motoniveladora. Dado que las variaciones pueden ser de signo + ó - , el estudio sólo se referirá al caso en el que se reduzca el número de ejes equivalentes de la sección construida.
5. Comparar el número de ejes de cada sección construida con el número de ejes de la sección teórica.

6. Obtener conclusiones de la influencia de los errores cometidos en la nivelación de una sola capa según los diferentes sistemas empleados en el número de ejes que soporta cada sección de firme.

3. Sistemas de nivelación

La nivelación de las diferentes capas que constituyen un firme se hace con métodos más o menos precisos en función de la importancia estructural de cada una de las capas (Fig. 1) y también en función de la regularidad conseguida, con el objetivo de obtener al final de la obra una durabilidad determinada y una cierta comodidad del usuario.

En este trabajo se estudia sólo los sistemas de nivelación aplicados a motoniveladoras, y por lo tanto, es válido sólo para las capas de materiales que es posible nivelar con esta máquina.

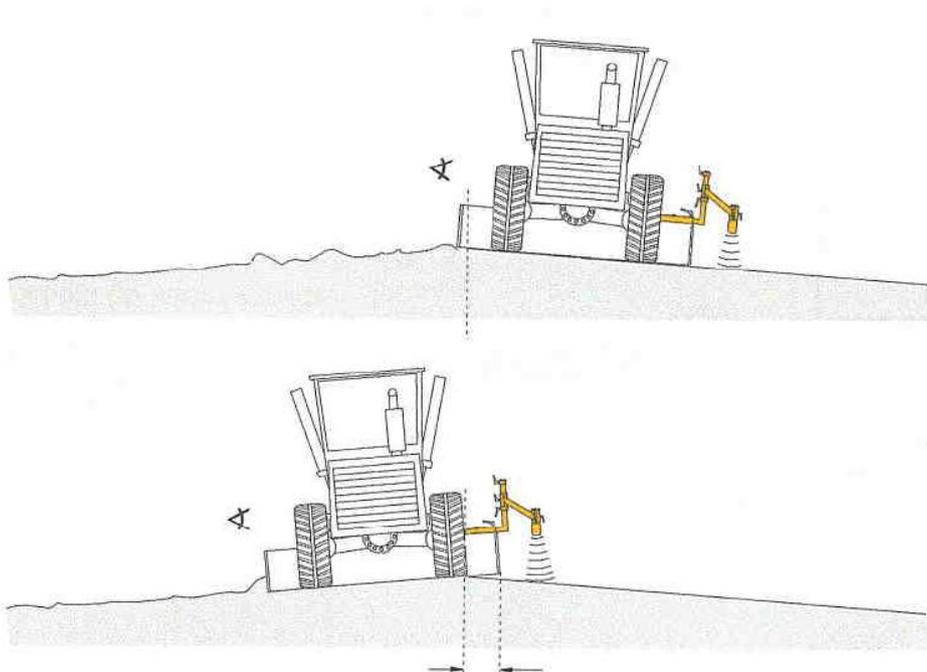


Fig. 1 Motoniveladora utilizando palpador de cota a la derecha [5]

El método tradicional de nivelación de una capa es mediante la colocación de una malla de estacas [6] con la cota fijada en el proyecto, teniendo en cuenta el esponjamiento del material, de manera que para cada capa quede un espesor mínimo fijado en el proyecto y no ocupe parte del espesor que ha de tener la capa colocada encima de ésta.

Las dimensiones de la malla (distancia entre las estacas) es función de la importancia de la capa, siendo habitual para capas de tierras, colocar una fila de estacas con precisión milimétrica (art 340.3 del PG3) en el eje de la carretera o del vial que se construya, y otras dos en cada uno de los bordes. En sentido longitudinal lo habitual es que estén situadas cada 20 metros según el artículo 340.3 del PG3 [7], ó 10 metros en el caso de que se necesitara una precisión mayor (Fig. 2).

En sentido transversal, la separación entre estacas ronda los 6,0 m, tanto si se trata de la construcción de un tramo de autovía (calzadas separadas, con dos carriles cada una, arcén interior de 1,0 m y exterior de 2,5 m, más los derrames de cada capa, total 11,50 m) como en carreteras comarcales convencionales con una sección típica de 7/12 (ancho total de calzada en la capa de rodadura de 12 metros, de los cuales los carriles tienen 2 x 3,50 m de anchura más dos arcenes de 2,5 m de anchura). Lo habitual es colocarlas en el borde del ancho de la capa que se nivele, sirviendo estas estacas no sólo para fijar la cota en cada punto, sino también para delimitar los bordes de la capa.



Fig. 2 Disposición típica de las estacas de nivelación en capas de firme

Las tolerancias admitidas en la terminación son de +0 a -3 cm para la coronación de terraplén (art 340.3 del PG3) y de +0 -15 mm para las capas de zahorra artificial (art. 510.7.3 y 510.10 del PG3), donde también se indica que la comprobación de la rasante se hará en eje y bordes de los perfiles transversales de proyecto y en perfiles intermedios.

La precisión alcanzada con este sistema, vista desde la perspectiva de las obras ejecutadas, es función de la precisión conseguida con las estacas y también de la sensibilidad del operador de la motoniveladora.

En el Pliego [7] habla claramente de precisión milimétrica, que es fácil de conseguir con un nivel normal de obra. Incluso con este sistema, habitualmente las estacas se colocan y posteriormente se cortan a la cota fijada. Pero el corte muchas veces no es perpendicular a la estaca, pudiendo haber varios milímetros de diferencia de cota entre las esquinas de la propia estaca.



Fig. 3 Diferencia de cota nivelando con GPS y con nivel

Otra cuestión es la tendencia actual en las obras en las que por ahorrar tiempo y costes inmediatos, se colocan las estacas de terminación de tierras con sistemas GPS sin ningún refino posterior, arguyendo que el GPS actual puede dar errores en cota de +/- 3 cm (Fig. 3).

La realidad es bastante diferente, pudiendo encontrar puntos con diferencia de cota respecto al plano de proyecto de 10 y hasta de 15 cm, totalmente inadmisibles en la construcción de infraestructuras viarias.

Además, la precisión conseguida depende en una gran parte de la habilidad del maquinista también del tamaño del árido que se nivele: difícilmente se puede llegar a precisiones de +/- 1 cm con árido de 8 cm de grosor.

3.1 Automatización en los sistemas de nivelación

En nuestros días, la tendencia general es automatizar tantas cuantas tareas sea posible con el objetivo de conseguir trabajos más perfectos, con mayor rendimiento y menores costes. Son numerosísimos los artículos relacionados con la automatización de la maquinaria en general, habida cuenta de la reducción continua del coste de los elementos que hay que colocar (Fig. 4).

Tal es así que cada año se celebra un Simposio internacional (ISARC, International Symposium on Automation and Robotics in Construction) donde se exponen los últimos avances en este campo.

Este avance es tal que en algunos países, como en Suecia (año 2005) (Administración Nacional de Carreteras Sueca, Vägverket) ya no es posible obtener contratos de construcción en carreteras sin tener todas las máquinas niveladoras provistas de mecanismos automáticos del tipo 3D [8].

La mayor ventaja de los sistemas de nivelación automáticos es que a mayor grado de automatismo, menor capacidad del operador de cometer errores y por lo tanto, mayor aproximación a la obtención de un trabajo perfecto (entendiendo perfecto como aquel que se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia fijados en el proyecto), con un menor número de pasadas, lo que incrementa el rendimiento [9] y por lo tanto, reduce costes.

Los principales inconvenientes para la automatización del sistema proyecto-operadores-maquinaria son:

- Por una parte hay que adaptar la maquinaria existente a los sistemas automáticos o adquirir maquinaria nueva.
- Por otra parte, algo similar ocurre con los operadores: hay que formarlos en estos sistemas, lo que a veces no es nada fácil, y sin embargo es una buena solución para operadores nuevos, más familiarizados con los videojuegos o los ordenadores que con la llave inglesa y el rollo de alambre.
- También, es necesario redactar los proyectos para conseguir una rápida adaptación de cualquiera de los sistemas que se vayan a emplear a los datos de proyecto.



Fig. 4 Nivelando con láser una urbanización

- Por último, es necesario concienciar a los responsables de las obras que si bien la precisión alcanzada con la automatización de la maquinaria es mayor que la de los sistemas tradicionales, para obtener un resultado óptimo y poder aprovechar todas las ventajas económicas que suponen estos sistemas, es necesario llevar a cabo algunas acciones que influyen directamente en la nivelación, como cuidar la granulometría, la preparación de la topografía (bases, datos), y por supuesto es necesario seguir, o quizá ser más riguroso, con las normas de buena construcción y la aplicación del sentido común.

3.1.1 Descripción de los automatismos

En este apartado se verán las características de los equipos, obras típicas que se pueden ejecutar con cada uno de ellos y las ventajas e inconvenientes que supone el uso de los mismos, así como se analizarán los márgenes de precisión de cada uno de ellos [10][11].[12]

Los equipos automáticos de los que se dispone actualmente son:

- A. Láser
- B. Sensor ultrasónico de cota
- C. Sensor ultrasónico de cota y peralte automático
- D. Peraltador automático
- E. Sistema 3D clásico con estación total robotizada
- F. Sistema 3D apoyado en GPS

A. Láser

El sistema está basado en un emisor de rayo láser que fija un plano determinado.

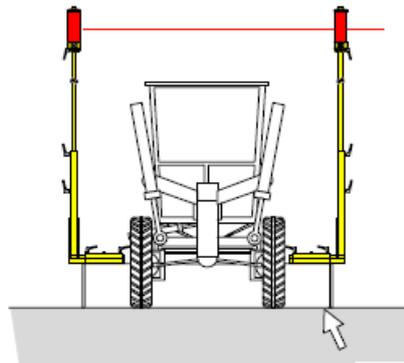


Fig. 5 Esquema de motoniveladora equipada con dos sensores de rayo láser[5]

La motoniveladora está dotada de dos sensores (Figs. 4 y 5), uno en cada lado de la cuchilla, mediante los cuales capta el plano láser emitido. La señal captada es enviada a las electroválvulas que mueven hacia arriba o hacia abajo la cuchilla en cada uno de sus extremos hasta que la señal recibida está dentro de los límites fijados a priori.

El plano (Fig. 6) no tiene por qué ser horizontal, sino que admite inclinaciones hasta 15 grados en dos direcciones.

El rango de aplicación es hasta 300 - 500 metros de distancia desde el emisor, en cualquier dirección.

La motoniveladora puede moverse en cualquier dirección y sentido, ya que el plano es independiente de éstos, y los sensores están preparados para captar el rayo láser venga de donde venga. La única precaución que hay que tomar es que el plano emitido esté siempre por encima de la cabina de la máquina o cualquier otro obstáculo físico que impida que sea captado por los sensores.

La principal limitación es que para su empleo óptimo es necesario que la superficie que haya que nivelar sea un plano perfecto y de dimensiones suficientemente grandes como para que compense el sistema.

Las obras típicas ejecutadas con este sistema son:

- Pistas de aeropuertos: Superficies de 2.000 a 4.000 m de longitud con una pendiente longitudinal nula o muy pequeña y pendiente transversal de 1 % a dos aguas
- Aparcamiento de aeronaves: Plano con caída inferior al 1 % en una dirección
- Superficies para cultivos especiales. Para aplicaciones agrícolas se utilizan con bastante éxito traíllas pequeñas dotadas con este sistema.

Aparcamientos de vehículos

Las ventajas de este sistema son:

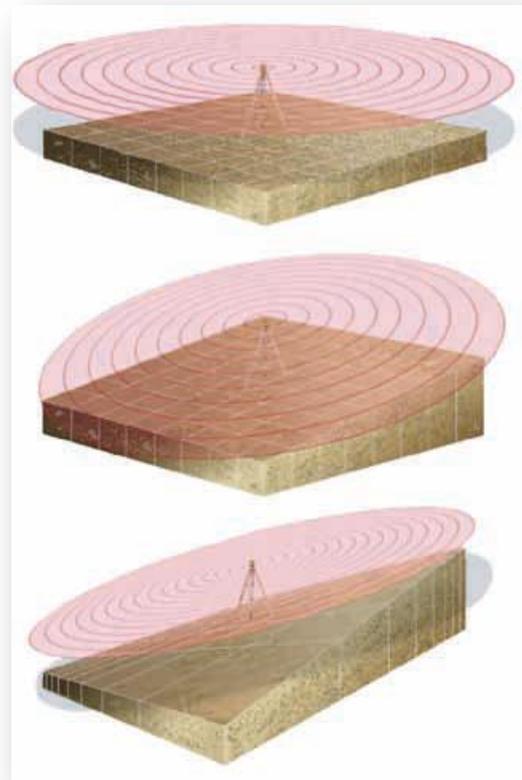


Fig 6 Plano emitido por el rayo Láser[42]

- Coste reducido: además de la implantación de las electroválvulas en las motoniveladoras, el emisor de láser y los sensores son relativamente baratos (15.000 €/ud, 2.010)
- Manejo sencillo
- Gran superficie de trabajo sólo con un estacionamiento (Figs. 7 y 8)
- Facilidad de implantación en obra: Es suficiente con calibrar el plano con tres puntos, cuanto más alejados del emisor, mejor.
- Gran precisión en cualquier punto de la superficie
- Facilidad para trabajar de noche



Fig. 7 Emisor de Láser sobre un andamio para conseguir altura suficiente

Los principales inconvenientes:

- Empleo muy limitado en superficies en general, y prácticamente nulo en carreteras.
- Es necesario calibrar el sistema varias veces al día en épocas de calor: las patas del emisor pueden dilatarse o encogerse produciendo pequeños movimientos que modifican el plano



Fig. 8 Motoniveladora equipada con dos sensores de láser trabajando en un aeropuerto

- Imposibilidad para trabajar con niebla o mucho polvo.

La precisión de este sistema es mayor que ± 10 mm, considerándose esta cifra mejor que la fijada en los pliegos actualmente vigentes en construcción de viales [7]

B. Sensor ultrasónico de cota

Se trata de un sensor colocado en un extremo de la cuchilla que capta la cota bien de un cable o bien del propio terreno (habitualmente la pasada anterior) (Fig. 9) y manda la señal a las electroválvulas que mantienen la cuchilla a una separación constante de la referencia de la que se trate. La pendiente transversal es colocada por el operador.

Pueden colocarse sensores en ambos lados de la cuchilla, con lo que no queda ningún grado de libertad en cuanto a cota.

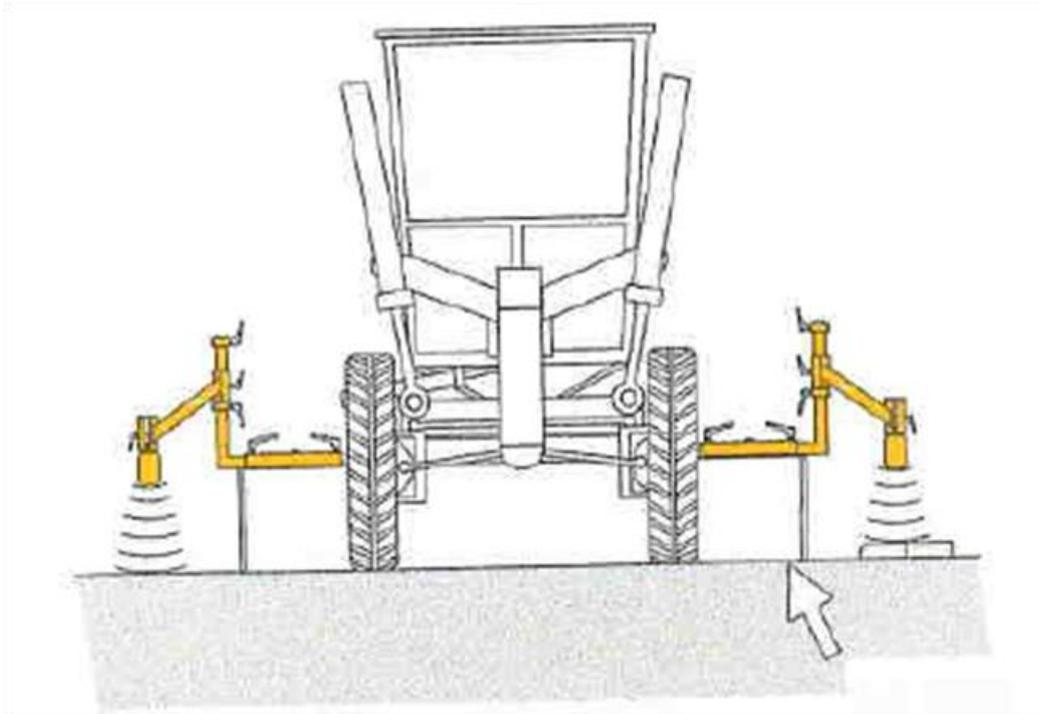


Fig. 9 Esquema de motoniveladora equipada con un sensor de ultrasonidos en cada lado [5]

Este sistema se complementa con el peraltador automático, pudiendo introducir el operador la pendiente transversal en cada punto, por lo que no puede considerarse un sistema completo de guiado automático.

No puede hablarse de rango de trabajo propiamente dicho ya que no depende de ningún emisor externo.

Su manejo es relativamente sencillo pero utilizado sin ningún instrumento más, casi no es útil en las obras públicas.

Si bien la precisión de este sistema es también superior a ± 10 mm, el hecho es que al nivelar anchuras superiores al ancho de la cuchilla de la máquina, en el caso de no llevar sensores en ambos lados de la cuchilla, es necesario apoyarse en la banda ya nivelada para conseguir anchuras mayores, con lo que se puede producir una acumulación de errores que puede ser importante si la anchura de la plataforma que se nivela es grande (mayor de 15 m).

Si la máquina está equipada con sensores en ambos lados, se disminuye la acumulación de errores.

C. Sensor ultrasónico de cota y peralte automático

Basado en el sistema anterior, ya forma un sistema completo en sí.

La utilización en una carretera es como sigue:

Se coloca con topografía clásica un cable que marca la cota de referencia por encima del punto que se pretende nivelar a una altura determinada.

En el peraltador automático incorporado a la máquina se introduce el peralte en cada momento (Fig. 10). Habitualmente este procedimiento es muy sencillo y consiste en hacer girar un botón. La precisión del dato de entrada habitualmente es de una décima de unidad (medido como tanto por ciento), pudiendo variarse conforme la máquina va avanzando.

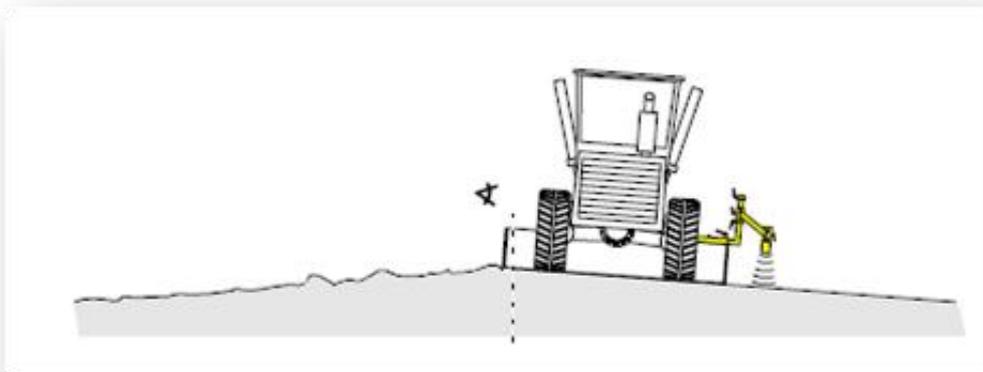


Fig. 10 Esquema de motoniveladora equipada con sensor de ultrasónicos y peraltador automático[5]

Los datos del peralte pueden escribirse en tablillas en el borde de la plataforma que se nivela, o bien pueden darse en forma de listado al maquinista de la máquina en un listado de p.k., El maquinista va leyendo y cambiando el peralte conforme la máquina avanza.

Este segundo procedimiento se vuelve muy tedioso en el caso de cambios rápidos de peralte (transiciones, enlaces), aunque puede ser suficiente en el tronco de autovías.

La obra típica para el empleo de este sistema es una carretera de nueva construcción.

Las ventajas que aporta este sistema sobre otros son:

- Coste: más reducido que el de los sistemas 3D
- Facilidad de manejo
- Puede servir de aprendizaje e introducción a los sistemas 3D
- Puede emplearse en superficies alabeadas: no hace falta que la superficie que hay que nivelar sea un plano, aunque siempre tienen que ser superficies regladas.
- Sistema sencillo de transferencia de datos de los topógrafos al operador
- El mismo cable puede servir para la nivelación de varias capas: Subbase, base y rodadura.
- Permite trabajos de noche

Los principales inconvenientes:

- Es necesario preparar físicamente antes la unidad: colocar el cable
- Hay que colocar más sensores en la motoniveladora: sensor de giro de la tornamesa de la cuchilla y sensor de peralte.
- Una mala colocación del cable puede dar lugar a errores sustanciales.
- En plataformas muy anchas (medida de la superficie a nivelar en dirección perpendicular al eje principal mayor de 10 m) es necesario cuidar mucho la no acumulación de errores, ya que la máquina va palpando cada pasada sobre la adyacente.
- No es tan preciso como el sistema Laser

En cuanto a la precisión, es la misma que el sistema anterior (± 10 mm) con los mismos inconvenientes.

D. Peralgador automático

Igual que en el caso del sensor ultrasónico de cota, tampoco constituye un sistema completo siendo, sin embargo, más útil que éste.

Consiste en un mecanismo que permite mantener la pendiente transversal (Figs. 11 y 12) según el dato que se introduzca en la cabina del operador de mediante un botón muy sencillo.

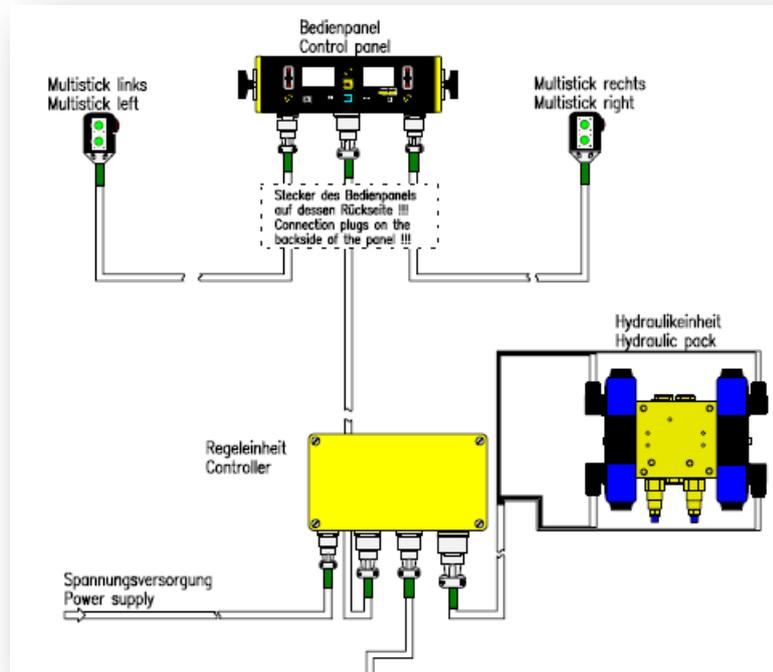


Fig. 11 Esquema de conexiones del peraltador automático en una motoniveladora[5]

Esta inclinación se mantiene independientemente de lo sesgada que se coloque la cuchilla de la máquina en relación con la dirección de avance gracias a un sensor de giro de la tornamesa.

La dirección de trabajo de la motoniveladora ha de ser siempre según el eje principal.

La aplicación típica de este sistema son también carreteras de nueva construcción en las que es fácil seguir un eje de avance.

Ventajas de esta técnica:

- Sistema sencillo, tanto de coste como de instalación y de manejo.
- Precisión suficiente en la pendiente transversal conseguida, aunque no en cuanto a la cota de la misma.
- Precisa sólo de una alineación de estacas en plataformas de autovía.

Inconvenientes:

- No asegura una rasante perfecta en cota.



Fig. 12 Unidad de control del operador de la máquina para el peraltador automático[5]

- Los errores tomados en la primera pasada son copiados en pasadas posteriores.
- No permite trabajos sin luz solar o focos

La precisión de este sistema no es mayor que la conseguida con estacas, y depende mucho de la proximidad entre éstas en sentido longitudinal, por lo que se puede estimar en ± 30 mm.

E. Sistema 3D con estación total robotizada

Consiste en una estación total motorizada que apunta constantemente a un prisma situado en un lateral de la motoniveladora (Fig. 13) a una altura suficiente para que el paso de otras máquinas (camiones, rodillos, cubas de agua) o la situación de la propia cabina de la máquina, no interrumpa la visual entre la estación total y el prisma [13].

La estación total se sitúa en el campo en un punto (Figs. 15 y 16) en el que tenga buena visibilidad de la traza por la que va a discurrir la motoniveladora. Se toman las coordenadas de su posición por el método de bisección o trisección inversa.

El vástago que sujeta el prisma vibra mientras la máquina se mueve, por muy robusto que sea éste. El programa va dotado de un sistema de compensación de tales vibraciones.



Fig. 13 Motoniveladora trabajando con sistema 3D[14]

A su vez, en la cabina hay situado un ordenador, que es quien recibe estos datos y tiene grabados las características del proyecto en el que se está nivelando.

Al recibir la información de dónde está ubicada, el ordenador calcula la posición de la cuchilla en cuanto a cota y pendiente transversal y manda las órdenes correspondientes al grupo de electroválvulas, que son las encargadas de situar la cuchilla en su posición definitiva (Fig. 14).

Los datos de entrada al ordenador son:

- Altura del prisma desde la cuchilla (Fig. 17)
- Inclinación del vástago que sujeta dicho prisma (sensor 1)
- Giro de la tornamesa (sensor 2)
- Pendiente longitudinal de la máquina (sensor 3)
- En algunas ocasiones el giro de la cuchilla respecto de su eje (sensor4).
- Ubicación del prisma en cada instante (tiempo real)

- Datos de topografía de la traza (Fig. 17)

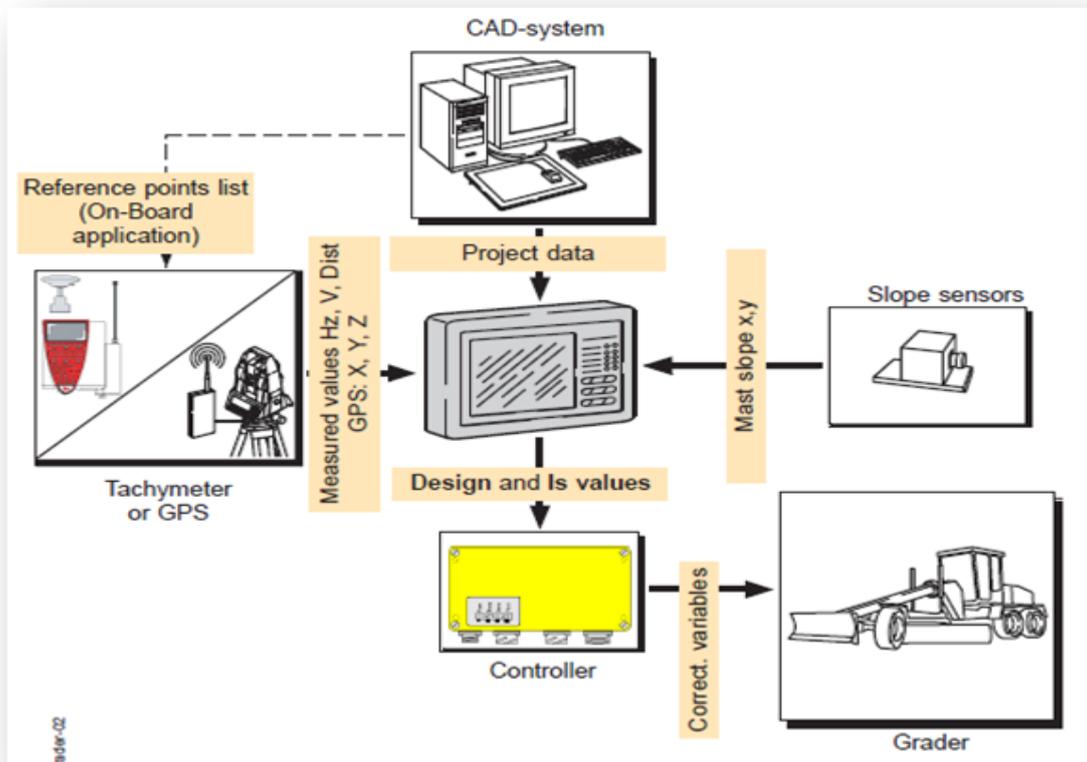


Fig. 14 Esquema de comunicaciones en un sistema de guiado de la motoniveladora 3D[15]

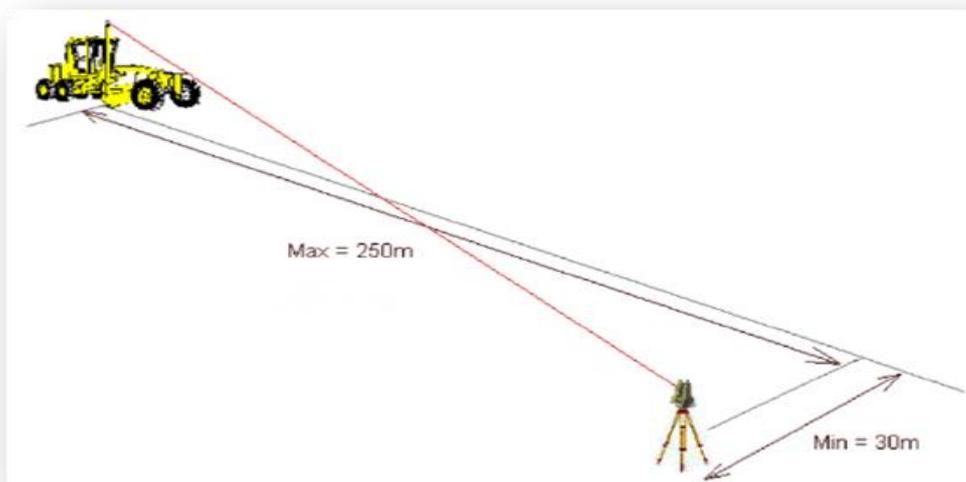


Fig. 15 Esquema de funcionamiento del conjunto Taquímetro - Motoniveladora[16]

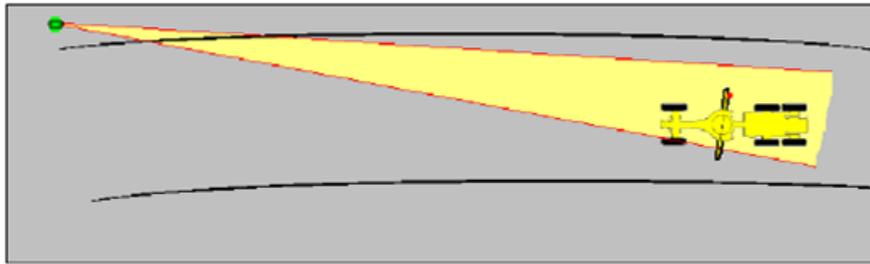


Fig. 16 Posición relativa al vial en el que se trabaja de la motoniveladora y el taquímetro[17]

Los datos de salida (los que el programa proporciona a las electroválvulas de la máquina) son:

- Cota definitiva
- Pendiente transversal definitiva

Todos esos cálculos se llevan a cabo en tiempo real. Esto es posible a la potencia de los ordenadores de campo de los que se dispone hoy día.

El rango de trabajo es de unos 200 - 250 metros desde la estación total

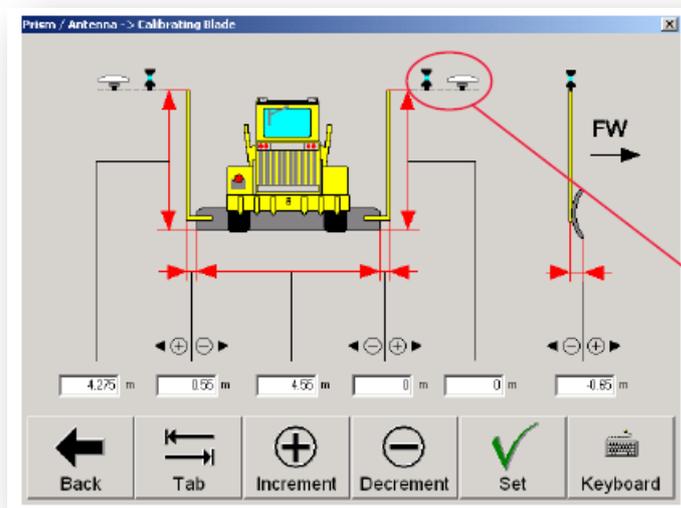


Fig. 17 Detalle de los datos que hay que introducir en el ordenador de la motoniveladora para un correcto funcionamiento del sistema[16]

La obra típica para poder emplear este sistema es cualquier superficie reglada y alabeada definida geoméricamente, con visibilidad suficiente entre cualquier

punto de la traza, como carreteras de nueva construcción, aeropuertos, o plataformas.

No es utilizable en obras que se desarrollan en zonas de poca distancia de visibilidad, como las carreteras de montaña con muchas curvas o las que van entre una arboleda o en zonas urbanas.

Ventajas de este sistema:

- Admite cualquier tipo de superficie alabeada y reglada (Figs. 18 y 19)
- Permite trabajos sin luz de día ni focos de obra
- Permite una autocomprobación de la rasante obtenida, simplemente con volver a pasar la cuchilla de la motoniveladora por cualquier punto de la superficie en una cota ligeramente superior a la definitiva (2 - 4 centímetros) midiendo el espacio que queda libre
- Permite un chequeo de la superficie con la estación total, la radio - módem, un ordenador portátil y un jalón, sin tener que transportar la máquina al tajo.

Inconvenientes:

- Exige una perfecta preparación de los datos del proyecto
- Exige una buena preparación de los datos de las bases cercanas a cada zona de trabajo

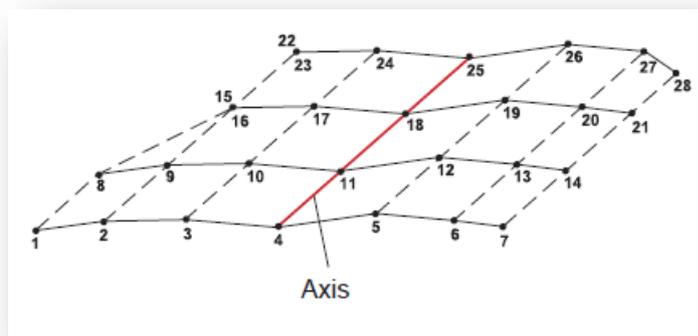


Fig. 18 Modelización de la plataforma que hay que nivelar con los datos que se introducen en el ordenador de la motoniveladora[16]

- No se puede trabajar con niebla o condiciones de visibilidad reducida como obstáculos o carreteras con curvas cerradas, vallas, árboles o cambios bruscos de rasante.
- Exige una buena preparación de los operadores, que no tienen que tenerle miedo alguno a los ordenadores
- Puede decirse que en general se trata de un sistema complejo en el que hay muchos eslabones que pueden fallar, y que el funcionamiento incorrecto de cualquiera de ellos puede dar lugar a errores graves en la nivelación.
- Exige que los elementos mecánicos de la motoniveladora estén bien calibrados y con holguras mínimas, ya que todas las holguras contribuyen a producir errores en el resultado final.

La precisión de este sistema según algunos fabricantes es de +/- 5 mm [18]

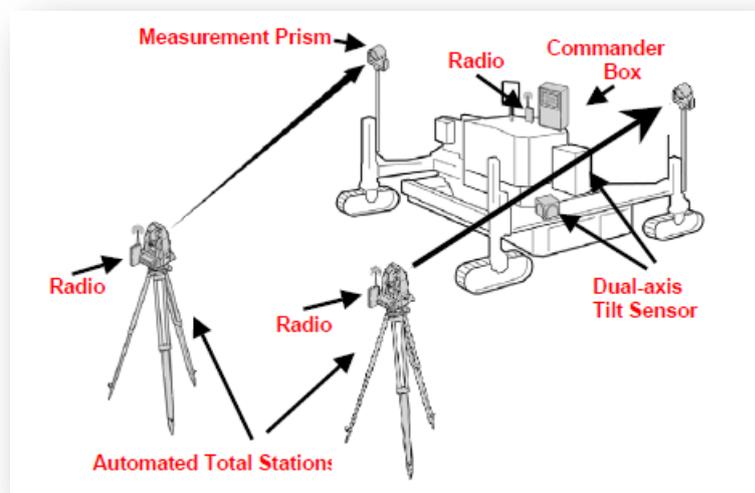


Fig. 19 Utilización de dos estaciones totales para la nivelación de los dos lados de una extendidora de hormigón[19]

F. Sistema 3 D apoyado en GPS (GPS milimétrico)

El concepto es similar al anterior en cuanto a que la motoniveladora, dotada de un ordenador, conoce su posición en coordenadas X Y mediante la captación de datos de los diferentes sistemas de satélites (GPS, Glonass y Galileo), apoyándose en una estación de GPS fija a una distancia del tajo inferior a 10 km, y coloca la altura de la cuchilla en función de los datos del proyecto que tiene introducidos el ordenador [20].



Fig. 20 Volumen cubierto por un solo emisor Lazer Zone en el sistema 3D milimétrico (600 m de radio x 10 m de altura)[21]

La diferencia está en que la ubicación de la motoniveladora se hace con ayuda del sistema GPS en cuanto las coordenadas en X e Y [22], con el que se consiguen precisiones de +/- 3 cm, más que suficientes, y la coordenada Z la da un emisor de láser no convencional y cuyo funcionamiento está sujeto a patente (Fig. 21). El emisor de este rayo no describe un plano, sino una curva en forma de abanico (fan beam) de una altura aproximada de 10,0 m y a una distancia del emisor tal larga como lo permita la visibilidad y la potencia del rayo emisor (unos 600 m, diámetro de la circunferencia alrededor del emisor) (Fig. 20).

Si se pierde la visibilidad, el sistema vuelve a captar los satélites, por lo que su precisión vuelve a +/- 3 cm (0,10') en lugar de +/- 0,6 cm (0,02' según asegura el fabricante, a lo que hay que añadir siempre las holguras del propio movimiento de la máquina).

La información suministrada por los fabricantes del sistema asegura que pueden situarse en la obra varios emisores de láser enlazándose unos con otros en forma que es posible abarcar de una sola vez una superficie de 2.300 m en sentido horizontal y casi 40 m en sentido vertical.



Fig. 21 Los tres elementos principales del sistema GPS Milimétrico: el emisor del haz de láser, el receptor y la antena de GPS para captar los satélites[23]

El principio teórico es que para una misma ordenada, que sería la coordenada Z del prisma, el rayo láser pasa dos veces con un intervalo de tiempo determinado. Midiendo ese intervalo, puede calcularse el punto de la curva en el que se encuentra el prisma de la máquina, determinando por lo tanto la cota en la que se encuentra. Esta información es transmitida al ordenador de la máquina, que automáticamente coloca la cuchilla en la cota correcta.

Los fabricantes de este sistema no proporcionan muchos más detalles sobre el sistema ya que se encuentra bajo patente.

Es necesario tener un apoyo de GPS en la obra para conseguir la precisión requerida.

Es muy probable que este tipo de sistemas mejore con la puesta en marcha del conjunto de satélites de la red Galileo.

Este sistema tiene las mismas aplicaciones que el anterior y las ventajas e inconvenientes siguientes:

Ventajas

- No es necesario tener en cuenta las bases de replanteo de la obra, sino sólo los datos del proyecto [24].
- La ubicación de la máquina se basa en la señal de los satélites GPS, por lo que el cruce con otras máquinas no interrumpe la señal recibida, y por lo tanto, no se pierde la señal en ningún momento, luego los operadores no tienen que estar tan pendientes de este detalle.
- Aunque alguna vez se perdiera la señal, el receptor del haz de láser instalado en la motoniveladora tiene varios sensores (hasta 27) y el emisor es un haz de rayos, con lo que al volver a captar dicho rayo, el dato que se procesa es instantáneo y exacto.

Inconvenientes:

- Sólo puede aplicarse en las obras en las que ya haya un sistema de apoyo en tierra de GPS
- Inconvenientes de las imprecisiones del sistema GPS cuando la administración propietaria de tal sistema decide alterarlo (por ejemplo en épocas de guerra en la que los propietarios del sistema pueden codificar la señal de manera que puede perderse mucha precisión en aquellas aplicaciones que carezcan de los descodificadores correspondientes. No olvidar que el GPS actualmente disponible procede del campo militar).
- No es aplicable en zonas o épocas de sombra de algunos satélites

La precisión alcanzada por este sistema es de $\pm 0.1'$ (3,05 cm) cuando se usa en RTK (Real Time Kinematic, o sea, en tiempo real en movimiento) con condiciones óptimas de los satélites pero puede llegar a ser de $\pm 0,02'$ (0,609 cm) según el fabricante [25] cuando se apoya con la tecnología Lazerzone patentada por ellos.

A este error, propio del sistema, habría que añadir los errores de movimiento propio de la máquina y las holguras de la misma, con lo que en el conjunto difícilmente se puede llegar a precisiones mejores que ± 2 cm.

En la tabla 1 se refleja un resumen de los diferentes tipos de nivelación indicando la precisión de cada uno de ellos y los requisitos para poder ser utilizados. Se ha clasificado cada sistema dentro de un tipo (S1, S2 y S3) para utilizar más adelante esta misma nomenclatura, siendo S1 el sistema con precisión mayor que ± 10 mm, S2 el de precisión ± 20 mm y S3 el de ± 30 mm.

Tabla 1 Resumen de los diferentes sistemas de nivelación con la precisión de cada uno de ellos

SISTEMA	PRECISIÓN (mm)	REQUISITOS	TIPO DE SISTEMA
Laser	10	Solo se pueden nivelar planos	S1
Sensor Ultrasónico de cota	10	Necesita cable	S1
Sensor Ultrasónico de cota y peralte automático	10	Necesita cable	S1
Peraltador automático	30	Necesita estacas	S3
Sistema 3D con estación total robotizada	10		S1
Sistema 3D apoyado en GPS	20	Laser Zone	S2
Estacas	30		S3

Se ha comprobado en el campo la precisión de la nivelación con estacas en una obra ejecutada con maquinaria en buen estado (Cat 140 M) y con un operador considerado como “bueno” según los responsables de la obra.

En un tramo se ha vuelto a nivelar y se han medido las diferencias entre uno y otro sistema, recogándose los datos de la tabla 2, en la que a pesar de nivelarse la capa en un plano 2 cm por encima de la cota 0, el resultado es que la capa está 1,67 cm de media por encima de lo que debería ser, con lo que el resultado final es de 3.67 cm por encima (Fig. 22).

3.1.2 Programas informáticos para la automatización de la nivelación

Existen programas comerciales para introducir los datos obtenidos mediante GPS y calcular la nivelación que hay que conseguir (Ezigrade, de Foresoft Ltd)

Sólo en los sistemas 3D son necesarios programas que puedan llevar a cabo la nivelación automática.

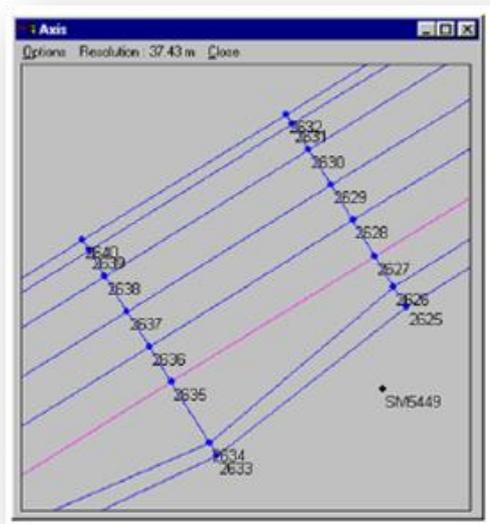


Fig. 23 Modelización de los datos que necesita el programa para el funcionamiento de un sistema 3D. Las líneas funcionan como "cuerdas virtuales" por las que se desliza la cuchilla de la máquina [15]

En el sistema Láser, la máquina se limita a copiar el plano que se emite, aunque este pueda no ser horizontal, admitiéndose inclinaciones hasta del 15%.

Entre los sistemas 3D sólo hay actualmente dos tendencias: aquellos que se basan en la ubicación de la máquina mediante el posicionamiento de la estación total en un punto determinado (que no tiene porqué ser una base, sino que puede ser un punto cualquiera de la superficie) y aquellos que basan el posicionamiento de la máquina partiendo de la red de satélites (sistema GPS milimétrico).

La forma de introducir los datos de la plataforma es la misma en ambos casos: se basa en la definición de una sección tipo, la introducción de los parámetros del eje y la ley de variación de peraltes (Fig. 23).

Previamente a la introducción de datos de la obra, deben introducirse los datos de la máquina en la que se ha instalado el sistema automático:

- Dimensiones de la cuchilla
- Dimensiones del mástil donde va apoyado el prisma
- Ubicación del mismo en la cuchilla (situación en uno de los laterales, a qué distancia, a qué altura, a qué distancia en sentido longitudinal desde el punto de contacto de la cuchilla con el suelo) (Fig. 24).

También ha de ajustarse en la máquina la velocidad de respuesta de cada una de las botellas hidráulicas en relación con la señal que reciban.

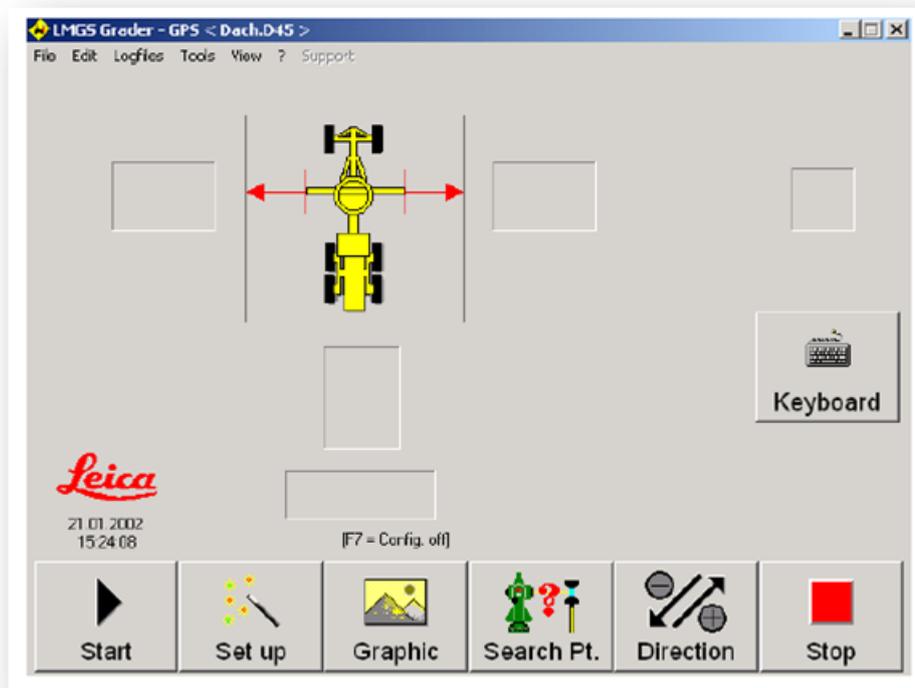


Fig. 24 Pantalla del ordenador de la máquina manejado por el operador de la misma [17]

En cuanto al tratamiento de datos del proyecto, independientemente de la forma del fichero en la que se introduzcan estos datos, el programa genera una

mallas de puntos unidos mediante segmentos. La motoniveladora "palpa" esos segmentos como si fueran cables instalados en el terreno.

La preparación de los datos se hace partiendo de los programas comerciales de topografía, utilizándose programas conversores de datos que generan ficheros que son los que el programa utiliza finalmente.

En general se trata de una preparación rápida, automatizada, pero que es necesario comprobar que no tiene errores en los ficheros de salida, ya que si los hubiera, se paralizaría el equipo de extendido y compactado.

Todos estos programas tienen una secuencia de calibración, es decir, puesta a cero de cada uno de los sensores y ajuste de los datos del programa a las condiciones de campo. Para ello es necesario colocar una serie de estacas, normalmente dos en un mismo perfil separadas algo menos que la longitud total de la cuchilla de la motoniveladora, para que, una vez posada la cuchilla en ellas, el programa se ajuste a la cota exacta y la pendiente transversal de dos puntos concretos.

3.2 Requisitos necesarios para la automatización

Para conseguir emplear los sistemas automáticos con éxito es necesario proceder previamente a la preparación de varios elementos bien diferentes entre sí. Estos son la **Maquinaria, el Proyecto y los Materiales** empleados en cada una de las capas.

3.2.1 Maquinaria

Para conseguir que todos los elementos de la nivelación automática funcionen correctamente, las máquinas deben estar en buen estado de conservación.

Las holguras son necesarias para el buen funcionamiento de las piezas, ya que muchas de ellas tienen que deslizar sobre las otras, a veces con grasa, a veces sin ella ya que la grasa puede servir para fijar porciones de árido que producen

el mismo efecto que la lija y por lo tanto aumentan las holguras entre las piezas.

Las holguras son por lo tanto necesarias, pero su valor ha de estar acotado, y en el momento en el que se supere un cierto umbral, ha de renovarse las piezas de desgaste colocadas al efecto.

Las máquinas han de ser relativamente modernas, basadas en el principio de que un motor, generalmente diesel, mueve un circuito hidráulico que hace mover el resto de los componentes de la máquina, controlado continuamente por electroválvulas que responden a impulsos eléctricos, generados por el operador o por los sistemas controladores instalados.

3.2.2 Proyecto

Este es un punto clave, y es donde se puede actuar de manera más fácil para conseguir mejores resultados.

Hay que distinguir entre las condiciones del entorno en, y el tipo de obra que se quiere proyectar.

A veces no es posible modificar las condiciones de entorno. Por ejemplo, si el proyecto se desarrolla en medio de un parque natural, es fácil que se prohíba derribar la arboleda, que va a impedir la visibilidad, y por lo tanto no va a ser posible el empleo de sistemas tipo 3D (Fig. 25).

Si ese mismo proyecto, en lugar de desarrollarlo en un parque natural lleno de árboles, se lleva a cabo en La Mancha, puede que sí sea fácil poder emplear sistemas automáticos.

Si la superficie es suficientemente grande, pero jalonada de árboles, tampoco será posible pensar en 3D y no quedará más remedio que recurrir a sistemas tradicionales (Fig. 25).



Fig. 25 Estabilización del aparcamiento del Hipódromo de la Zarzuela, donde no es posible utilizar sistemas automáticos en la nivelación por la presencia de árboles

Si la forma de la obra es una superficie como un plano único, de varias hectáreas, es posible pensar en sistemas láser o 3D. Si ésta es alabeada ya no será posible pensar en láser, pero sí en 3D.



Fig. 26 Dificultades para nivelar con sistemas automáticos en una obra con frecuentes curvas, cambios de rasante y arboleda

Suponiendo que la obra tipo es una carretera de 10 km de longitud y 12 metros de anchura en la capa a nivelar (puede ser coronación de tierras o primeras capas de firmes), sin una cantidad excesiva de curvas ni de cambios de

rasante, o bien una urbanización, sobre 200.000 metros cuadrados, de los que los viales suponen un 25 %, unos 50.000 metros cuadrados, cuyas parcelas no tienen suelo a una altura tal que impida visualizar gran parte de la obra.



Fig. 27 Obra de 100 Ha idónea para utilizar cualquier sistema de nivelación automática

En ambos casos, sin edificaciones en medio de la obra, ni arboleda, tapias o cualquier otro tipo de obstáculos que impidan la visibilidad de la motoniveladora desde una estación total colocada en un punto fijo desde el que se puede visualizar una superficie equivalente a un día y medio de trabajo (Fig. 27).

Si se proyectan secciones transversales con un solo plano, la ejecución será rápida y fácil y por lo tanto, de menor coste. Además, será fácil introducir sistemas automáticos para la nivelación.

Si el proyecto se redacta con muchos cambios de pendiente transversal en la sección tipo, secciones cuyas pendientes transversales tienen forma de M, como las calzadas de una autovía en las que la pendiente transversal en las calzadas es contraria a la de la mediana, o en W (Fig. 28) o incluso con alguna de las calles en forma de V, con pendientes transversales de un lado y otro convergiendo en el centro de la carretera, o entroncando con otras en A que es la forma que tiene la calzada típica de 7 m de anchura con bombeo en medio

(Fig. 29), la ejecución deberá ser más lenta para no dejar puntos bajos que den lugar a posibles acumulaciones de agua.

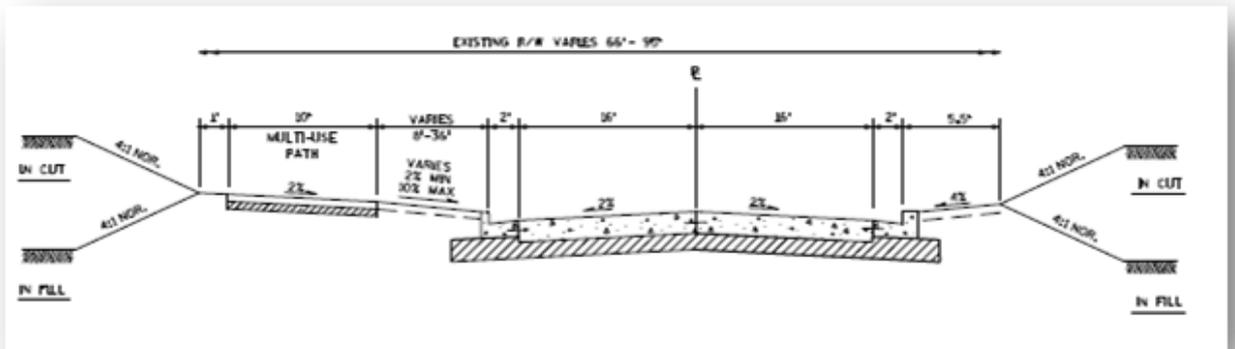


Fig. 28 Sección de urbanización en forma de W, más complicada que nivelar que las secciones en A en la que los arcenes tienen la misma pendiente que la calzada[26]

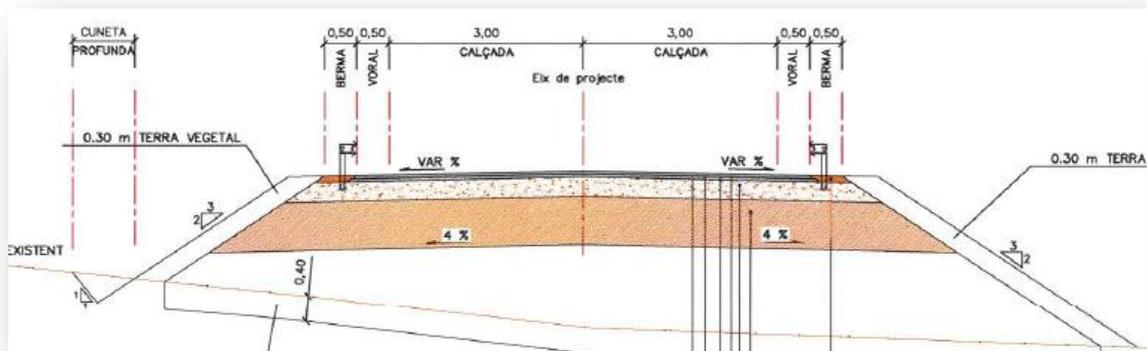


Fig. 29 Sección en "A" o con bombeo a dos aguas

3.2.3 Materiales empleados en cada capa

La principal característica que tiene influencia en una buena terminación de la nivelación es la granulometría.

Otra característica que también influye es la variación de la cohesión interna del material con el tiempo, sobre todo si esta variación es importante a corto plazo (algunas horas). Esto ocurre cuando el suelo se mezcla con conglomerantes como el cemento que en pocas horas (2, 4 dependiendo de factores como el tipo de cemento, el tipo de suelo, la temperatura ambiente y

la humedad) se inicia el proceso de fraguado, endureciendo la mezcla, haciéndola menos trabajable y sobre la que no es posible ni compactar siquiera pasadas algunas horas más.

En estos casos es necesario acortar al máximo el tiempo desde que se mezcla el suelo con el conglomerante.

Puede que con sistemas automáticos se acorte este plazo. A veces, sin embargo, ocurre todo lo contrario, ya que tener que introducir los datos en el ordenador de control de una zona nueva, o simplemente el cambio de ubicación de la estación total, implica plazos mayores que lo que se emplearían con un equipo de topografía tradicional.

Parece claro que dar una buena rasante con tolerancias por debajo de los 2 centímetros no es posible si el material que se maneja tiene una buena proporción de áridos con tamaños superiores a 10 cm (Fig. 30).



Fig. 30 Dificilmente se conseguirán precisiones milimétricas en plataformas conteniendo áridos de 20 cm

De cualquier forma, la correlación *granulometría - buena terminación* es independiente de si el sistema empleado es el tradicional o uno automático.

4. Estudio teórico

Diferentes métodos de nivelación implican diferentes precisiones y por lo tanto secciones de firme de espesores diferentes también. Una forma de valorar cuánto mejor es una forma de nivelación en relación con otra es calcular el número de ejes equivalentes que se consiguen con cada sección de firme. Este cálculo se puede hacer mediante un modelo analítico.

El modelo analítico se basa en el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidos por la acción de las cargas, y consta de dos partes: un modelo de respuesta y un modelo de comportamiento [6] que valoran las condiciones en las que se produce el agotamiento estructural del firme.

No se discute en este estudio sobre la formación de las cargas ni las condiciones climáticas, ya que se trata de comparar unos firmes con otros en las mismas condiciones de entorno.

El modelo habitualmente escogido para el estudio de firmes flexibles es el basado en sistemas multicapa con las hipótesis establecidas por Burmister [27][28].

Resumidamente estas hipótesis son:

- La carga se representa mediante una presión vertical distribuida uniformemente sobre un círculo en la superficie del pavimento.
- Cada capa actúa como un medio elástico lineal homogéneo, isótropo, continuo de espesor constante e indefinido horizontalmente, caracterizado por su Módulo de Elasticidad y por su coeficiente de Poisson.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua y pueden estar adheridas o despegadas completamente entre cada dos capas.
- No se considera el efecto del gradiente térmico
- Se admite que los desplazamientos en el sistema son pequeños.

Actualmente existen distintos programas que permiten calcular tensiones y deformaciones de manera relativamente sencilla, entre los que se pueden citar, por ej., el Alizé, Bizar, Elsym, Kenlayer y Noah.

El programa Icafir empleado en este estudio, une en una sola aplicación tanto un modelo de respuesta como un modelo de comportamiento determinado, de manera que da como resultado un número de ejes equivalentes para una colección de datos de partida concretos, lo que permite comparar rápidamente tales resultados.

Los modelos de comportamiento más utilizados son los basados en leyes de fatiga. Éstas son expresiones matemáticas, obtenidas mediante correlación de ensayos de laboratorio, con el que se determina el número N de aplicaciones de una carga tipo P que puede soportar el material antes de llegar al agotamiento estructural.

4.1 Secciones estudiadas

El estudio se realizará tomando como base la tabla de secciones de la Instrucción de Carreteras 6.1.I.C vigente y tomando sólo las secciones en las que alguna de las capas se pueden nivelar con motoniveladora.

Se estudiarán sólo las secciones correspondientes a un tipo de explanada, concretamente la E3 ya que es la única que tiene asignadas secciones de firme para todos los tipos de tráfico. En el resto de explanadas (E1 y E2) no hay secciones de firme para tráficos pesados (T00, T0 en la E2 y T1 también en la E1).

De todas las secciones, se centrará el estudio en los firmes flexibles, es decir, en aquellas que terminan en ..31 (Fig. 31). Son secciones con Zahorra Artificial sobre la plataforma del tipo E3 y terminadas con mezcla bituminosa en caliente (MBC): 0031, 031, 131, 231, 3131, 3231, 4131 y 4231 de la vigente Norma del Ministerio de Fomento [29].

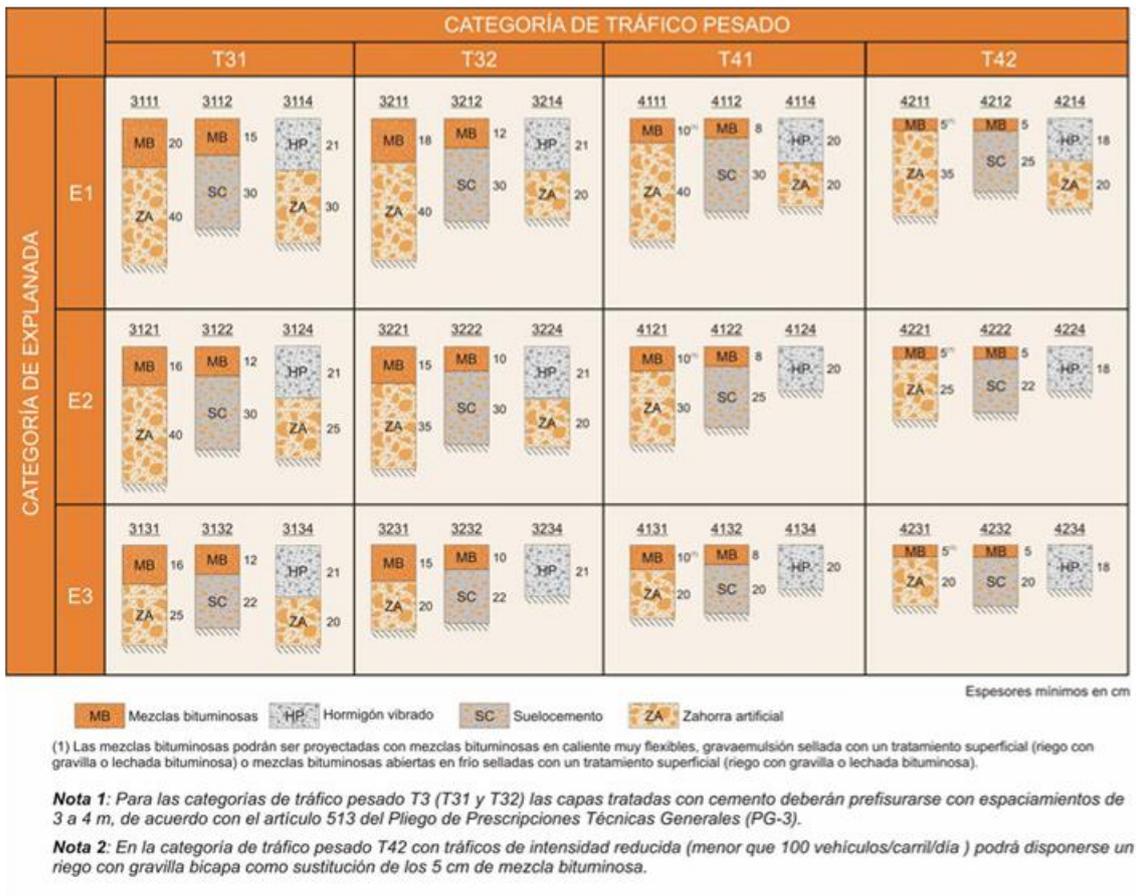
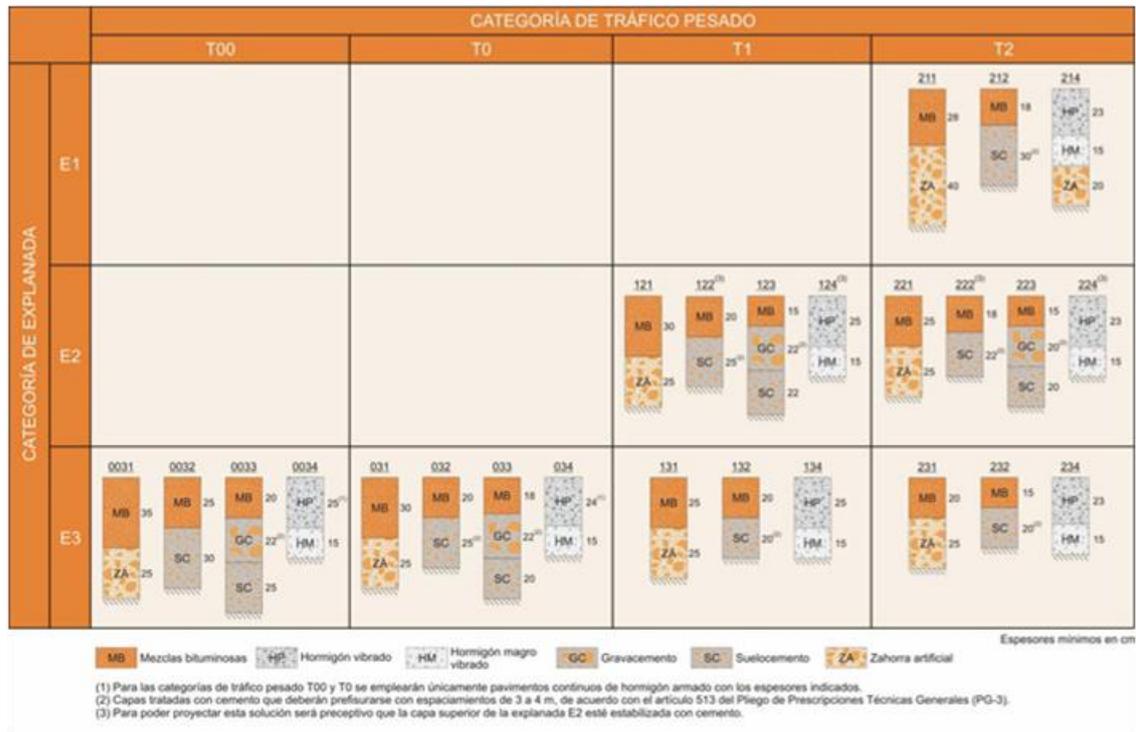


Fig. 31 Secciones tipo del Ministerio de Fomento actualmente vigentes[29]

La nomenclatura de estas secciones determina perfectamente cada una de ellas: La última cifra indica (1 en todas ellas) que la base es de Zahorra artificial. La cifra anterior, que se encuentran apoyadas en una plataforma determinada, en este caso E3, por lo que en todas ellas esta cifra es un 3, y las cifras anteriores indican el tipo de tráfico, T00, T1, T2, T31, T32, T41 o T42.

El espesor de la capa de zahorra artificial varía desde 25 cm en las secciones de mayor tráfico (T00 a T31) a los 20 cm sólo en las tres secciones de tráfico más ligero (T32, T41 y T42).

En todos los casos, sobre la Zahorra Artificial se coloca una o varias capas de Mezcla Bituminosa en Caliente, cuanto mayor es el tráfico, más espesor de Mezcla Bituminosa.

4.2 Procedimiento de cálculo

El estudio se llevará a cabo de la siguiente forma:

- En primer lugar se calculará, según un programa de cálculo estándar, concretamente el ICAFIR (versión 1.1) de la Junta de Andalucía, el número de ejes equivalentes suponiendo que la sección se construye exactamente como se proyecta.
- Después, se calculará, con el mismo programa siempre, el número de ejes equivalentes para ese mismo paquete de firme teniendo en cuenta los errores de construcción según los diferentes sistemas de nivelación que se empleen. Estos errores, que pueden ser de signo positivo o negativo, se estudiarán sólo en el peor de los casos, es decir, en el que interfieran de manera negativa en el resultado de la obra, reduciendo el espesor de las capas superiores, normalmente de mayor capacidad soporte y más caras, a pesar de la clara prescripción del Pliego para impedir esos casos.
- Y por último, se vuelve a calcular el número de ejes equivalentes completando cada capa con espesor de MBC suficiente para conseguir

que el firme pueda soportar el mismo número de ejes que en el caso de proyecto que se ha analizado en primer lugar.

Este cálculo se ha hecho suponiendo que se extiende en la sección una vez terminada una capa de mezcla semidensa o densa adherida con las inferiores, de un espesor tal que la sección nueva resultante soporta el mismo número de ejes que la sección de proyecto.

El número de ejes equivalente en cada sección se ha calculado con incrementos de espesores de centésimas de centímetro, aunque no pueda llevarse a la práctica este efecto con tal precisión, para tener una idea aproximada del coste teórico que puede suponer una nivelación defectuosa, y poder compararlo con el coste que supone la mejora en la nivelación por emplear métodos automáticos que en principio pueden parecer más caros pero que dan como resultado una ejecución más barata del firme.

En definitiva, se analiza la reducción de número de ejes equivalentes que produce la reducción del espesor de una de las capas de firme en proporción con el número de ejes de proyecto, y por otra parte, la cantidad de MBC que habría que añadir para volver a tener la misma cantidad de ejes equivalentes (Fig. 32).

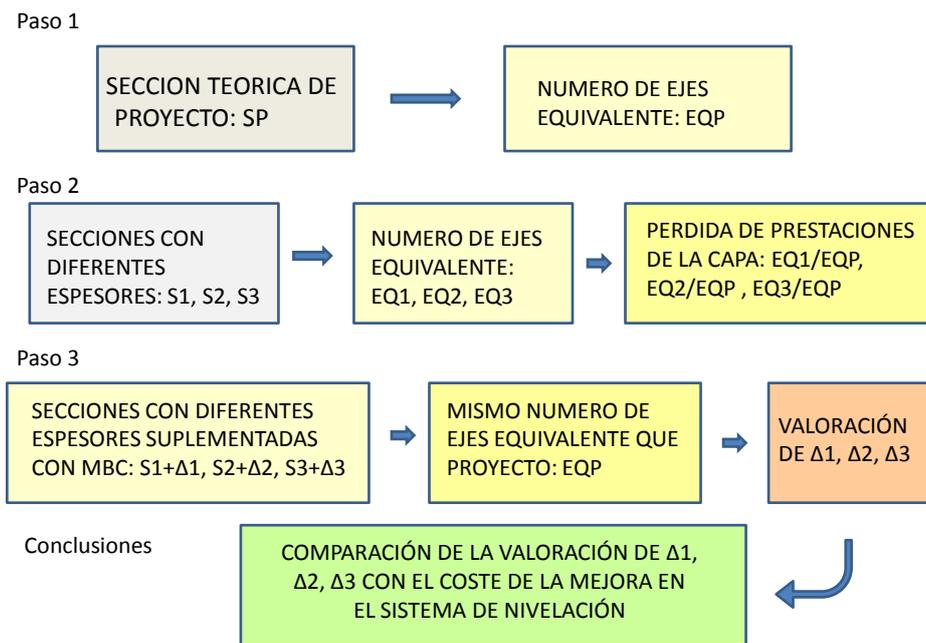


Fig. 32 Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo

Si se valora este incremento de MBC, puede relacionarse el incremento de coste por emplear sistemas más sofisticados de nivelación y el ahorro que puede llegar a suponer (o el gasto en el caso de no emplearse estos sistemas).

Este mismo estudio puede hacerse con otros condicionantes, como por ejemplo, construir las capas superiores del firme de espesor constante independientemente de la precisión con la que se haya llegado a las mismas. Sin embargo, la metodología seleccionada se corresponde mejor con la práctica real, y que, además, los defectos o excesos de espesores en capas inferiores no son constantes, sino puntuales tal y como se ha explicado más arriba.

Normalmente el objetivo final es llegar a la capa de rodadura con la cota definida en Proyecto. Todos los inconvenientes que supone una disminución de ejes equivalentes soportados por la sección construida con defectos de nivelación podrían compensarse extendiendo más capas de MBC, pero la

presencia de obras de paso, tanto inferiores como superiores, y otros elementos de la obra, condicionan esta cota, que es fácil de comprobar una vez terminada ésta.

4.3 Descripción del programa de cálculo utilizado

De todas las características que debe cumplir un firme, en este caso concreto sólo se tomará en cuenta la capacidad soporte del mismo, medida en términos de ejes equivalentes, que es el parámetro que se va a comparar según el método de nivelación escogido.

La capacidad soporte se estudiará mediante un procedimiento analítico [6], y lo que se estudiará será la tabla de firmes vigente en las carreteras del Estado, fijada en la actual Norma de Firmes 6.1.I.C [29].

El método analítico consta de dos partes: un modelo de respuesta, con el que se determinan tensiones, deformaciones y desplazamientos, y un modelo de comportamiento, con el que se valoran las condiciones en las que se produce el agotamiento estructural del firme.

El programa utilizado es el Icafir [30] en su primera versión, cuyo origen está en la primera Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía de 1999, desarrollado como herramienta empleada para calcular los espesores de los diferentes materiales, tanto en las explanadas como en los firmes, para la construcción de sus carreteras.

Está basado [30] en el cálculo analítico, partiendo de un modelo matemático que obtiene tensiones y deformaciones debidas a sollicitaciones estimadas. Éstas se comparan con los valores límites para determinar la vida teórica de servicio. Para cada uno de los materiales se fijan unas características de Módulo de Elasticidad, coeficiente de Poisson y ley de fatiga, de manera que los usuarios del programa no pueden modificar estos parámetros según su conveniencia.

4.4 Parámetros de estudio de los materiales que componen las capas

Las secciones de firme estudiadas pertenecen al grupo de las que van apoyadas sobre explanadas de la máxima categoría (E3) de la Norma de Carreteras.

Los materiales del firme (Zahorra Artificial y Mezclas bituminosas en caliente) deben cumplir las siguientes características:

Zahorra: Artículo 501 del PPTGCA y artículo 501 del PG3

Los valores del Módulo de Young de las Zahorras Artificiales y de las Mezclas Bituminosas en caliente serán respectivamente de 600 MPa para la Zahorra, de 6.000 MPa para las mezclas densas y semidensas, y 5.000 MPa para las mezclas gruesas. Para las mezclas bituminosas se adoptará un coeficiente de Poisson de 0,33 y para la Zahorra, 0,35.

Para el cimiento de firme el parámetro crítico es la deformación vertical en la cara superior del mismo mientras que para el firme bituminoso es la máxima deformación horizontal en su fibra inferior.

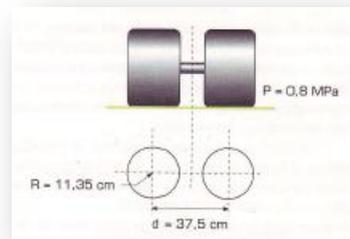


Fig. 33 Esquema de la carga tipo[4]

La carga tipo es el eje formado por ruedas gemelas dobles con una presión de 0,8 MPa, huella circular de radio 11,35 cm y distancia entre centros de huella de 37,5 cm (Fig. 33).

En cuanto a la zona térmica y pluviometría escogida, se ha supuesto que el firme estudiado está en la zona térmica determinada como ZT1 y zona pluviométrica húmeda.

Los datos que pueden ser modificados son por lo tanto, los materiales que componen una sección determinada y el espesor de cada una de las capas.

Con este programa se calcula de manera separada la coronación de la explanada (o cimiento del firme) y el firme.

Como ya se ha mencionado, el cálculo se efectúa mediante un programa basado en el Modelo Elástico Multicapa de Burmister.

La adherencia entre capas se considera total, según el punto 5.2.1.2 del manual de dicha Instrucción [4].

El programa tiene incorporadas las diferentes leyes de fatiga de cada uno de los materiales, y la salida del mismo es un número de ejes equivalentes, que compara con el número de ejes que se han introducido como dato, comprobando si la sección estudiada es o no válida.

Para el caso de las mezclas bituminosas, la ley de fatiga aplicada es la del CEDEX que relaciona las deformaciones unitarias de tracción, ϵ , con el número N admisible de aplicaciones de carga tipo:

$$\mathbf{Log \epsilon = -2,19093 - 0,27243 x log N}$$

Posteriormente, en 2006, apareció una nueva versión del Icafir, donde se corrigieron los defectos o las carencias más notables de la primera versión, como por ejemplo dejar en manos del proyectista la construcción de espesores demasiado delgados, que aunque desde el punto de vista del cálculo cumplen suficientemente bien, no ocurre lo mismo desde el punto de vista constructivo. En esta última versión se limitan, entre otras cosas, los espesores mínimos de ciertas capas, por lo que no es de utilidad para este trabajo de investigación.

4.5 Resultados

Se ha analizado la influencia de tres sistemas de nivelación diferentes en los que cada uno de ellos tiene una precisión diferente que se ha tomado como 10, 20 ó 30 mm llamándolos S1, S2 y S3 respectivamente, en el número de ejes

equivalentes que soportaría el firme así construido, al tiempo que se calcula también qué espesor de MBC sería necesario extender para suplir los defectos debidos al empleo de sistemas poco precisos.

Las diferencias entre la cota o el espesor teórico y el real, no se referirán a las holguras permitidas en los pliegos, sino a datos que pueden darse en el campo como consecuencia del sistema de nivelación empleado

Cada una de las tablas siguientes se refiere a una sección distinta, que se puede ver en el encabezamiento de la misma con fondo azul.

Los datos reflejados en las mismas representan lo siguiente (Fig. 34):

En la parte de la izquierda están puestos los materiales con los que se construye cada capa, en la columna siguiente, los espesores de las mismas y en la parte baja de esa segunda columna, el número de ejes equivalentes que el programa da para esa sección determinada.

En las tres siguientes columnas, una para cada tipo de sección construida con un método diferente de nivelación, se reflejan los espesores de las capas y debajo el número de ejes equivalentes que da el cálculo, y debajo, en la última fila, estos mismos ejes como porcentaje de los de la sección de proyecto.

En las tres columnas siguientes, también para cada tipo de sección, se añade en la fila correspondiente, el incremento de mezcla bituminosa que habría que añadir para conseguir un número de ejes como el de proyecto, a pesar de haber hecho una nivelación defectuosa en cada caso, y debajo, el número de ejes que el programa calcula con esta nueva sección.

El resumen de todos estos datos se recoge en la tabla 4.

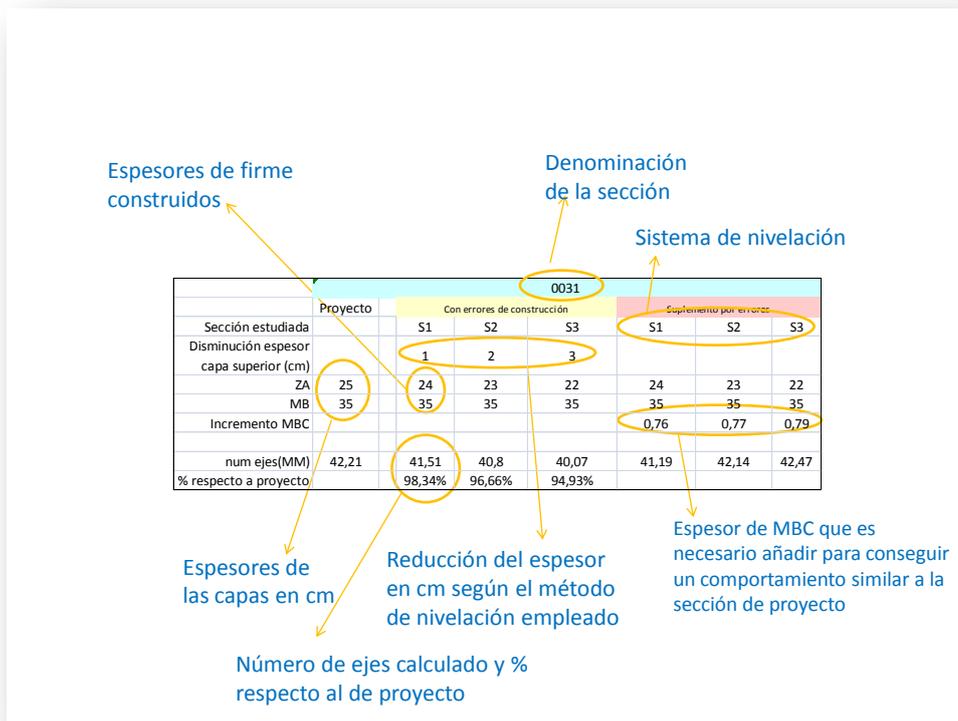


Fig. 34 Explicación de los datos que aparecen en las tablas de calculo

Los cálculos de cada sección son los que se pueden ver en la tabla 3 resumidos en la tabla 4.

Tablas 3 Resultados del cálculo

Tabla 3.1 Resultados del cálculo. Sección 0031

Sección estudiada	0031						
	Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)		1	2	3			
ZA	25	24	23	22	24	23	22
MB	35	35	35	35	35	35	35
Incremento MBC					0,76	0,77	0,79
num ejes(MM)	42,21	41,51	40,8	40,07	41,19	42,14	42,47
% respecto a proyecto		98,34%	96,66%	94,93%			

Tabla 3.1 Resultados

del cálculo.
Sección 0031

		031						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	25	24	23	22	24	23	22
	MB	30	30	30	30	30	30	30
Incremento MBC						0,5	0,51	0,53
	num ejes(MM)	19,38	19,04	18,68	18,32	19,39	19,32	19,42
	% respecto a proyecto		98,25%	96,39%	94,53%			

		131						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	25	24	23	22	24	23	22
	MB	25	25	25	25	25	25	25
Incremento MBC						0,25	0,4	0,6
	num ejes(MM)	8,96	8,5	8,32	8,15	8,87	8,92	9,04
	% respecto a proyecto		94,87%	92,86%	90,96%			

		231						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	25	24	23	22	24	23	22
	MB	20	20	20	20	20	20	20
Incremento MBC						0,05	0,2	0,3
	num ejes(10e5)	35,90	35,17	34,41	33,64	35,55	35,94	35,89
	% respecto a proyecto		97,97%	95,85%	93,70%			

		3131						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	25	24	23	22	24	23	22
	MB	16	16	16	16	16	16	16
Incremento MBC						0,1	0,2	0,3
	num ejes(10e5)	14,65	14,34	14,02	13,68	14,67	14,68	14,66

% respecto a proyecto	97,88%	95,70%	93,38%
-----------------------	--------	--------	--------

		3231						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	20	19	18	17	19	18	17
	MB	15	15	15	15	15	15	15
	Incremento MBC					0,1	0,25	0,39
	num ejes(10e5)	10,28	9,98	9,67	9,36	10,21	10,26	10,26
	% respecto a proyecto		97,08%	94,07%	91,05%			

		4131						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	20	19	18	17	19	18	17
	MB	10	10	10	10	10	10	10
	Incremento MBC					0,14	0,28	0,45
	num ejes(10e5)	3,28	3,18	3,07	2,95	3,28	3,27	3,28
	% respecto a proyecto		96,95%	93,60%	89,94%			

		4231						
		Proyecto	Con errores de construcción			Suplemento por errores		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
Disminución espesor capa superior (cm)			1	2	3			
	ZA	20	19	18	17	19	18	17
	MB	5	5	5	5	5	5	5
	Incremento MBC					1,3	1,65	1,95
	num ejes(MM)	2,63	2,55	2,45	Nc	2,64	2,65	2,65
	% respecto a proyecto		96,96%	93,16%				

Tabla 4 Resumen de resultados

Secc\sist niv	Ejes equivalentes			incrementos MBC			valoración incrementos MBC		
	S1	S2	S3	(cm)			(Euros)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0031	98,34%	96,66%	94,93%	0,76	0,77	0,79	0,73	0,74	0,76
031	98,25%	96,39%	94,53%	0,50	0,51	0,53	0,48	0,49	0,51
131	94,87%	92,86%	90,96%	0,25	0,40	0,60	0,24	0,38	0,58
231	97,97%	95,85%	93,70%	0,05	0,20	0,30	0,05	0,19	0,29
3131	97,88%	95,70%	93,38%	0,10	0,20	0,30	0,10	0,19	0,29
3231	97,08%	94,07%	91,05%	0,10	0,25	0,39	0,10	0,24	0,37
4131	96,95%	93,60%	89,94%	0,14	0,28	0,45	0,13	0,27	0,43
4231	96,96%	93,16%		1,30	1,65	1,95	1,25	1,58	1,87
Media	97,29%	94,78%	92,64%	0,40	0,53	0,66	0,38	0,51	0,64

5. Análisis de resultados

La reducción de ejes equivalentes es relativamente pequeña siendo la diferencia entre las medias del sistema S1 y los otros dos de 2,50 % y 4,69 % respectivamente, tal y como se puede ver en la última fila de la tabla 5.

La reducción del número de ejes equivalentes según el sistema de nivelación empleado es mayor conforme el sistema sea más impreciso (Fig. 39) para todas las secciones de firme. En dicha figura se refleja cada una de las secciones (0031 a 4231) y encima de la denominación de cada una de ellas, el número de ejes teórico de la sección de proyecto (en la que se construye exactamente como se proyecta).

Cada una de las formas de nivelación está en un color y se ve claramente cómo el número de ejes equivalente va disminuyendo conforme el sistema es más impreciso. El eje de ordenadas da el porcentaje sobre la cifra de ejes equivalentes de proyecto que se alcanza con cada sistema de nivelación.

El cálculo indica que en el caso de tráfico muy ligeros (T42) debería ser obligatorio emplear sistemas de nivelación muy precisos, ya que en caso contrario el firme sería insuficiente incluso para la carga de un solo eje pesado,

o bien sería necesario superponer una capa de 1,95 cm de MBC con un coste de 1,87 €/m², casi 19 veces superior al de la automatización.

Como consecuencia, el coste de reparación para dejar el firme con unas prestaciones iguales que las proyectadas (incremento de espesor de MBC) es mayor cuanto más impreciso es el sistema de nivelación variando desde 0,05 cm en el menor caso hasta 1,95 cm en el mayor en la sección 4231 en la que se haya trabajado con el sistema de nivelación más impreciso (S3).

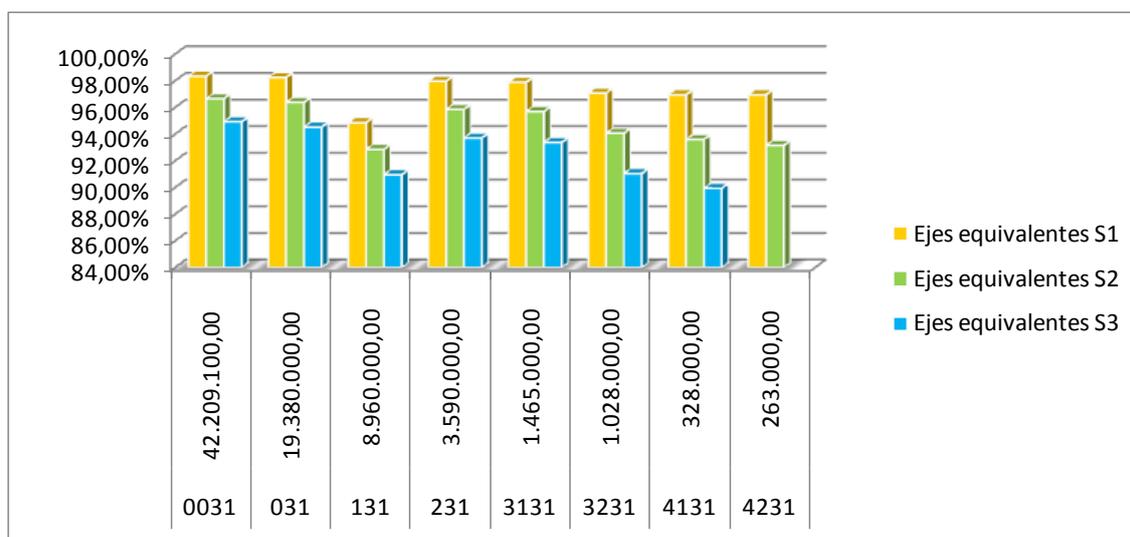


Fig. 33 Disminución del % de ejes equivalentes en cada sección de firme con los diferentes sistemas de nivelación

Para comparar el coste que supone recrear la sección con algo de Mezcla Bituminosa con el coste de empleo de sistemas de nivelación más precisos, se da un valor a la tonelada de MBC fabricada, transportada y colocada en obra, de 40,00 €/t, que puede ser un precio de mercado hoy día (2010) para una obra de más de 10.000 t en carretera abierta.

El precio de automatización de una máquina se puede estimar de dos formas: una es ver el coste de cada una de las partes que lo componen y otra es obtener un precio de mercado.

Los costes que hay que tener en cuenta para el cálculo real del precio serían:

- Adquisición de todos los aparatos necesarios
- Instalación de los mismos
- Aprendizaje del maquinista

- Transformación de ficheros de datos de la obra

Frente a esos costes, hay algunos ahorros no despreciables como:

- Peones de topografía necesarios para la colocación de estacas
- Peón necesario para limpiar las estacas hasta terminar la nivelación
- Repeticiones en la colocación de estacas al ser pisadas por los rodillos o el tráfico de obra.

El coste de nivelación con un sistema 3D según una de las empresas con máquinas equipadas con este sistema es de 0,10 €/m²[31] de incremento sobre la nivelación con estacas.

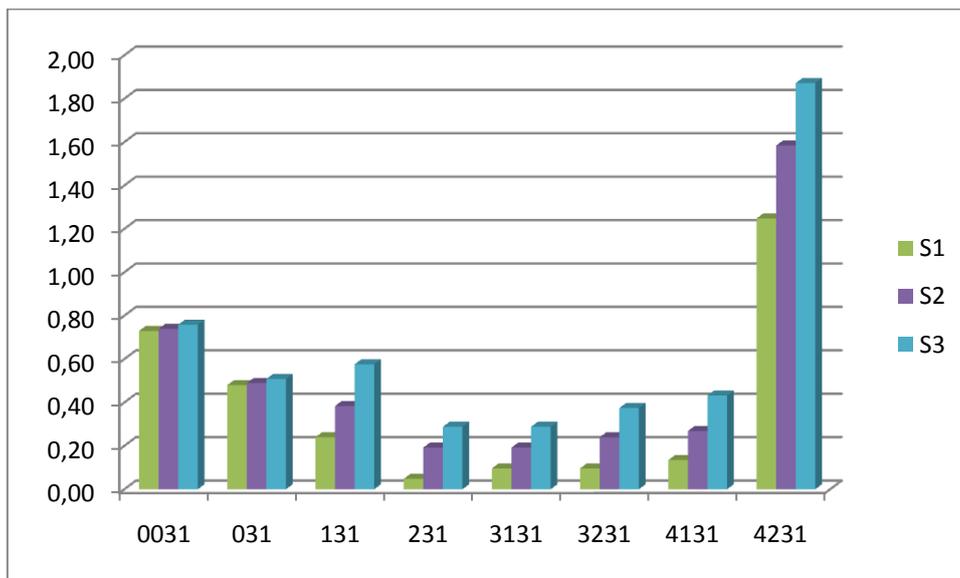


Fig. 34 Coste de las correcciones de la nivelación para llegar a las mismas prestaciones en cada sección de firme

Se observa en la Tabla 4 que en todos los casos, excepto en el caso de la sección 231 nivelada con sistema S1, el coste derivado de la no utilización de sistemas automáticos es mayor que 0,10 €/m², que es el coste que implica la automatización de la operación para ejecutar la nivelación con sistemas del tipo S1 (Fig. 40).

La diferencia entre nivelar de la mejor de las maneras posibles (S1) y la normal con estacas (S3) es de 0,25 €/m² (valor medio de todas las secciones), más de dos veces y media superior al coste del empleo de sistemas automáticos.

En la tabla 5 se refleja la diferencia en el porcentaje de ejes equivalentes y también la diferencia del coste en los casos en los que se emplea el sistema más preciso S1 y los otros dos.

Se observa (Fig. 41) que esta diferencia es mayor en las secciones de tráfico más ligero (7,01 % para el tráfico 4131 y 3,41 para el 0031).

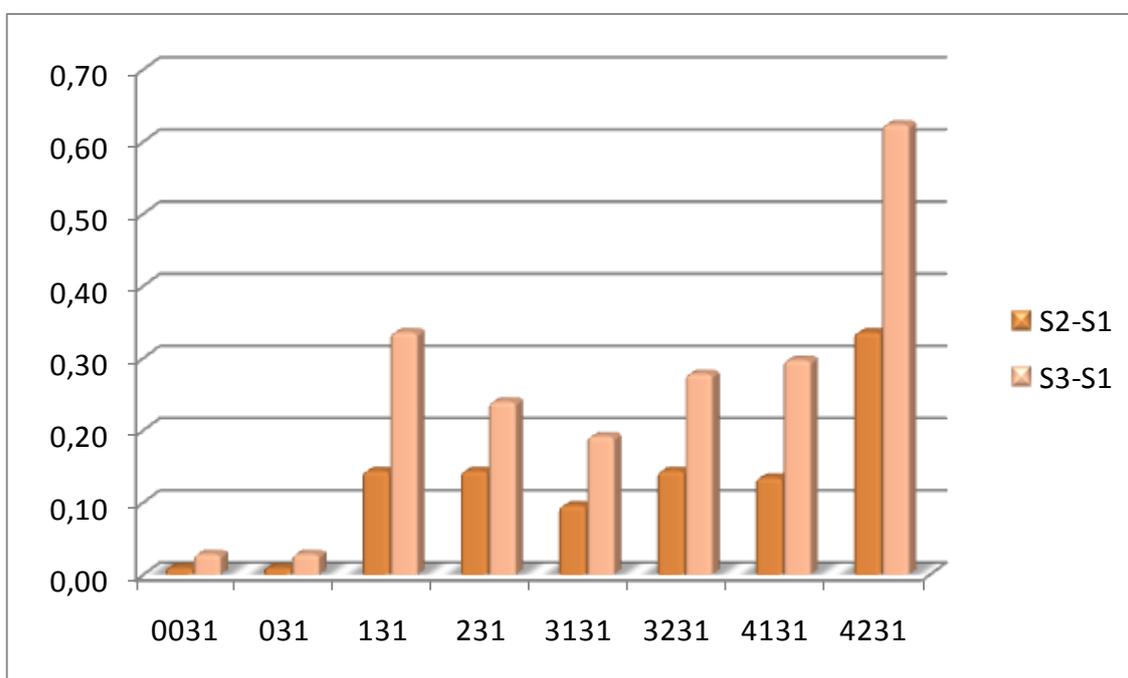


Fig. 35 Diferencia de coste entre los sistemas S2 y S3 con el sistema S1

A la vista de la Fig 41, podría parecer que sólo sería necesario aplicar sistemas automáticos para tráficos T1 y más ligeros pero hay que tener en cuenta que el coste del error de nivelación, aún con el empleo de sistemas del tipo S1, para tráfico T00 es ya de 0,73 €/m², siete veces superior al coste de la automatización (0,10 €/m²).

Tabla 5 comparación entre el sistema S1 y S3

Secc\sist niv	Ejes equivalentes		Valoración incrementos MBC	
	(%)		(Euros)	
	S2-S1	S3-S1	S2-S1	S3-S1
0031	1,68%	3,41%	0,01	0,03
031	1,86%	3,72%	0,01	0,03
131	2,01%	3,91%	0,14	0,34
231	2,12%	4,26%	0,14	0,24
3131	2,18%	4,51%	0,10	0,19
3231	3,02%	6,03%	0,14	0,28
4131	3,35%	7,01%	0,13	0,30
4231	3,80%		0,34	0,62
Media	2,50%	4,69%	0,13	0,20

6. Conclusiones

La aplicación de la informática al mundo de la maquinaria ha puesto a disposición un buen número de técnicas diferentes para la mejora del funcionamiento de la maquinaria en general y también para la mejora en la nivelación en carreteras, viales o superficies en general.

Los sistemas disponibles actualmente para la automatización de las labores de nivelación de capas de firmes, pese a su elevado coste de adquisición, implantación y formación de los operadores, llevan consigo una serie de ventajas importantes:

- Mejora de la precisión
- Mejora de la calidad de las capas terminadas
- Mejora de los rendimientos conseguidos

En este trabajo no se analizan la disminución de costes debidos a una mejora de los rendimientos del equipo de nivelación en general, sino sólo los costes derivados de la mejora de la precisión.

No todos los sistemas analizados tienen la misma precisión ni pueden ser utilizados en todas las superficies o proyectos. Sólo los sistemas llamados 3D pueden utilizarse teóricamente en cualquier superficie reglada, aunque también son los que más atención precisan en cuanto a la preparación de los datos y al

apoyo de campo: se precisan bases bien definidas, visibles desde un buen tramo de la superficie a nivelar y perfectamente niveladas.

Los sistemas con apoyo en redes de satélites sin duda aumentarán su precisión en los próximos años que actualmente es más que suficiente para el movimiento de tierras, quizá en las capas de firme no alcance los mínimos necesarios para conseguir una calidad final del trabajo aceptable.

El coste de la nivelación con sistemas automáticos del tipo 3D o Láser (S1) es en todos los casos estudiados (todas las secciones de firme flexible con zahorra artificial de la vigente Norma 6.1-IC para una plataforma determinada (E3)) inferior al coste en los casos en los que la nivelación se ha hecho por el método tradicional de estacas (S3) si se valoran los errores cometidos como el coste de la capa de MBC con la que hay que suplementar la sección construida para conseguir una sección de las mismas prestaciones teóricas que la proyectada.

Una manera eficaz de trasladar a las obras estas conclusiones sería que la Propiedad de cada una de las obras pusiera el metro cuadrado de nivelación con sistemas automáticos como una unidad más de los proyectos: todo lo que se cobra tiene muchas probabilidades de ser ejecutado, mientras que todo lo que se deja en manos de las recomendaciones tiene pocas probabilidades de cumplirse si no va acompañado del cobro correspondiente al coste de esa unidad.

Como resumen de este trabajo se concluiría que debería normalizarse la nivelación con apoyo de sistemas automáticos, lo que repercute positivamente en el resultado de la sección de firme construida. Al mismo tiempo, la mayor utilización de sistemas automáticos tiene como consecuencia una mayor presencia de los mismos, al ser cada vez más el número de máquinas equipadas con estos sistemas, lo que sin duda repercutirá en el coste de los mismos.

7. Referencias

1. www.integrinautics.com/agriculture.htm. [En línea]
2. **Forrestel, Ryan**. 3D Models for machine guidance systems. [En línea] 30 de 09 de 2007.
3. **Fomento, Ministerio de**. Instrucción de Carreteras 3.1 IC Trazado, 6.1 IC Firmes. *BOE*. 2004, 25 Mayo 2004.
4. **Bas Dutor, Alberto et al**. *Istrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía*. Sevilla : Junta de Andalucía, 2007. J-670-07.
5. **Moba Controls**. *GS 496 Manejo*. 2000.
6. **Kraemer, Carlos; Pardillo, José M^a et al**. *Ingeniería de Carreteras*. Madrid : McGraw Hill/Interamericana de España s.a.u., 2004. 84-481-3999-2.
7. **Carreteras, Dirección General de**. *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid : Ministerio de obras públicas. Secetaría General Técnica, 1975. 84-500-7440-1.
8. **R., Heikkila y M., Jaakkola**. *Automation of road construction - The State of the art in Europe*. Tokio : ISARC, 2006.
9. *Factors in productivity and unit cost for advanced machine guidance*. **Snaebjorn Jonasson, A. M. ASCE; Phillip S. Dunston, A.M.ASCE, Ahmed, Kamal y Hamilton, Jeff**. September/october Pag 367-374, s.l. : Journal of construction engineering and management, 2002.
10. **Paniagua, Jesús**. *Maquinaria de construcción y obra pública inteligente. Automatización*. s.l. : Departamento de Diseño Electrónico y control. Instituto Tecnológico de Aragón, 2006.
11. **Benjamín Bentura Aznárez**. *Estudio de tendencias tecnológicas en el sector de la maquinaria de obras públicas, construcción y minería*. Zaragoza : Anmopyc, 2007.
12. **COTEC**. *Documentos Cotec sobre oportunidades tecnológicas. 23 robótica y automatización*. Madrid : COTEC, Marzo 2006. ISBN 84-95336-61-8.
13. *Just drive! Machine control technology taking over grading*. **Zeyher, Allen**. 4, Illinois : Roads & Bridges. Scranton Gillette Communications, 2002, Vol. 40.
14. **Trimble**. La versión del Trimble GCS900 Grade Control System lleva a las operaciones de movimientos de tierra a un nivel más alto. Dayton, Ohio : s.n., 2007.
15. **Leica Geosystems**. *LMGS-Grader Manual de Empleo*. Heerbrugg, Suiza : s.n., 2002.

16. **Leica Machine control systems.** Sistema de control 3D con estación total. Guía rápida. Madrid : Leica Geosystems, 2000.
17. **Leica Geosystems.** LMGS-G Grader Manual de campo. Heerbrugg : s.n., 2002.
18. **Trimble GmbH.** BladePro 3D automatic grade control system. Raunheim : Trimble, 2002.
19. **Iowa Department of transportation.** *Stingless Portland Cement Concrete Paving.* Ames, Iowa : Center for Portland Cement Concrete Paviment technology, 2004.
20. **Foro Cartesia.** Foro Cartesia, mmGPS, Telemática, sensores sónicos.
<http://www.cartesia.org/foro/index.php>. [En línea] [Citado el: 2 de Junio de 2009.]
21. **Topcon.** Frequently Asked Questions (FAQ's) about Topcon's mmGPS Technology. 2007.
22. *High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning.* **F., PEYRET, D., BETAILE y G., HINTZY.** no 3, pp. 229-314 (6 ref.), pp. 299-314 , Pittsburgh : Automation in construction, 2000, Vol. 9. ISSN 0926-5805 .
23. **Topcon Corporation.** Topcon GPS millimeter. A new dimension of precision and productivity. 2004. 7010-0670 Rev A.
24. **Topcon.** Motor grader mmGPS control. 2008.
25. *Topcon mmGPS FAQ's.* 2004.
26. **TYPICAL2 seccion con W city.fitchburg.wi.us.pdf.** Typical sections. Fitchburg, wi : Bentley Systems, Inc., 2007. 0637ts001.
27. *The general theory of stresses and displacements in layered soil systems.* **Burmister, D. M.** s.l. : Journal of applied physics, 1945, Vol. 16.
28. **Burmister, D.M.** *The theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways.* s.l. : Proceedings HRB, 1954.
29. **Carreteras, Dirección General de.** *Secciones de firme y capas estructurales de firmes.* Madrid : Ministerio de Fomento. Secretaría general técnica, 2002. 84-498 0632-1.
30. **Blas González González et al.** *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.* Sevilla : Junta de Andalucía. Consejería de Obras públicas y transportes. Dirección General de Carreteras, 1999. 84-8095-329-2.
31. **Firmes Ecológicos Soltec, S.A.** Oferta de nivelación con sistema 3D. *Oferta económica.* Avila : s.n., 2010.
32. **Caterpillar.** s.l. : www.finanzauto.es, 2008.
33. *Carreteras.* **Lazcano Acedo, Juan Francisco, Uriol Salcedo, Jose Ignacio y Lacleta Muñoz, Ángel.** 3388, Madrid : Revista de Obras Públicas, 1999.

34. **Williams, R.I.T.** *Cement-treated pavements*. London : Elsevier Applied Science Publishers, 1986.
35. **Junta de Andalucía.** http://www.giasa.com/icafir/icafir.asp?alias=pub_cat. [En línea] 2006. [Citado el: 28 de Julio de 2008.]
36. **Instituto español del cemento y sus aplicaciones IECA; Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España ANCADE; Asociación nacional técnica de estabilizados de suelos y reciclado de firmes ANTER.** *Manual de estabilizaciones con cal y cemento*. Madrid : En imprenta, 2008.
37. **del Val Melús, Miguel Angel; Díaz Minguela, Jesús; Solís Villa, Luis Alberto.** *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos*. Valladolid : Junta de Castilla y León, 2004. S 497-2004.
38. *Suelocemento en planta frente a suelocemento in situ.* **Saló, Anna Gelonch y Fernández, Miguel López-Bachiller.** Valladolid : s.n., 2008.
39. s.l. : www.foresoft.com.
40. *Field experiments in automated monitoring of road construction.* **Navon, R y Shpatnitsky, Y.** s.l. : Journal of construction engineering and management - ASCE, 2005, Vols. 131, pag 487-493.
41. **Fomento, Ministerio de.** Instrucción de Carreteras 3.1 IC Trazado, 6.1 IC Firmes. *BOE*. 2000, 28 Feb 2000.
42. **Caterpillar.** Accugrade Grade Control System for track type tractors. USA : s.n., 2006. AEHQ5703-01 (10-06).

Anejo 1: Salidas del programa de cálculo

Anejo 2: Ofertas de precios de nivelación con sistema 3D