

OPTIMIZACIÓN DE LOS TRANSPORTES EN LAS OBRAS LINEALES

TRANSPORT OPTIMIZATION ON LINEAL WORKS

JOSÉ PENADÉS MARTÍ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

EDMUNDO BALBONTÍN BRAVO. Ingeniero Industrial.

Jefe del Servicio de Métodos de Dragados Obras y Proyectos.

RESUMEN: La composición óptima de la flota de transporte de una obra lineal puede variar de día en día. Con las herramientas habituales de planificación, su determinación puede considerarse una misión imposible por la dificultad de diseñar programas en los que las dotaciones de recursos evolucionen en el tiempo de forma realista. El uso de valores medios, tanto en las distancias de acarreo como en las dotaciones requeridas, hace poco fiable la comparación de alternativas posibles.

El uso de un software que genera diagramas de Espacios - Tiempos y que asocia a cada punto del mismo con una cierta dotación de medios es el método recientemente implantado en varias obras de Dragados. La demanda prevista de recursos de transporte es conforme a la realidad esperable en cada tajo y, por tanto, en el total de la obra.

PALABRAS CLAVE: OPTIMIZACIÓN, TRANSPORTES, OBRAS LINEALES, ESPACIOS-TIEMPOS

ABSTRACT: The optimum composition of a transport fleet on a lineal work may vary from day to day. The evaluation of this factor by traditional planning tools may be considered an impossible task due to the difficulty in designing programmes in which the provision of resources develop with time in a realistic manner. The employment of mean values, both in terms of transporting distances and the equipment required, provides unreliable results.

Dragados have recently introduced a method on several works based on software which generates Space - Time diagrams and which associates each point on the same with a certain provision of resources. The forecasted demand for transport resources conforms to the real expectations of each cutting and, subsequently, to that of the entire work.

KEYWORDS: OPTIMIZATION, TRANSPORT, LINEAL WORKS, SPACE-TIME

RASGOS NOTABLES DE LAS OBRAS LINEALES

En este tipo de obras, ya desde el proyecto se recurre a su característica lineal para definir el producto a construir. Así, se diseñan secciones tipo asociadas a tramos que se acotan entre sus puntos kilométricos (pk) extremos o se sitúan las actuaciones singulares usando su pk como coordenada de posición.

Del conocimiento de la geometría del terreno y de las secciones tipo, se deducen los procesos necesarios para la ejecución de la obra, sus mediciones y las condiciones de orden entre ellos.

Los procesos pueden tener la finalidad de retirar un material de la traza o de incorporarlo a ella. En cualquier caso, siempre existe una operación de transporte conectando el origen y el final del proceso.

Para ejecutar un cierto tramo, las actividades que se suceden deben procesar los materiales aportados o retirados siguiendo unas etapas que pueden resumirse en las tres siguientes:

- En origen del proceso, se realizan las operaciones necesarias hasta llegar a la carga de los materiales en los medios de transporte. Los recursos que se utilizan realizan su trabajo en condiciones constantes, con ciclos repetitivos cuyo valor medio es independiente de la posición del tajo en la traza.
- Etapa de transporte, cuyo ciclo y producción subsiguiente están claramente relacionados con la posición de los tajos origen y destino.
- En destino del proceso, las operaciones que se realizan a partir de la descarga de los materiales son, de nuevo, de ciclo y producción constantes.

Mientras se ejecuta un tramo de cierta sección tipo, el proceso se dimensiona para una cierta producción, dotando las etapas de origen y destino con los equipos que se precisen. El objetivo de producción se conseguirá siempre que se adapte la flota de transporte a la posición variable del tajo.

En actividades sucesivas, los equipos procesarán diferentes componentes del producto final y las cifras de sus producciones diarias, expresadas en las unidades definidas en el presupuesto, también serán distintas, en función de su participación en la sección tipo de cada tramo.

Para mantener un desfase entre actividades, sus producciones diarias deben corresponder con *avances lineales diarios* similares. En caso contrario, sucede una de las siguientes posibilidades:

- El segundo equipo alcanza al primero. Esto provoca interferencias, pérdidas de productividad y sobrecostos.
- El primer equipo se distancia del segundo. Aumenta innecesariamente el plazo de la obra y los gastos generales.

Al producirse un cambio de sección, al menos alguna actividad aumenta el trabajo para un mismo avance lineal, a costa de otra que lo disminuye. Si las dotaciones y horarios de los equipos se mantienen, proseguirán con las mismas producciones horarias, medidas en las unidades respectivas, pero los avances serán distintos, apareciendo de nuevo alguno de los desajustes anteriores.

Los tajos realmente *lineales*, cuya posición resulta modificada de manera continua por su propio avance, tienen una ejecución *dinámica*, no sólo en lo que respecta a la posición en sí, sino a la ley de variación de los recursos afectados por ésta.

Por otra parte, también existen tajos, importantes por su propia entidad o por su relación de orden con otros, que tienen un *carácter puntual* tales como los desmontes y terraplenes, los pasos subterráneos y superiores de una autovía, una galería transversal en un túnel o un cruce de un canal con una carretera existente.

Estos tajos se desarrollan en un punto de la traza, en una posición fija. El trabajo se desarrolla en condiciones que podrían denominarse *estacionarias*, con una dotación requerida de recursos poco o nada variable a lo largo de su ejecución completa. Los criterios aplicables para optimizar los tajos estacionarios y las dificultades que se puedan hallar en ello no son diferentes de los de una obra no lineal. Por tanto, las herramientas de estudio y análisis pueden ser las mismas.

En cambio, la planificación de los tajos dinámicos, que deben ser ajustados a sus necesidades cambiantes, resulta una tarea complicada que recibe poca ayuda del software de planificación disponible en el mercado.

OBJETIVOS PRINCIPALES AL PLANIFICAR UNA OBRA

Prescindiendo de aspectos formales, tal como la estructuración del proyecto en actividades y de éstas en áreas, u otras

El objetivo básico de cualquier planificación es la definición de los procesos y de los recursos necesarios para optimizar los costes y programar en el tiempo las actuaciones adecuadas a este fin

divisiones que faciliten el control posterior de la ejecución, el objetivo básico de cualquier planificación es la definición de los procesos y de los recursos necesarios para *optimizar* los costes y *programar* en el tiempo las actuaciones adecuadas a este fin.

La optimización de costes resulta de la comparación de *soluciones alternativas* y posterior selección de la mejor. Para que este análisis conduzca a resultados satisfactorios es necesario que el modelo de estudio aplicado a las diferentes hipótesis cumpla algunos *requisitos* imprescindibles:

- La información que proporcione el modelo debe ser *fiel a la realidad* esperable de cada hipótesis, en lo que se refiere a recursos, producción, plazo y coste.
- La solución prevista será *realizable*. El modelo de estudio debe dar información suficiente para calificar así la alternativa considerada. Frecuentemente, esta condición se supone satisfecha y no se contempla la eventualidad de una dotación imposible de recursos. El riesgo de error no es grande sólo en el caso de tajos que requieran una asignación constante de medios.
- El modelo debe permitir el *análisis fácil* de las alternativas posibles. En caso contrario, planteamientos interesantes pueden quedar sin estudiar.

La adecuación de las herramientas de planificación a un tipo de obra es función del grado de cumplimiento de estos requisitos.

PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LAS OBRAS LINEALES

Como se ha comentado antes, la planificación debe considerar la posibilidad de alcances entre tajos y tratar de establecer los desfases y avances diarios que los eviten. La programación de la situación de los tajos es necesaria para coordinar los distintos equipos.

Las dificultades de organización aumentan a causa de la variación en el tiempo de las necesidades de transporte de cada tajo dinámico. Al integrar las demandas correspondientes a un cierto plan de avance de un conjunto de tajos, se obtienen puntas y valles frecuentes.

Si se cambia el desfase o la duración de un tajo, la demanda global cambia, tanto en los valores como en las fechas de las puntas y valles. El cambio puede ser debido a la adopción de un criterio diferente al planificar o a la introducción de la posición real del tajo durante el seguimiento de la obra.

El conocimiento impreciso de la evolución del transporte es causa de despilfarros. La aparición inesperada de puntas provoca actuaciones no deseables durante la ejecución de los tajos:

- Cuando un tajo requiere una dotación creciente de transporte, durante el tiempo de respuesta entre la petición de más recursos y su incorporación efectiva, se trabaja con un déficit que provoca retrasos en el tajo y los sobrecostos correspondientes. El responsable del tajo lucha contra esta situación en la medida de sus fuerzas, con éxito generalmente insuficiente.
- Cuando la demanda de transporte es decreciente, los recursos sobrantes no siempre son declarados en su totalidad, sobre todo si se espera un cambio de tendencia en fechas próximas. En este caso, el tajo resulta bien atendido pero el coste del transporte se incrementa inútilmente.

A pesar de que los responsables de los tajos persiguen atentamente la evolución de sus necesidades, puede ser que coincidan demandas de transporte crecientes en varios y queden mal satisfechas por resultar una punta excesiva.

Cuando cada uno de los tajos lineales se encuentra en una de las dos situaciones dichas, para evitar despilfarros de medios, la obra debería hacer frente a cambios constantes en la distribución de la flota, mediante trasposos de transporte de unos tajos a otros. La planificación debe tratar estos problemas, anticipando la siguiente información, imprescindible para la adopción de medidas acertadas:

- La evolución de la *demand total* de transporte, día a día.
- La *demand* de transporte de cada tajo, diariamente.

Para que un plan de avance sea *realizable*, es preciso que la evolución de los recursos de transporte se aproxime a una curva ideal, compuesta por tramos constantes o monótonos, sean crecientes o decrecientes.

ALTERNATIVAS DE TAJOS DINÁMICOS

La obra tiene oportunidades sencillas para lograr una evolución adecuada de recursos, mediante alternativas de planteamiento que deberían ser consideradas siempre:

- La ejecución de una actividad en un tramo provoca diferentes demandas en el tiempo según el *sentido de avance* que se adopte.
- Una actividad se puede descomponer en tantos tramos como se quiera, adoptando el sentido de avance más conveniente cada vez.
- No siempre es necesario un determinado *orden* entre actividades. Es posible que la condición verdadera sea que las actividades no puedan coincidir a la vez en el mismo sitio. La elección de un orden entre ellas implica una decisión que a veces se adopta sin considerar su influencia en la suma de recursos.

- Algunos materiales pueden ser transportados a la traza con antelación a su extendido. En este caso, puede ser conveniente *acopiar* una fracción del volumen requerido en lugares alejados mientras el equipo de extendido se encuentra cerca, o aplicar un horario de carga y transporte superior al del extendido, o ambas estrategias simultáneamente.

La planificación del conjunto de los tajos conducirá a una solución optimizada, fiable y posible por aproximaciones sucesivas, introduciendo en un planteamiento inicial cambios de criterio, elegidos entre las oportunidades citadas.

SISTEMÁTICA CLÁSICA DE PLANIFICACIÓN

En la práctica es frecuente plantear la planificación de las obras lineales sobre dos herramientas complementarias:

- La mayor parte de la información se gestiona sobre el mismo software usado en cualquier otro tipo de obra. Estimación, Planificación y Control tienen soporte suficiente si se centra el interés en aspectos económicos y en el plazo. La información sobre la dotación total de los recursos variables es aproximada, basada en una zonificación de las actividades en pocos tramos y con dotaciones *medias* de recursos.
- Se evitan las interferencias entre tajos mediante el empleo del diagrama llamado de Espacio – Tiempo en el que ambas magnitudes se constituyen en los ejes de una representación cartesiana de la evolución de los tajos. En el eje horizontal se representan los pk de la traza y en el vertical se escala el tiempo, que crece hacia abajo. Un punto dentro del sistema representa la correspondencia de un pk de la traza con una fecha. Una actividad cualquiera evolucionará en este sistema siguiendo una línea en el sentido de los tiempos crecientes.

LA SISTEMÁTICA CLÁSICA NO ES SUFICIENTE

Al planificar los recursos de transporte con valores medios, no es posible satisfacer los requisitos del modelo de estudio citados antes.

- La *sistemática clásica no es fiel a la realidad*: la media de los recursos no corresponde a la dotación necesaria en ningún momento, por lo que la evolución de la dotación necesaria resulta muy diferente de la prevista.
- El plan diseñado resultará *irrealizable*. Concebido sin considerar el carácter dinámico de los tajos, no permite prever la existencia de picos y valles pronunciados. La obra sufrirá retrasos y sobrecostos.
- El análisis de *alternativas* llevará a conclusiones poco fiables, si se aceptan los dos párrafos anteriores. Así que la

eventual facilidad o dificultad de plantearlas es superflua mientras no se consiga que produzca resultados fieles y realizables.

La causa de estos efectos perniciosos es la escasa aproximación de los recursos medios a los reales. Para obtener análisis fidedignos, es necesario aproximar la dotación prevista de transporte de cada actividad a la realidad. Si el soporte informático impone que las actividades se definan con recursos constantes, habrá que descomponer la traza en segmentos en los que la variación del transporte sea despreciable.

Podría considerarse, para las actividades a estudiar, la menor longitud de traza que provoque un aumento o disminución de medio camión, con producciones horarias optimistas, y dividir la obra en tramos de esa longitud.

Si los tramos resultan de 0.5 km, se definiría una actividad para cada tajo y cada 0.5 km. Cada tajo lineal, en una obra de 25 km de traza, requiere 50 actividades para obtener un plan aproximado de transporte. El sentido de avance de los tajos quedaría definido por el orden de los tramos.

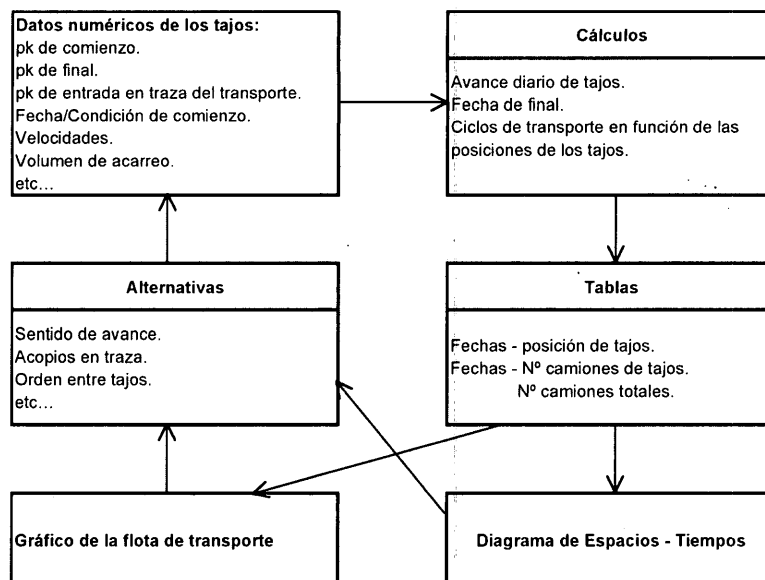
Realizar un programa de estas características no es una dificultad insalvable a la hora de establecer una cierta ordenación del avance. Pero el análisis de alternativas resulta muy complicado:

- Cambiar el sentido de avance de un tajo modifica las precedencias entre las actividades que lo representan. Cada alternativa de este tipo requiere poco menos que hacer un programa nuevo.
- Acopiar en traza en algún tramo o cambiar el sentido de avance en una parte de otro requieren la aparición de nuevas actividades.
- Cambiar el criterio de orden entre dos tajos en ciertos tramos cambia la estructura de relaciones.

El esfuerzo requerido para el análisis de alternativas sobre una red es importante. Si a lo anterior se añade que, en muchas ocasiones, el orden real de los tramos está subordinado a que se cumplan acontecimientos no dominados por la obra, tales como el estado de expropiaciones o incidencias meteorológicas, se comprende que las obras desistan de considerar la optimización del transporte como objetivo de una planificación clásica.

Parece bastante evidente que la planificación clásica sobre redes con el complemento de un diagrama de Espacio - Tiempo no permite el análisis fácil de las alternativas.

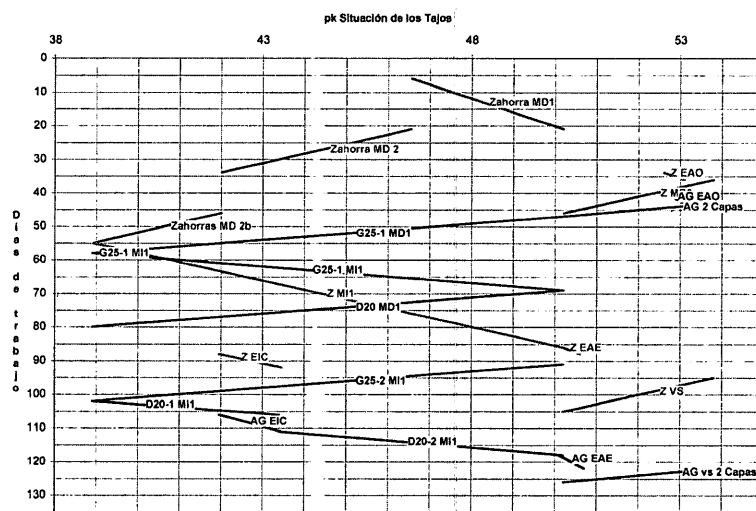
El personal experto en obras lineales es consciente del tratamiento deficiente de la información del software habitual de planificación. La resistencia al uso de redes se ha atribuido a veces a actitudes personales negativas, pero lo cierto es que el rechazo tiene, a la vista de lo dicho, su fundamento en la escasa adecuación de estas herramientas a los aspectos dinámicos de la obra lineal.



UN DIAGRAMA INTELIGENTE DE ESPACIO - TIEMPO

A la sistemática clásica de planificación le falta un tratamiento adecuado de los tajos dinámicos. El diagrama de Espacios - Tiempos, concebido como un dibujo, sólo aporta la situación de los tajos en el tiempo.

Un equipo de Innovación de Dragados, en el que participaron los autores, consideró la posibilidad de resolver satisfactoriamente la planificación de los tajos dinámicos mediante un software que generara simultáneamente, y con sencillez, tanto el dibujo del Espacios - Tiempos como los recursos asociados a cada punto de las líneas de avance de las diferentes actividades.



Se decidió utilizar el lenguaje de Visual Basic de Excel, debido a la implantación generalizada de este programa. La posibilidad que ofrece Excel de generar gráficos asociados a tablas numéricas ha sido utilizada para facilitar la labor de planificación: la definición de un tajo mediante datos numéricos es suficiente para programar en tablas la posición de los tajos y los recursos necesarios. El esquema anterior indica el proceso que se sigue en la planificación de los tajos dinámicos. El usuario introduce los datos numéricos que definen el tajo: sección del material tratado en el tramo; los puntos kilométricos de comienzo y fin del tramo, así como el de conexión con la traza del camino recorrido fuera de ella; la fecha de comienzo estipulada o calculada a través de relaciones con otros tajos; la producción o el avance diario deseado; tiempos fijos de transporte; velocidades y distancias fuera de la traza; velocidades por la traza; volumen acarreado por un camión; horario.

Introducidos los datos, el programa realiza los cálculos necesarios para determinar los siguientes resultados:

- Avance diario de los tajos.
- Duración y fecha de final de la actividad.
- Ciclos de transporte en función de la posición de los tajos.

Utilizando la información así obtenida, se construyen dos tablas:

- La tabla 1 que relaciona la posición de los tajos con las fechas.
- La tabla 2, en la que se indica el número de camiones necesarios, día a día, en cada tajo y en total.

El diagrama adjunto de Espacio – Tiempo se obtiene de la asociación de un gráfico a la Tabla 1. El usuario identifica los tajos por la leyenda asociada a cada línea y les asigna colores a voluntad.

Finalmente, de la Tabla 2 se deriva el gráfico que representa con una línea azul la evolución de la flota de transporte, correspondiente a una alternativa que presenta problemas, ya que hay puntas y valles frecuentes e importantes. La línea verde es un ajuste polinómico de 5º grado que expresa una tendencia más deseable.

A la vista de los dos gráficos, el usuario puede modificar fácilmente algunos datos numéricos. Los cambios propuestos modifican instantáneamente los resultados, por lo que la búsqueda de mejores soluciones no requiere un esfuerzo significativo.

En el caso de no existir una solución suficientemente buena, al menos se conocen los periodos problemáticos con antelación suficiente para gestionar las acciones oportunas.

Tabla 1. pk de situación de los tajos.

Este desarrollo ha sido implantado ya en varias obras, con resultados satisfactorios tanto por el aumento de fiabilidad de producciones y plazos como por la reducción de medios de transporte.

Las Tablas 1 y 2 han sido favorablemente acogidas por los mandos de ejecución, ya que la expresión numérica de la posición de los tajos y del número de camiones que precisan, día a día es más precisa y fácil de usar en la organización del trabajo diario. A tal extremo llega su utilidad que algún jefe de obra ha comentado al usar esta aplicación: ¡Ahora el diagrama de Espacios – Tiempos sólo me sirve para explicar a las visitas cómo es la obra! ■

Tabla 2. Número de camiones necesarios.