



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de una herramienta de apoyo a la toma de
decisiones sobre la planificación del abastecimiento de
hormigón a un megaproyecto de obra civil

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

AUTOR/A: Martí Pérez, Belén

Tutor/a: Miralles Insa, Cristóbal Javier

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres,
por haberme inculcado el esfuerzo y la constancia.

A mis profesores: Consuelo, Sonia, Roger, Joaquín, José Vicente, Julio, Rafa, Marián, Gonzalo, Nathalie, José Pedro y Julien;
por haberme enseñado lo importante.

A Carlos Andrés, Cristóbal Miralles, Pascal Hamet y mis compañeros de Eiffage,
por acompañarme en esta última etapa.

RESUMEN

El presente trabajo recoge el procedimiento para la creación de una herramienta de soporte a la toma de decisiones sobre la infraestructura material requerida para proveer hormigón a un megaproyecto de obra civil. Para ello, se obtendrán los datos y el retorno de experiencia de la línea 16.1 del proyecto ferroviario del Grand Paris Express, hoy en día en fase de construcción.

Se pretende ser capaz de obtener el número de centrales de hormigón y el emplazamiento de las mismas a partir de un cronograma de los volúmenes planificados y de las localizaciones de las obras a aprovisionar. Debido a la variabilidad de los volúmenes previstos y las condiciones cambiantes del sector de la construcción, se necesita una herramienta robusta que se pueda aplicar tanto en las fases de licitación como de ejecución.

Asimismo, con la finalidad de reducir los costes de aprovisionamiento de hormigón, se propone una herramienta para minimizar las distancias y generar varios escenarios. Esto permite en el caso práctico de la línea 16.1 en el que trabajan dos proveedores, garantizar el reparto del volumen de negocio y asignar los hormigones a las centrales adecuadas. Por consiguiente, se ha podido disminuir el trayecto total recorrido por la flota de camiones en algo más de un 30% modificando el emplazamiento de una de las centrales, de un extremo de la futura línea de metro al baricentro de la producción. Esta mejora constituye un argumento de negociación significativo a la hora de determinar los precios y condiciones contractuales con los proveedores ya que conlleva la reducción del importe global del contrato entre un 2 y 3%.

Palabras Clave: Planificación, aprovisionamiento, hormigón, obra civil.

RESUM

El present treball recull el procediment per a la creació d'una eina de suport a la presa de decisions sobre la infraestructura material requerida per a proveir formigó a un megaprojecte d'obra civil. Per a això, s'obtidran les dades i el retorn d'experiència de la línia 16.1 del projecte ferroviari del Grand Paris Express, hui en dia en fase de construcció.

Es pretén ser capaç d'obtindre el nombre de centrals de formigó i l'emplaçament de les mateixes a partir d'un cronograma dels volums planificats i de les localitzacions de les obres a aprovisionar. A causa de la variabilitat dels volums previstos i les condicions canviants del sector de la construcció, es necessita una eina robusta que es puga aplicar tant en les fases de licitació com d'execució.

Així mateix, amb la finalitat de reduir els costos d'aprovisionament de formigó, es proposa una eina per a minimitzar les distàncies i generar diversos escenaris. Això permet en el cas pràctic de la línia 16.1 en què treballen dos proveïdors, garantir el repartiment del volum de negoci i assignar els formigons a les centrals adequades. Per consegüent, s'ha pogut disminuir el trajecte total recorregut per la flota de camions en un poc més d'un 30% modificant l'emplaçament d'una de les centrals, d'un extrem de la futura línia de metro al baricentre de la producció. Aquesta millora constitueix un argument de negociació significatiu a l'hora de determinar els preus i les condicions contractuals amb els proveïdors, ja que comporta la reducció de l'import global del contracte entre un 2 i 3%.

Paraules clau: Planificació, aprovisionament, formigó, obra civil.

ABSTRACT

The present work gathers the procedure for the creation of a decision-making support tool on the material infrastructure required to provide concrete to a civil works megaproject. To do this, data and experience feedback will be obtained from line 16.1 of the Grand Paris Express rail project, currently under construction.

The aim is to be able to obtain the number of concrete plants and their location from a schedule of the planned volumes and the locations of the works to be supplied. Due to the variability of forecast volumes and the changing conditions of the construction sector, a robust tool is needed that can be applied both in the tender and execution phases.

Likewise, in order to reduce concrete supply costs, a tool is proposed to minimize distances and generate various scenarios. This allows, in the practical case of line 16.1, in which two suppliers work, to guarantee the distribution of the business volume and assign the concrete to the appropriate plants. Consequently, it has been possible to reduce the total distance covered by the truck fleet by more than 30% by modifying the location of one of the plants, from one end of the future metro line to the center of gravity of production. This improvement constitutes a significant negotiation argument when it comes to determining prices and contractual conditions with suppliers, since it entails a reduction in the overall amount of the contract between 2 and 3%.

Keywords: Planning, supply, concrete, civil works.

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO.....	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. MOTIVACIÓN.....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5. EL DESENCADENANTE DEL PROYECTO	5
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	7
2.1. ACTIVIDAD, VISIÓN Y VALORES	7
2.2. ESTRUCTURA DE LA ORGANIZACIÓN	8
2.3. CADENA DE SUMINISTRO	10
2.3.1. LA RED DE TRANSPORTE.....	12
2.3.2. DISTANCIAS EN LA RED.....	13
2.3.3. LA CAPACIDAD DISPONIBLE	15
2.4. SITUACIÓN ACTUAL.....	18
2.4.1. PROPUESTA INICIAL (FASE CONCEPCIÓN).....	18
2.4.2. ESTADO EN 2022 (FASE EJECUCIÓN).....	20
2.4.3. COMPARATIVA Y ANÁLISIS DE LA DESVIACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN	21
2.4.4. SÍNTESIS.....	22
2.5. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS	23
CAPÍTULO 3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN.....	26
3.1. INTRODUCCIÓN	26
3.2. LA DEMANDA DEL PROYECTO L16.1	27
3.2.1. LA DEMANDA A LARGO PLAZO.....	27
3.2.2. LA DEMANDA A MEDIO PLAZO	29
3.2.3. LA DEMANDA A CORTO PLAZO	32
3.3. DESARROLLO DEL MODELO DE PLANIFICACIÓN	35
3.3.1. INTRODUCCIÓN	35
3.3.2. MODELO MATEMÁTICO	36

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

3.3.2.1.	Índices	36
3.3.2.2.	Parámetros	36
3.3.2.3.	Variables	37
3.3.2.4.	Función objetivo	37
3.3.2.5.	Restricciones	37
3.3.3.	RESOLUCIÓN SUBPROBLEMA	38
3.3.3.1.	El entorno Python	40
3.3.3.2.	Datos de entrada	40
3.3.3.3.	Resultados obtenidos	40
CAPÍTULO 4. ANALISIS DE DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN		43
4.1.	ESCENARIO 1. SUPRESIÓN DE LA CONDICIÓN TRANSVERSAL	43
4.2.	ESCENARIO 2. INVERSIÓN UBICACIONES UP1 Y UP4	44
4.3.	ESCENARIO 3. UBICACIÓN DEL PROVEEDOR EIME EN LA OBRA 6401P	45
4.4.	ESCENARIO 4. UBICACIÓN DEL PROVEEDOR EIME EN LA OBRA 6401P Y MODIFICACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE UP1	47
4.5.	COMPARATIVA DE LOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN	48
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES FINALES		50
5.1.	CONCLUSIONES	50
5.2.	LÍNEAS FUTURAS	51
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA		53
DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO		55
INTRODUCCIÓN		57
1.	COSTE MATERIAL	58
1.1.	Costes del hardware	58
1.2.	Costes del software	58
1.3.	Costes de desplazamiento	59
2.	COSTE DE PERSONAL	60
3.	RESUMEN POR CAPÍTULOS	61
DOCUMENTO 3: ANEXOS		62
	ANEXO 1	63
	ANEXO 2	64
	ANEXO 3	65
	ANEXO 4	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Función de Haversine para calcular la distancia entre dos puntos sobre una esfera	13
Ecuación 2. Etapa 2 de la función de Haversine para aislar la distancia	14
Ecuación 3. Restricción sobre los valores de los coeficientes de asignación	37
Ecuación 4. Restricción sobre la capacidad de producción de una central	37
Ecuación 5. Restricción transversa sobre el volumen a producir por EIME con la central UP4	37
Ecuación 6. Restricción según la que el volumen de una obra se reparte entre las centrales.....	37
Ecuación 7. Restricción sobre la satisfacción de la demanda.....	38
Ecuación 8. Función objetivo que minimiza la distancia recorrida	37

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Cronograma de las necesidades de hormigón planificadas en 2018. Elaboración propia.	19
Gráfica 2. Cronograma del volumen de hormigón colocado hasta marzo 2022 y previsiones a final de proyecto. Elaboración propia.	20
Gráfica 3. Cronograma comparativo entre el volumen planificado y el realizado. Elaboración propia.	21
Gráfica 4. Diagrama de flujo del proceso de planificación del abastecimiento de hormigón. Elaboración propia con Microsoft Visio.	23
Gráfica 5. Diagrama de flujo del proceso de programación del abastecimiento de hormigón. Elaboración propia con Microsoft Visio.	25
Gráfica 6. Previsión de la demanda de hormigón por zona desde agosto 2021. Elaboración propia.	30
Gráfica 7. Demanda mensual del proyecto por tipo de hormigón. Elaboración propia.	32
Gráfica 8. Diagrama de caja y bigotes con los volúmenes fabricados según el día de la semana. Elaboración propia.	42

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Central de hormigón del proyecto L16.1 (izda.) y proceso de colocación (dcha.). Fuente: Elaboración propia.....	3
Ilustración 2. Matriz poder/interés de los interesados. Elaboración propia.....	5
Ilustración 3. Organigrama de Eiffage desde el lugar de desarrollo de la memoria. Elaboración propia. ...	7
Ilustración 4. Trazado de las nuevas líneas del GPE. Fuente: Société du Grand Paris (2022).	8
Ilustración 5. Trazado de la línea 16.1. Fuente: SGP.	9
Ilustración 6. Cuadro sin��ptico de las obras y tuneladoras de la L16.1. Fuente: Dirección proyecto L16.1.	10
Ilustración 7. Camiones hormigonera de EIME (izda.) y maqueta de BSM (dcha.). Elaboración propia. ...	11
Ilustración 8. Trazado de la L16.1 con las comunas y las centrales de hormigón. Fuente: Dirección de Proyecto L16.1	12
Ilustración 9. Esquema de las partes de una central de hormigón. Fuente: Elaboración propia.	16
Ilustración 10. Punto de carga de los camiones hormigonera. Fuente: Elaboración propia.....	17
Ilustración 11. Esquema de un proceso de planificación global. Fuente: Berry et al (2000).....	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de decisión para el emplazamiento de las unidades de producción de hormigón. Elaboración propia.....	11
Tabla 2. Coordenadas GPS de las centrales de hormigón. Elaboración propia.	13
Tabla 3. Coordenadas GPS de las obras. Elaboración propia.	13
Tabla 4. Distancias de Haversine (izda.) y GPS (dcha.) entre las obras y las centrales de hormigón. Elaboración propia.....	14
Tabla 5. Comparación en porcentaje de las distancias de Haversine y Google Maps. Elaboración propia.	15
Tabla 6. Cálculo del tiempo de fabricación y carga de una amasada. Elaboración propia.....	17
Tabla 7. Elementos sobre la reología y método de colocación de los tres tipos de hormigón del proyecto. Elaboración propia.....	27
Tabla 8. Reparto entre las obras de aprovisionamiento del volumen de hormigón a colocar en los tramos de túnel. Elaboración propia.	28
Tabla 9. Necesidades de hormigón según la tipología y procedimiento de obtención de la demanda total. Elaboración propia.....	29
Tabla 10. Planificación semestral de la demanda de hormigón de una obra. Fuente: Zona GC2 de la L16.1.	30
Tabla 11. Extracto de la planificación semestral de la demanda de hormigón de la zona GC2. Fuente: Zona GC2 de la L16.1.	31
Tabla 12. Plan Maestro de Producción semanal. Elaboración propia.	34
Tabla 13. Demanda global del proyecto en julio 2018. Elaboración propia.	38
Tabla 14. Resultado en Solver de los coeficientes de asignación de la demanda de las obras a las centrales de hormigón y producción por cada central de hormigón. Elaboración propia.	39
Tabla 15. Asignación de la producción entre las obras y las centrales. Elaboración propia	41
Tabla 16. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que no hay restricciones de reparto del volumen. Elaboración propia.	43
Tabla 17. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra SDP y realiza el 28,5% de la producción global. Elaboración propia.....	44
Tabla 18. Distancias de Haversine (izda.) y GPS (dcha.) entre las obras y las centrales de hormigón con UP4 situada en el 6401P. Elaboración propia.....	45
Tabla 19. Comparación de las distancias de Haversine y Google con UP4 en el 6401P. Elaboración propia.	46
Tabla 20. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra 6401P. Elaboración propia.....	47

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Tabla 21. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra 6401P y con nuevas fechas de disponibilidad de las centrales. Elaboración propia.....	48
Tabla 22. Comparativa entre los escenarios de producción estudiados. Elaboración propia.....	49
Tabla 23. Costes materiales del hardware. Elaboración propia.....	58
Tabla 24. Costes materiales del software. Elaboración propia.....	59
Tabla 25. Costes materiales de transporte y protección. Elaboración propia.....	59
Tabla 26. Costes de personal para cada fase del proyecto. Elaboración propia.....	60
Tabla 27. Presupuesto resumen del coste de la herramienta. Elaboración propia.....	61

DOCUMENTO 1: MEMORIA

TABLA DE DEFINICIONES

Bas carbone: bajo carbono. Etiqueta que se atribuye a las políticas, acciones o soluciones técnicas con bajas emisiones de carbono o con emisiones inferiores con respecto a otras alternativas.

BSM: *Béton Solutions Mobiles*, proveedor de hormigón del proyecto cuyo nombre en francés se traduce por Hormigón Soluciones Móviles.

BTP: *Bâtiment et Travaux Publics*, subsector económico francés de vivienda y obras públicas.

CO₂: dióxido de carbono, gas incoloro compuesto por carbono y oxígeno y altamente relacionado con el efecto invernadero.

Dovela: elemento de hormigón armado prefabricado con forma curvada que se utiliza para consolidar el terreno a medida que este se va excavando para la construcción de un túnel. Son necesarias varias dovelas, que se encajan entre sí para formar un anillo.

DP: Dirección de Proyecto.

EIME: *Eiffage Infraestructuras Mobile Equipment*, empresa proveedora de hormigón del proyecto. Es una filial española de Eiffage de la actividad de Carreteras dentro de la rama Infraestructuras (véase ilustración 3).

EPI: Equipo de Protección Individual.

GC: *Génie Civil*, ingeniería civil. Se suele utilizar esta denominación para los hormigones de estructuras.

GPE: Grand Paris Express, proyecto de ampliación de la red de transporte público parisina en su periferia. Implica la creación de 200 nuevos kilómetros de líneas férreas automáticas y 68 estaciones.

Hormigón: material de construcción compuesto por una mezcla de áridos (gravas y/o arenas), aglomerante (cemento, escoria, betón, arcilla, cal...) y agua. También puede contener aditivos para desarrollar nuevas propiedades como la plasticidad, el retraso o aceleración de fraguado, o la impermeabilidad. Puede fabricarse en pequeñas cantidades en hormigoneras o bien en unidades de producción de mayor tamaño.

JJOO: Juegos Olímpicos. Los próximos tendrán lugar en París en 2024.

Just-in-time: sistema de organización de la producción en el que solo se fabrica lo que se necesita y cuando se necesita para reducir costes, esencialmente de inventario de materias primas y de manutención.

L15: abreviatura para designar a la línea 15 de metro de la periferia parisina. La mayor parte de su trazado está en fase de licitación salvo un pequeño tramo al sudeste que está en fase de ejecución.

L16.1: abreviatura para designar al primer tramo de la línea 16 de metro de la periferia parisina. Actualmente se encuentra en fase de construcción.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Megaproyecto: proyecto, principalmente del sector de la construcción, a gran escala con un coste superior a un billón de euros. Se necesitan varios años para su construcción, una gran estructura de financiación y tiene un impacto significativo en la población.

Pantalla o PM: *paroi moulée*, pantalla o muro de hormigón armado realizado en el terreno para asegurar la estanqueidad de las obras y la estabilidad del terreno.

PAP: Planificación Agregada de la Producción. Se emplea el mismo término para designar al documento generado, el Plan Agregado de la Producción.

PESTEL: método de análisis del entorno de una empresa que permite clasificar los elementos susceptibles de impactar su actividad en políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales. Por lo tanto, el análisis PESTEL es un estudio de mercado únicamente de los factores externos que afectan o pueden afectar a una organización.

PMP: Plan Maestro de Producción, plan temporizado de los artículos que la organización pretende fabricar detallando períodos y unidades. Fogarty (1991)

Primavera: software de gestión de carteras de proyectos empresariales.

Pymes: pequeñas y medianas empresas.

Región: subdivisión territorial francesa con autonomía financiera equivalente a las comunidades autónomas. Una región se compone de diversos departamentos, asimilables a las provincias españolas. Francia cuenta con un total de 18 regiones.

RELL o RECH: abreviación utilizada en el proyecto para designar al hormigón de relleno (de *rechargement*) empleado para rellenar el vacío entre el punto inferior de la dovela del túnel excavado y el nivel de circulación de las vías del tren. Se trata de un hormigón no armado y en su interior se encontrarán los sistemas de saneamiento, electricidad y fibra óptica.

Reología: rama de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación de un sólido. Se aplica al hormigón para determinar el período de tiempo en el que se conservan sus propiedades (como la viscosidad o la resistencia a la segregación) que permiten su colocación.

RER: Réseau Express Régional, transporte ferroviario de la región Isla de Francia similar al metro pero que suele discurrir por la superficie y es explotado por otro operador.

Savoir faire la différence: saber marcar la diferencia. Lema de la empresa Eiffage.

SGP: Société du Grand Paris, sociedad pública creada en 2010 encargada de la concepción de la nueva red de transporte del proyecto del Grand Paris Express. También se asegura de la realización del proyecto.

Société: sociedad.

Tuneladora: máquina, en general de sección circular, cuya función es excavar túneles a sección completa. En la mayoría de los casos, a medida que avanza, coloca dovelas o cimbras para asegurar el sostenimiento del terreno.

TVA: *taxe sur la valeur ajoutée*. Acrónimo francés para el IVA, impuesto sobre el valor añadido. El valor de la tasa normal presente es del 20%, mientras que en España es del 21%.

UP: unidad de producción o central en la que se fabrica el hormigón.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

UTE: unión temporal de empresas.

VCE: *Voie Caténaire et Equipement*. Término empleado para la quinta zona funcional del proyecto de la L16.1 y cuya misión es equipar los túneles con las vías, la catenaria, y otros equipos auxiliares.

VUCA : acrónimo utilizado para describir o reflejar la volatilidad, incertidumbre (*uncertainty*), complejidad y ambigüedad de condiciones y situaciones.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO

El presente trabajo recoge el procedimiento para la creación de una herramienta de soporte a la toma de decisiones sobre la infraestructura material necesaria para proveer hormigón a un megaproyecto de obra civil.

Para ello, se obtendrán los datos y el retorno de experiencia del proyecto ferroviario del Grand Paris Express, en concreto del tramo de 20 km de la línea 16.1 en fase de construcción y cuyo mandatario es la sociedad Eiffage Genie Civil.

Se pretende ser capaz de obtener el número de centrales de hormigón y la mejor localización de estas a partir de un cronograma de los volúmenes de hormigón necesarios y de las localizaciones de las obras a aprovisionar y aplicarlo a todo proyecto de infraestructura u obra civil. Asimismo, se requiere ser capaz de integrar distintas restricciones o criterios ponderales de decisión para ayudar a la toma de decisiones estratégicas sobre el dimensionado de la red de aprovisionamiento en las fases de licitación y preparación de un proyecto real. Entre ellos destacan:

- la minimización de la distancia recorrida para garantizar las propiedades del hormigón, evitar las zonas urbanas altamente congestionadas y los retrasos en las entregas.
- la reducción de las emisiones de CO₂ generadas por la cadena de suministro.
- el impacto económico de la propuesta.
- la flexibilidad de la solución con respecto a cambios en la demanda y a la alta volatilidad de las previsiones (entorno VUCA).

Por último, se busca poder actualizar la solución obtenida en función de la evolución del proyecto (tasa de avance, cambios en la configuración de obras, ampliación/reducción del contrato público, retrasos, coyuntura PESTEL...).

1.2. ANTECEDENTES

Desde hace una década, el sector de la construcción y obras públicas (BTP) francés experimenta un fuerte crecimiento debido a la política de renovación y creación de infraestructuras de transporte y a la ampliación de las capacidades de vivienda de los núcleos urbanos. Estos dos aspectos han contribuido al aumento de la densificación de los entornos urbanos y de la contaminación generada directa e indirectamente por su actividad.

Este auge del sector BTP está particularmente presente en la región de Isla de Francia, situada al norte del país, con capital París y una extensión de 12 000 km² (algo superior a la de la provincia de Valencia) para 12,4 millones de habitantes. Los principales proyectos en curso son el Grand Paris Express (200 km de nuevas líneas férreas) y las infraestructuras deportivas y de vivienda necesarias para la celebración de los Juegos Olímpicos de 2024 en París. Ambos

proyectos se desarrollan principalmente en la periferia parisina y necesitan para su consecución una gran cantidad de recursos, entre los que destacan:

- Materiales: hormigón, acero, madera, vidrio, raíles, canalizaciones de agua, cables eléctricos y de fibra óptica e instalaciones de climatización.
- Maquinaria: elementos de mantenimiento, camiones de transporte (cisterna, con contenedor o tolva y hormigonera), excavadoras, grúas, herramientas varias, tuneladoras y centrales de producción de hormigón y de acero.

Este aumento repentino del uso de materiales y maquinaria, unido a la situación actual de dificultades de aprovisionamiento, conflictos territoriales en el Este de Europa e inflación de precios, supone un desafío para los proveedores, cuya capacidad de fabricación está limitada al tamaño del mercado del GPE. Esto, además de la ralentización de la actividad por la crisis sanitaria del COVID-19, ha ocasionado el retraso de los abastecimientos y, en consecuencia, del ritmo de producción.

Por ello, es fundamental, asegurar al máximo la cadena de suministro de las dos materias clave: el hormigón y el acero. En el presente trabajo, se va a analizar el primero de los dos para una de las líneas de metro del GPE que está en fase de construcción desde 2018, la línea 16.1.

1.3. MOTIVACIÓN

El principal estímulo de este trabajo es poder aplicar los conocimientos aprendidos a lo largo del segundo año de la especialización en Organización y Gestión Industrial del Máster de Ingeniería Industrial al ámbito de la ingeniería civil. Este campo está generalmente más orientado a la ejecución, en muchas ocasiones bajo presión, que a la gestión, reflexión y optimización de las operaciones. Por ello, se busca aplicar una parte de los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Dirección de Operaciones y Métodos Cuantitativos para la Organización Industrial.

Esta memoria ha sido elaborada en el marco de las prácticas curriculares realizadas en la empresa Eiffage Genie Civil, en el departamento de hormigón de la Dirección de Proyecto la línea 16.1. Este departamento gestiona el aprovisionamiento, el asesoramiento técnico y la calidad de 700 000 metros cúbicos de hormigón durante 5 años en un entorno urbano con el fin de construir 24 obras entre las 5 estaciones y los 19 pozos de mantenimiento.

Actualmente, la planificación de los pedidos se realiza de forma manual, atribuyendo los volúmenes de fabricación a las cuatro centrales de hormigón instaladas en las parcelas de las obras del propio proyecto. Sin embargo, dada la complejidad de la red de aprovisionamiento y la volubilidad de los pedidos (dificultades y errores de cálculo de volumen, horarios de comienzo variables, y secuenciación con las tareas de encofrado y colocación de armaduras), la empresa necesitaba una herramienta para automatizar la planificación del hormigón.

Al mismo tiempo, buscaba facilitar la toma de decisiones en cuanto a la infraestructura necesaria para llevar a cabo los grandes proyectos de obra civil del futuro. Esto es debido a que Eiffage se encuentra en fase de licitación para cuatro nuevos tramos del proyecto del GPE (línea 15 Este y Oeste, cada una con dos subdivisiones) y quería aprovechar la experiencia del proyecto en curso para mejorar su propuesta en el concurso público y reforzar su posicionamiento en las

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

negociaciones contractuales con los posibles proveedores de hormigón. En paralelo, se busca poder analizar el impacto de todos los escenarios de aprovisionamiento y de las ofertas presentadas por los proveedores para evitar contratiempos futuros y sobrecostos por falta de recubrimiento de la cadena de suministro. Esto podría darse si la flota de camiones disponibles y las centrales de hormigón implantadas fuesen insuficientes para cubrir la demanda.

Al inicio de las prácticas se hizo un análisis de la situación actual, presentando a los distintos actores del proyecto y visitando las obras e instalaciones. También se estudió la cadena de aprovisionamiento presente desde el abastecimiento y transformación de las materias primas, hasta la colocación del hormigón (ver ilustración 1) y se enumeraron los controles y métodos de seguimiento de la producción que se tienen a disposición.



Ilustración 1. Central de hormigón del proyecto L16.1 (izda.) y proceso de colocación (dcha.). Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se consultaron los documentos legales que unen a los fabricantes de hormigón, transportistas y a la empresa constructora, así como el Contrato Público otorgado por la Société du Grand Paris (SGP) para el proyecto L16.1. En los pliegos de requerimientos técnicos dados por la SGP, se definían condiciones sobre la infraestructura a instalar, las características técnicas y la calidad esperada del hormigón. Adicionalmente, la oferta de la empresa Eiffage, incluía además del procedimiento de realización de las obras, los elementos siguientes:

- Plan de ejecución de los proyectos.
- Recursos materiales y financieros necesarios y cuya movilización está prevista.
- Cronograma de utilización de los materiales y maquinaria particularizado para el hormigón, el acero, las dovelas, las tuneladoras y los materiales excavados.

Una vez conocidos y analizados los requerimientos y restricciones del problema, se procedió, con el acompañamiento de los tutores a proponer una solución. No obstante, se verá más adelante que la misma no permite representar completamente la situación del proyecto. Esto se debe a la complejidad y variabilidad del problema, causada por el elevado número de restricciones y parámetros, así como la gestión *al minuto* de la planificación manual y el carácter imprevisible de la producción en obra y el transporte en carretera.

Por último, una vez se obtuvo la solución simplificada suficientemente adaptada, se volvió a contactar a las partes interesadas para presentarles la propuesta y completarla, a partir de sus comentarios. Con la versión definitiva obtenida, se aplicó al caso de la línea 16.1 para medir el

impacto económico de considerar o no la herramienta de ayuda a la toma de decisiones y a la planificación. También se analizaron algunas variantes con respecto al escenario inicial.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Tal y como se ha visto en los apartados anteriores, el objetivo perseguido es desarrollar un modelo matemático de ayuda a la planificación de las necesidades y aprovisionamientos de hormigón, que contenga un evaluador para definir el impacto de las decisiones sobre las desviaciones en la planificación.

La aplicación de dicha propuesta puede suscitar el interés de varios actores asociados al proyecto del Grand Paris Express y, por extensión, al entorno de las obras públicas. Se distinguen:

I. Productores de hormigón

Principales interesados para realizar ofertas de precios a las distintas obras en fase de licitación y para evaluar en fase de ejecución, el grado de adaptación de los medios destinados a las necesidades de sus clientes. También puede ser útil para realizar proyecciones en caso de evolución de las necesidades de los clientes y/o de los requerimientos del proyecto y de su entorno. Desde el punto de vista económico, esto permitirá controlar el gasto gracias a la planificación financiera; sobre todo en el ámbito de las inversiones en infraestructuras y flota de camiones. Puede ser de ayuda igualmente para optimizar la gestión de los recursos humanos.

II. Empresas constructoras

La herramienta presentada debería ser utilizada en las fases de licitación o consulta de proveedores para analizar si las ofertas de los productores de hormigón cubren las necesidades y si el importe/ presupuesto demandado es realista, verificando que no haya exceso de margen ni infrutilización de las instalaciones. En fase de ejecución, del mismo modo que para los fabricantes de hormigón, se puede emplear para evaluar la pertinencia de las infraestructuras seleccionadas e implantadas durante la instalación inicial y poder anticipar cambios.

En cuanto a la perspectiva de responder a nuevas licitaciones, ya sean públicas o privadas, esta herramienta puede tener un papel decisonal clave ya que permite optimizar recursos y, en consecuencia, dar fiabilidad a los planes de trabajo y reducir los costes.

Por otro lado, cabe resaltar el peso creciente de las iniciativas *reductoras* de emisiones de CO₂ en los contratos públicos. En este caso, este criterio se considerará mediante una restricción de reducción de distancias. Asimismo, al disponer de una mejor visualización de las necesidades actuales y futuras, se podrá reducir la inversión en infraestructuras materiales al poner a disposición las centrales de fabricación para otros proyectos. Con ello se pretende satisfacer los picos en la demanda sin necesidad de sobredimensionar la red de fabricación y compensar la falta de ingresos en los periodos de infrutilización de esta, fabricando hormigón para clientes externos.

Este último aspecto medioambiental y la optimización de recursos también interesan al cliente final de la obra (Société du Grand Paris), a las entidades públicas, a las asociaciones medioambientales y a los vecinos de los entornos urbanos en los que se desarrolle el proyecto. Gracias a esta herramienta se puede avisar con antelación a dichos actores de los cambios previstos y mejorar la comunicación en cuanto al impacto medioambiental y la contaminación sonora.

Además de los citados anteriormente, la lista de interesados se podría ampliar significativamente si se consideran las posibilidades de aplicación a otros sectores con necesidades de resolución del problema clásico de localización. Son ejemplos el sector alimentario y de la gran distribución (ubicación de tiendas, almacenes, selección de productores...).

Las diferentes partes interesadas descritas se recogen en la matriz de poder/interés de la ilustración 2 en función de su autoridad y nivel de preocupación con respecto a los resultados del proyecto:



Ilustración 2. Matriz poder/interés de los interesados. Elaboración propia.

1.5. EL DESENCADENANTE DEL PROYECTO

El motivo de este análisis fue una conversación entre el departamento de hormigón del proyecto L16.1 en fase de ejecución y el departamento de compras del proyecto L15 en fase de concepción en torno a los puntos fuertes y débiles de los proveedores de hormigón operando actualmente en Isla de Francia. Mientras el primero pensaba poder aportar su experiencia en el proyecto en curso desde 2018 y sobre las discrepancias entre la reflexión inicial de 2017 y la realidad de la demanda actual; el segundo, aseguraba ya haber escogido el proveedor, número de centrales de hormigón a instalar y el emplazamiento de estas para la oferta del nuevo proyecto.

Por esto, el departamento de hormigón pensó en diseñar una herramienta automatizada y autónoma para contribuir a la toma de decisiones de los equipos de compras de proyectos futuros y poder aprovechar el conocimiento adquirido por la plantilla de Eiffage.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Asimismo, el futuro proyecto de la línea 15 tiene un horizonte de trabajo de 8 años, por lo que hay una gran cantidad de factores de tipo VUCA posibles que pueden afectar a las previsiones principales. Muchos de los cuales pueden no ser conocidos hoy en día, y, por lo tanto, ni predecibles ni aplicables a los cálculos actuales. Pero sí pueden ser modelizados a partir del conocimiento previo.

Teniendo en cuenta la política de fomento de las soluciones bajas en gases de efecto invernadero de la SGP y la política general del grupo Eiffage para el control y la reducción de dichas emisiones, se necesitaba cuantificar e incluir este criterio de decisión a la hora de seleccionar a los proveedores.

Por ende, se pretende dotar a dicho departamento de las herramientas necesarias para apoyar sus decisiones, pudiendo evaluar numéricamente criterios otros que el importe final del contrato.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN

ACTUAL

2.1. ACTIVIDAD, VISIÓN Y VALORES

El grupo francés Eiffage nace en 1993 de la fusión de las empresas del sector de la construcción Fougerolle (1844) y la Société Auxiliaire d'Entreprises (SAE-1924). En la actualidad el grupo posee ocho actividades agrupadas en cuatro ramas.

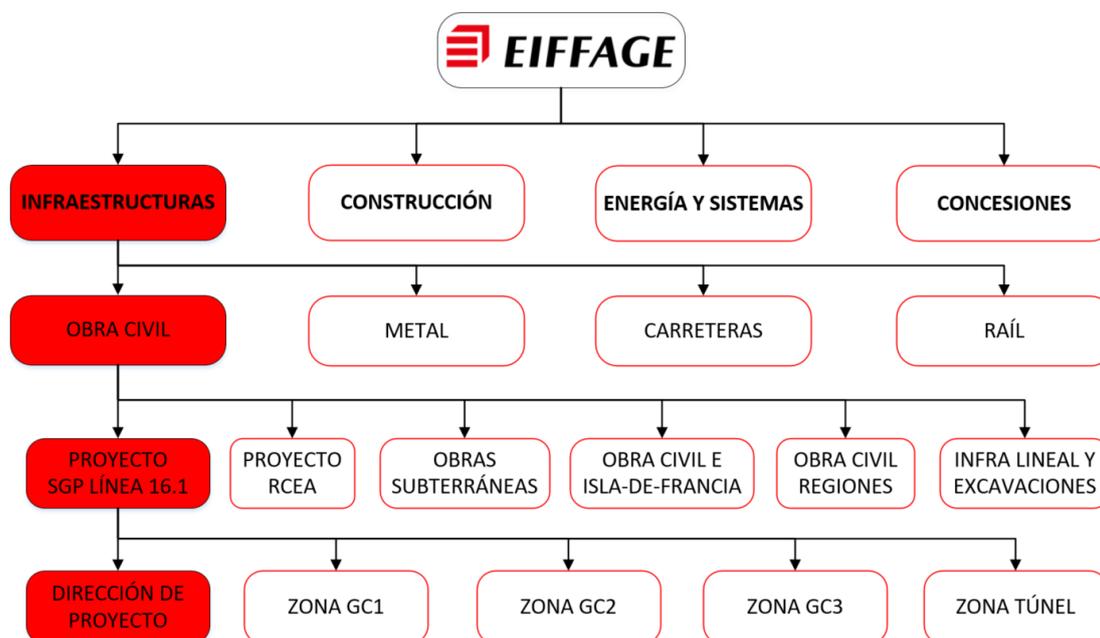


Ilustración 3. Organigrama de Eiffage desde el lugar de desarrollo de la memoria. Elaboración propia.

Geográficamente, la actividad de Eiffage está fuertemente localizada en Francia, si bien exporta una gran cantidad de su experiencia técnica (25% de su volumen de negocio), lo que lo sitúa entre los líderes europeos del BTP y las concesiones. Además de la implantación en Europa, Eiffage acompaña a varios clientes en el mundo a partir de sus filiales y está presente en más de 50 países gracias a sus 70 000 colaboradores.

En la ilustración 3 se puede observar el organigrama de las funciones del grupo y cómo la rama de Infraestructuras se descompone en sus cuatro actividades. En concreto este proyecto y las prácticas en empresa se desarrollaron en el seno de la dirección del proyecto del Grand Paris Express de la línea 16.1 que se inscribe en la actividad de la Obra Civil.

La visión de la empresa está basada en su diferenciación y especialización técnica con respecto a sus competidores, de ahí su lema *Savoir faire la différence*, que se aplica igualmente a la gestión de los recursos humanos y a las relaciones territoriales y para con los clientes. Desde el punto de vista técnico, busca la construcción de un futuro sostenible, con la transición ecológica en el centro de las decisiones estratégicas. Por ende, los departamentos soporte de calidad,

medio ambiente y comunicación tienen un rol esencial en la empresa para medir y minimizar el impacto negativo de las obras en los ecosistemas y territorios urbanos y garantizar el cumplimiento de la normativa y las exigencias del cliente.

En cuanto a la política *Bas carbone* de disminución de la huella de carbono, el grupo se ha comprometido con una trayectoria de reducción de 1,5°C. Un objetivo muy ambicioso que implica para 2030 la consecución de la reducción de un 46% de las emisiones de gases de efecto invernadero directas y en un 30% las emisiones indirectas con respecto al año de referencia, 2019.

La estrategia del grupo está basada en dos pilares: la reducción de su huella de carbono asociada a las actividades propias en curso y la creación de una oferta *Bas carbone* orientada a las licitaciones y proyectos futuros, permitiendo a sus clientes reducir sus emisiones.

2.2. ESTRUCTURA DE LA ORGANIZACIÓN

El proyecto del Grand Paris Express consiste en la realización de 5 nuevas líneas de metro con un lineal de más de 200 km de túneles, representados en la ilustración 4, para reforzar el actual sistema de transporte de la región de Isla de Francia, en Francia. Dicho proyecto, aprobado bajo el mandato de Nicolas Sarkozy en 2010, comenzó en 2016 con las obras de la línea 15 sur y su finalización está prevista en 2030 según la Société du Grand Paris (2021).

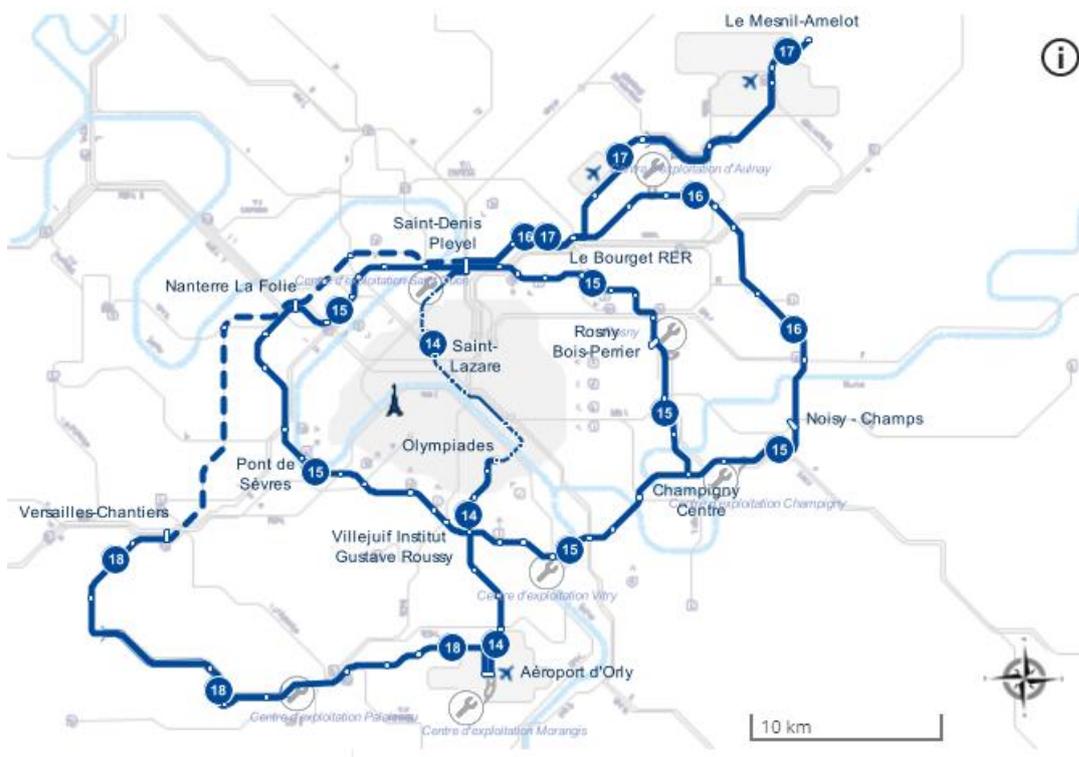


Ilustración 4. Trazado de las nuevas líneas del GPE. Fuente: Société du Grand Paris (2022).

Un momento clave en la evolución del proyecto es la celebración de los Juegos Olímpicos de Paris en 2024, para cuando la línea 14, y una parte de la 15, 16 y 17 deberían estar inauguradas.

La Société du Grand Paris es la entidad pública a cargo del proyecto desde su creación en 2010. Su cometido es asegurar la concepción y realización de la red de transporte público del Grand

Paris Express, llevar a cabo las operaciones de desarrollo urbano y construcción asociadas a esta red, aportar la financiación y organizar las relaciones con los actores asociados. Además, la SGP posee el rol de MOA (*maître d'ouvrage*) o comitente en el que define objetivos, calendario y presupuestos para asegurar la consecución del proyecto.

En particular, se va a analizar el contrato de la línea 16.1, que se otorgó en 2018 a la UTE de Eiffage GC (denominación para la actividad de Obra Civil), Razel-Bec y TSO, y en el cual Eiffage GC es el mandatario. Este tramo permitirá la unión de las localidades de Saint-Ouen y Aulnay-Sous-Bois en el departamento 93 de la Seine-Saint-Denis. El lote comprende también la conexión con el norte de la línea 14 en la futura estación de Saint-Denis-Pleyel, los primeros kilómetros de la línea 17 que unen dicha estación con el aeropuerto de Le Bourget y una parte de la futura línea 15 que recorrerá toda la periferia parisina.

El importe del proyecto asciende a 1,84 billones de euros, de los cuales 1,71 son atribuidos a Eiffage para la excavación de más de 19 kilómetros de túnel, indicados en amarillo en la ilustración 5, la construcción de 5 estaciones y 19 pozos de mantenimiento (*ouvrages annexes*) y la instalación de las líneas férreas, catenarias, y equipos lineales del trazado.



Ilustración 5. Trazado de la línea 16.1. Fuente: Société du Grand Paris (2022).

Por razones logísticas, y dada la envergadura del proyecto, la Línea 16.1 se dividió en cinco zonas: tres de obra civil (GC1 en rojo, GC2 en verde y GC3 en azul), una de obras subterráneas (TUN) y otra para las vías, catenarias y equipamientos lineales (VCE). Esto permitió repartir el volumen de negocio y las horas de trabajo entre distintas entidades de Eiffage. Un cuadro sinóptico de dicha repartición se puede observar en la ilustración 6.

Cada zona, cuenta pues con sus propios departamentos de prevención, administración, finanzas, calidad, dirección técnica...y una organización propia para cada obra, así como con un director.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

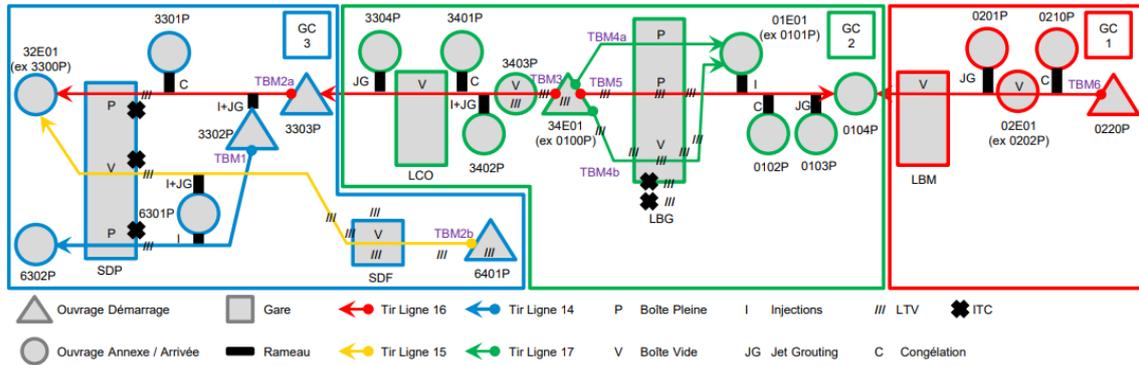


Ilustración 6. Cuadro sinóptico de las obras y tuneladoras de la L16.1. Fuente: Dirección proyecto L16.1.

Pascal Hamet, director del proyecto, es el encargado de gestionar las distintas zonas, y de dirigir las funciones soporte a las zonas que componen la dirección de proyecto:

- Dirección Administrativa y Financiera: abarca los recursos humanos, la gestión, la contabilidad y los servicios generales
- Dirección OPC (Ordenación, Planificación y Coordinación): se ocupa de la planificación de las actividades y de la gestión de las interfaces externas y externas. También se encarga del informe del proyecto y contiene al servicio contractual-jurídico y una célula de análisis financiero para los nuevos precios.
- Dirección Calidad y Medioambiente
- Dirección Prevención y Seguridad

Asimismo, para las actividades principales, se tienen los servicios de Compras, Materiales, Excavaciones, Pantallas, Hormigón y Sistemas con un encargado y, según el nivel de actividad, varios operadores.

2.3. CADENA DE SUMINISTRO

Para llevar a cabo este proyecto, se necesitaban más de 700 000 metros cúbicos de hormigón, por lo que se tuvo que desarrollar una cadena de suministro propia para cubrir la demanda. En primer lugar, se consultó a los grandes proveedores de hormigón de la zona (LaFarge, Eqiom, Unibeton y Cemex) que eran capaces de fabricar para el proyecto desde sus instalaciones fijas acordando unos volúmenes mensuales. Dada la envergadura del GPE y la necesidad de flexibilidad y el calendario apretado para estar disponibles para los JJOO de 2024, se consultaron también pymes especializadas en la instalación de centrales de hormigón “móviles” en la parcela de la obra durante la duración de esta y que garantizan la exclusividad del servicio.

Debido a la red vial existente en la zona del proyecto, se primaron las ofertas cuyas centrales de producción tuvieran una menor distancia de transporte a las obras, para asegurar al mismo tiempo la cadencia demandada para los bombeos de hormigón y la conservación de sus propiedades.

En consecuencia, se acordó el aprovisionamiento de hormigón con dos proveedores, BSM (Béton Solutions Mobiles) y EIME (Eiffage Infraestructuras Mobile Equipment), que explotan centrales de hormigón móviles y cuentan con una pequeña red de centrales fijas complementarias.



Ilustración 7. Camiones hormigonera de EIME (izda.) y maqueta de BSM (dcha.). Elaboración propia.

Así, y dado el plan de carga realizado por los equipos de planificación y ejecución de obra (consultar § 3.2), se optó por instalar cuatro centrales de hormigón con esos dos proveedores en el interior de las parcelas de obra.

Dentro de la lista de parcelas de tamaño suficiente para albergar una central de hormigón (mínimo 900 m²), se seleccionaron aquellas en la que la parcela ocupada por la central estuviese disponible durante la integralidad de las obras y que las vías de circulación internas y externas fuesen lo más seguras según los criterios de decisión indicados en la tabla 1.

Obra	Superficie disponible (m ²)	Restricción de ruido	Accesibilidad vehículos pesados	Instalación prevista de central a mortero	Selección de la parcela para albergar una UP
SDP	1 440	No	Alta	No	Sí
3303P	1 550	Sí, viviendas	Baja	Sí, en marzo 2020	No
6401P	1 300	No	Moderada	Sí, en octubre 2021	No
0100P	4 300	No	Alta	Sí, en febrero 2020	Sí
0101P	950	Sí, colegio	Moderada	No	No
0220P	8 900	No	Alta	Sí, en agosto 2019	Sí

Tabla 1. Criterios de decisión para el emplazamiento de las unidades de producción de hormigón. Elaboración propia.

De las obras factibles, se privilegiaron aquellas que no fuesen pozos de lanzamiento de tuneladoras ya que era altamente probable que en el futuro se instalasen centrales de mortero (centrales de hormigón de menor tamaño) para fabricar el material de relleno del hueco anular entre las dovelas del túnel y el terreno. También se prefirieron las obras con una alta accesibilidad debido al alto flujo de camiones hormigonera y de camiones tolva y cisterna de 40 toneladas para el abastecimiento en materias primas. Así pues, se tienen las siguientes localizaciones representadas en la ilustración 8:

- **UP1:** en Saint-Denis, en la obra SDP (al oeste)
- **UP2 y UP3:** en La Courneuve, en la obra 0100P (centro)
- **UP4:** en Aulnay-sous-Bois, en la obra 0200P (al este)

Las tres primeras están a cargo de la empresa BSM y la última de EIME, filial española del grupo Eiffage.

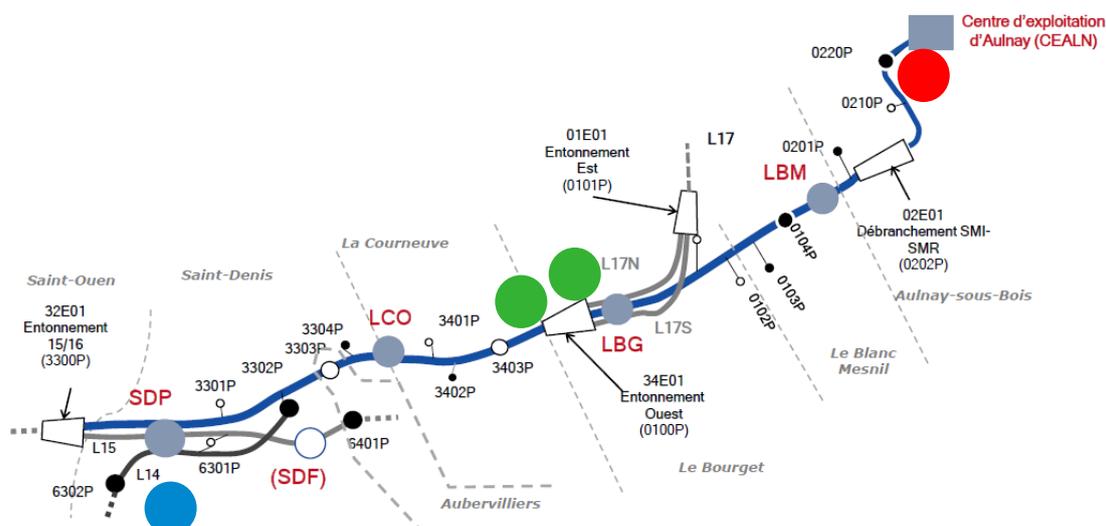


Ilustración 8. Trazado de la L16.1 con las comunas y las centrales de hormigón. Fuente: Dirección de Proyecto L16.1

En cuanto al transporte, cada proveedor de hormigón estableció contratos con entre dos y tres empresas de camiones hormigoneros para garantizar la presencia de una flota fija de camiones mensual y la disponibilidad de camiones suplementarios en función de la demanda diaria en firme.

2.3.1. LA RED DE TRANSPORTE

La región de Isla de Francia está fuertemente caracterizada por su alta urbanización y por una elevada densidad de población. Esto, unido a la alta actividad de los sectores industriales y de servicios, han provocado la creación de una red de transporte altamente ramificada en la región y articulada en torno al transporte público (algo más de 800 km entre metro y RER) y a las carreteras (40 000 km).

Debido al gran número de desplazamientos individuales diarios (58%) y a los transportes comerciales de mercancías (85%) dados por Bruitparif (2017), las carreteras de Isla de Francia se encuentran fuertemente congestionadas, con un fenómeno pronunciado de horas punta de 7:30 a 9:30 y de 16:30 a 19:00. Esto hace que para un recorrido medio de 10 kilómetros con un 70% de autovía, se pase de un tiempo de 15 minutos a algo más de una hora por la reducción considerable de la velocidad media del trayecto.

Por consiguiente, este fenómeno se deberá tener en cuenta durante la organización de la cadena de abastecimiento del hormigón ya que, si se necesitan 15 minutos para fabricarlo, otros 15 para recibirlo y 30 para colocarlo, no se debería sobrepasar una hora de transporte para garantizar el cumplimiento de la reología. La medición y optimización de las distancias realizadas por los camiones hormigoneros desde el punto de fabricación hasta la obra de colocación son pues un elemento clave.

2.3.2. DISTANCIAS EN LA RED

Uno de los parámetros esenciales para realizar la asignación de la demanda en el apartado 3.3 es el cálculo de la distancia entre las unidades de producción y las obras del proyecto. Para ello se parte de las coordenadas GPS de los distintos puntos conocidos por el Contrato Público y que se pueden consultar también en herramientas de navegación como *Google Maps*. Los valores para el proyecto L16.1 están recogidos en las tablas 1 y 2. La latitud y longitud se han tomado para el punto central de la parcela de la obra y se dan en grados y también en radianes para los cálculos posteriores.

Coordenadas GPS - Centrales de producción				
Centrales	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (rad)	Longitud (rad)
UP1-SDP	48,9179	2,3447	0,8538	0,0409
UP2-0100P	48,9296	2,4147	0,8540	0,0421
UP3-0100P	48,9296	2,4147	0,8540	0,0421
UP4-0220P	48,9607	2,4755	0,8545	0,0432

Tabla 2. Coordenadas GPS de las centrales de hormigón. Elaboración propia.

Coordenadas GPS - Obras				
Obras	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (rad)	Longitud (rad)
O1-SDP	48,9176	2,3463	0,8538	0,0410
O2-SDF	48,9181	2,3636	0,8538	0,0413
O3-LCO	48,9294	2,3852	0,8540	0,0416
O4-LBG	48,9306	2,4220	0,8540	0,0423
O5-LBM	48,9454	2,4624	0,8543	0,0430
O6-6301P	48,9166	2,3528	0,8538	0,0411
O7-6302P	48,9166	2,3398	0,8538	0,0408
O8-6401P	48,9192	2,3683	0,8538	0,0413
O9-3300P	48,9197	2,3372	0,8538	0,0408
O10-3301P	48,9182	2,3519	0,8538	0,0410
O11-3302P	48,9184	2,3608	0,8538	0,0412
O12-3303P	48,9218	2,3690	0,8538	0,0413
O13-3304P	48,9256	2,3749	0,8539	0,0414
O14-3401P	48,9307	2,3947	0,8540	0,0418
O15-3402P	48,9294	2,4006	0,8540	0,0419
O16-3403P	48,9290	2,4118	0,8540	0,0421
O17-0100P	48,9296	2,4147	0,8540	0,0421
O18-0101P	48,9334	2,4319	0,8540	0,0424
O19-0102P	48,9358	2,4395	0,8541	0,0426
O20-0103P	48,9399	2,4484	0,8542	0,0427
O21-0104P	48,9427	2,4543	0,8542	0,0428
O22-0201P	48,9498	2,4719	0,8543	0,0431
O23-0210P	48,9564	2,4800	0,8545	0,0433
O24-0220P	48,9607	2,4755	0,8545	0,0432

Tabla 3. Coordenadas GPS de las obras. Elaboración propia.

A continuación, se calcula la distancia entre unidades de producción y obras con dos procedimientos. El primero, matemático, está basado en la distancia de Haversine, que determina la distancia del círculo máximo que se inscribe entre dos puntos en una esfera a partir de la latitud y longitud de estos. Para ello se emplea la función Haversine (FH) o semiverseno:

$$FH = \text{semiverseno} \left(\frac{d}{R} \right) = \text{semiverseno} (\varphi_1 - \varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \text{semiverseno}(\Delta\beta)$$

Ecuación 1. Función de Haversine para calcular la distancia entre dos puntos sobre una esfera. Wikipedia (2022)

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

donde

- d es la distancia esférica en km entre la unidad de producción y la obra
- R es el radio de la esfera, en este caso la Tierra ($R= 6367,45$ km)
- φ_1 es la latitud de la unidad de producción en radianes (punto 1)
- φ_2 es la latitud de la obra en radianes (punto 2)
- $\Delta\beta$ es la diferencia entre las longitudes en radianes del punto 1 y 2

De la expresión del semiverseno, se deduce la distancia a partir de la función arcoseno:

$$d = 2 \cdot R \cdot \text{arcoseno}(\sqrt{FH})$$

Ecuación 2. Etapa 2 de la función de Haversine para aislar la distancia

Así, aplicando dicha fórmula a las 4 unidades de producción y 24 obras, se obtiene la matriz de distancias de 96 elementos de la parte izquierda de la tabla 4.

El segundo método, consiste en calcular, individualmente cada uno de los recorridos por *Google Maps*, considerando el trazado real recorrido por los camiones, en contraposición a la función de Haversine que calcula la distancia a vuelo de pájaro (línea recta). La segunda tanda de datos se recoge en la parte derecha de la tabla 4. De manera complementaria se ha calculado en la última línea la distancia media de todos los recorridos posibles.

Distancias (km) - Fórmula semiverseno					Distancias ruta real (km) - Google Maps				
Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4	Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4
O1-SDP	0,12	5,17	5,17	10,58	O1-SDP	0,0	6,8	6,8	17,3
O2-SDF	1,38	3,95	3,95	9,44	O2-SDF	2,1	5,2	5,2	13,3
O3-LCO	3,22	2,15	2,15	7,45	O3-LCO	4,1	2,7	2,7	11,0
O4-LBG	5,82	0,55	0,55	5,14	O4-LBG	7,3	0,5	0,5	10,1
O5-LBM	9,11	3,90	3,90	1,96	O5-LBM	11,6	5,7	5,7	6,2
O6-6301P	0,61	4,75	4,75	10,21	O6-6301P	1,3	5,6	5,6	14,0
O7-6302P	0,39	5,66	5,66	11,05	O7-6302P	0,5	7,1	7,1	17,2
O8-6401P	1,72	3,58	3,58	9,09	O8-6401P	3,0	4,7	4,7	13,0
O9-3300P	0,58	5,76	5,76	11,08	O9-3300P	0,6	7,3	7,3	17,2
O10-3301P	0,52	4,76	4,76	10,19	O10-3301P	1,5	5,4	5,4	13,8
O11-3302P	1,17	4,13	4,13	9,61	O11-3302P	2,1	4,8	4,8	12,9
O12-3303P	1,82	3,45	3,45	8,90	O12-3303P	3,7	4,4	4,4	12,1
O13-3304P	2,36	2,94	2,94	8,32	O13-3304P	3,4	3,5	3,5	12,4
O14-3401P	3,91	1,47	1,47	6,78	O14-3401P	5,1	2,2	2,2	10,5
O15-3402P	4,28	1,03	1,03	6,48	O15-3402P	5,7	2,1	2,1	10,5
O16-3403P	5,05	0,23	0,23	5,84	O16-3403P	6,7	0,2	0,2	9,5
O17-0100P	5,27	0,00	0,00	5,63	O17-0100P	6,8	0,1	0,1	9,6
O18-0101P	6,59	1,32	1,32	4,40	O18-0101P	8,1	2,9	2,9	8,0
O19-0102P	7,20	1,94	1,94	3,82	O19-0102P	10,0	3,7	3,7	7,6
O20-0103P	7,95	2,71	2,71	3,05	O20-0103P	10,2	4,9	4,9	7,1
O21-0104P	8,46	3,24	3,24	2,53	O21-0104P	10,7	5,1	5,1	6,8
O22-0201P	9,93	4,74	4,74	1,24	O22-0201P	14,5	8,2	8,2	4,9
O23-0210P	10,76	5,62	5,62	0,58	O23-0210P	13,5	8,3	8,3	3,6
O24-0220P	10,66	5,63	5,63	0,00	O24-0220P	13,8	8,5	8,5	0,3
D Media	4,37				D media	6,38			

Tabla 4. Distancias de Haversine (izda.) y GPS (dcha.) entre las obras y las centrales de hormigón. Elaboración propia.

En estas tablas se puede observar una diferencia en el grado de precisión de la medida, sobre todo en el caso de las centrales de producción situadas dentro de una obra ya que las distancias en el seno de las obras son difíciles de calcular al no disponer de carreteras definitivas. Además, el punto de colocación de hormigón en una obra puede variar según el elemento a hormigonar.

Dada la diferencia de las distancias medias obtenidas, se calcula la diferencia entre los valores proporcionados por ambos métodos. El ratio entre ambas se ha recogido en la tabla 5.

Comparación de métodos de cálculo de la distancia				
Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4
O1-SDP	0%	31%	31%	64%
O2-SDF	53%	31%	31%	41%
O3-LCO	27%	23%	23%	48%
O4-LBG	25%	-9%	-9%	95%
O5-LBM	27%	45%	45%	217%
O6-6301P	114%	17%	17%	37%
O7-6302P	16%	25%	25%	56%
O8-6401P	74%	30%	30%	43%
O9-3300P	3%	26%	26%	55%
O10-3301P	188%	12%	12%	35%
O11-3302P	79%	15%	15%	34%
O12-3303P	103%	26%	26%	36%
O13-3304P	44%	17%	17%	49%
O14-3401P	30%	46%	46%	55%
O15-3402P	33%	100%	100%	62%
O16-3403P	32%	0%	0%	62%
O17-0100P	28%	0%	0%	70%
O18-0101P	23%	115%	115%	82%
O19-0102P	39%	89%	89%	99%
O20-0103P	28%	79%	79%	133%
O21-0104P	26%	56%	56%	169%
O22-0201P	46%	72%	72%	295%
O23-0210P	25%	47%	47%	517%
O24-0220P	29%	50%	50%	0%
Media	46%	39%	39%	98%
Media total		56%		

Tabla 5. Comparación en porcentaje de las distancias de Haversine y Google Maps. Elaboración propia.

De la tabla 5 se deduce que el método de Haversine infravalora en más de un 50% la distancia real al no considerar el trazado vial. Esto se hace más notable en la zona industrial en torno a la central UP4 donde hay carreteras muy largas en las que no se puede hacer cambio de sentido y se necesitan casi seis kilómetros de trazado para acceder a la autovía que está a 500 metros de distancia en línea recta.

Por ello, se tomará como referencia la distancia de *Google Maps* (2022) para el problema con el fin de asegurar la precisión y consistencia del dimensionamiento posterior. En caso de no disponer conexión a internet o no tener un trayecto actualizado al tratarse de carreteras temporales para la obra o al haber cortes de tráfico, se tomará la distancia de Haversine y se multiplicará por el coeficiente corrector de 1,56.

2.3.3. LA CAPACIDAD DISPONIBLE

La capacidad de fabricación de una central de hormigón está determinada por cuatro factores:

- El tamaño de la amasadora: que determina la carga útil máxima que se puede fabricar. Suele situarse entre 2 y 3,5 metros cúbicos. Para llenar un camión de 7,5 m³ se producirán varias cargas de igual volumen.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

- El tiempo de carga de los componentes: viene determinado por las especificaciones técnicas de la central y por el tipo de equipamiento empleado. Principalmente está relacionado con la velocidad y longitud de las cintas de transporte o del elevador de cangilones que llevan los áridos a la amasadora. En términos de equipamiento, se tienen:
 - Las cintas transportadoras: más baratas, pero requieren una gran superficie en suelo por las limitaciones de inclinación de 30°
 - Los skip, precisan una menor inclinación, pero suponen mayores problemas de averías
 - Los elevadores de cangilones que equivalen a las cintas, pero con recorrido vertical, tienen grandes requerimientos de mantenimiento y de equipos auxiliares para la distribución de los áridos en las tolvas verticales.

La ventaja del skip es que, para los ciclos siguientes al primero, el tiempo de carga de los áridos pasa a ser invisible (preparación externa) pues el skip se carga y se posiciona a la altura de la amasadora durante el tiempo de amasado del ciclo precedente mientras que, para el caso de las cintas transportadoras o elevadores de cangilones, la carga se hace progresivamente en tiempo útil (preparación interna). Existe una opción mixta que combina las cintas transportadoras con elevadores de cangilones y que permite anticipar parcialmente la carga de los áridos al almacenarlos en tolvas verticales más cercanas a la amasadora que la tolva de carga, como las visibles en la ilustración 9.



Ilustración 9. Esquema de las partes de una central de hormigón. Fuente: Elaboración propia.

- El tiempo de amasado: una vez introducidos todos los componentes, estos se deben mezclar durante una cantidad de tiempo, determinada por la tipología de hormigón, antes de poder abrir la trampilla para cargar el camión. Este valor suele ser de 35 segundos para los morteros, 55 para los hormigones clásicos (GC, PM, RELL), y hasta 120 segundos para hormigones más específicos como los autocompactantes o aquellos que contengan una gran cantidad de aditivos.

- El tiempo de posicionamiento y carga de los camiones: consiste en el tiempo que tarda el conductor en colocar la tolva del camión bajo el conducto de carga (en naranja en la ilustración 10) y este en abrirse y vaciar el contenido de la amasadora. En general se trata de operaciones de marcha atrás en zonas relativamente estrechas y con la dificultad de los puntos muertos. Este tiempo es más dependiente del plan de circulación de los camiones en la obra y del emplazamiento de elementos anexos a la fabricación del hormigón como las plataformas de los silos y las balsas de lavado de camiones. Además, se tiene la experiencia del conductor para realizar la marcha atrás. En general se tarda un minuto entre la salida del camión cargado y el correcto emplazamiento del siguiente, al cual se añaden 15 segundos para la apertura de la trampilla y carga del camión.

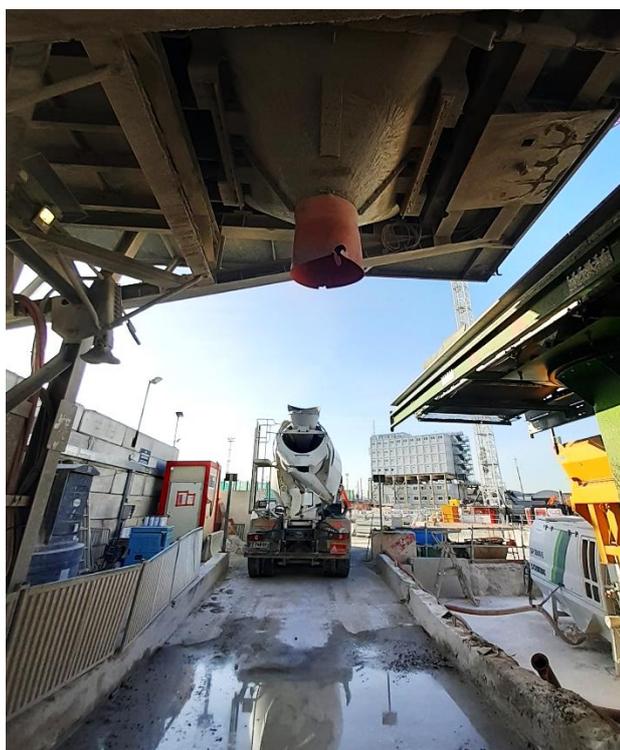


Ilustración 10. Punto de carga de los camiones hormigonera. Fuente: Elaboración propia.

En este proyecto las centrales instaladas son el modelo ELC 3000 del proveedor Europe Equipment, lo que quiere decir que la amasadora tiene un volumen máximo de 3000 litros. Durante la visita a las centrales se contaron los tiempos de las distintas operaciones y se completaron con la información de los centralistas. Así, se tienen en la tabla 5 los tiempos para la carga de un camión de 7,5 m³ a partir de tres amasadas de 2,5 m³:

Tiempos de las operaciones	Amasada 1	Amasadas 2 y 3	Total
Carga de materiales	2 min 30 s	2*45 min = 1 min 30 s	4 min
Amasado	55 s	2*55 s = 110 s	2 min 45 s
Posicionamiento y llenado	1 min 15 s	2*15 s = 30 s	1 min 45 s

Tabla 6. Cálculo del tiempo de fabricación y carga de una amasada. Elaboración propia.

Se obtiene un tiempo total de 8 min 30 s, lo que implica una cadencia horaria entre 50 y 60 m³/h, equivalente a entre 7 y 8 camiones completos.

Otros factores que pueden impactar en la cantidad de hormigón que una central puede fabricar son la disponibilidad de materias primas, la amplitud horaria de trabajo de los operadores o de las obras a las que se provee, la planificación de las operaciones de mantenimiento y la ocurrencia de averías.

2.4. SITUACIÓN ACTUAL

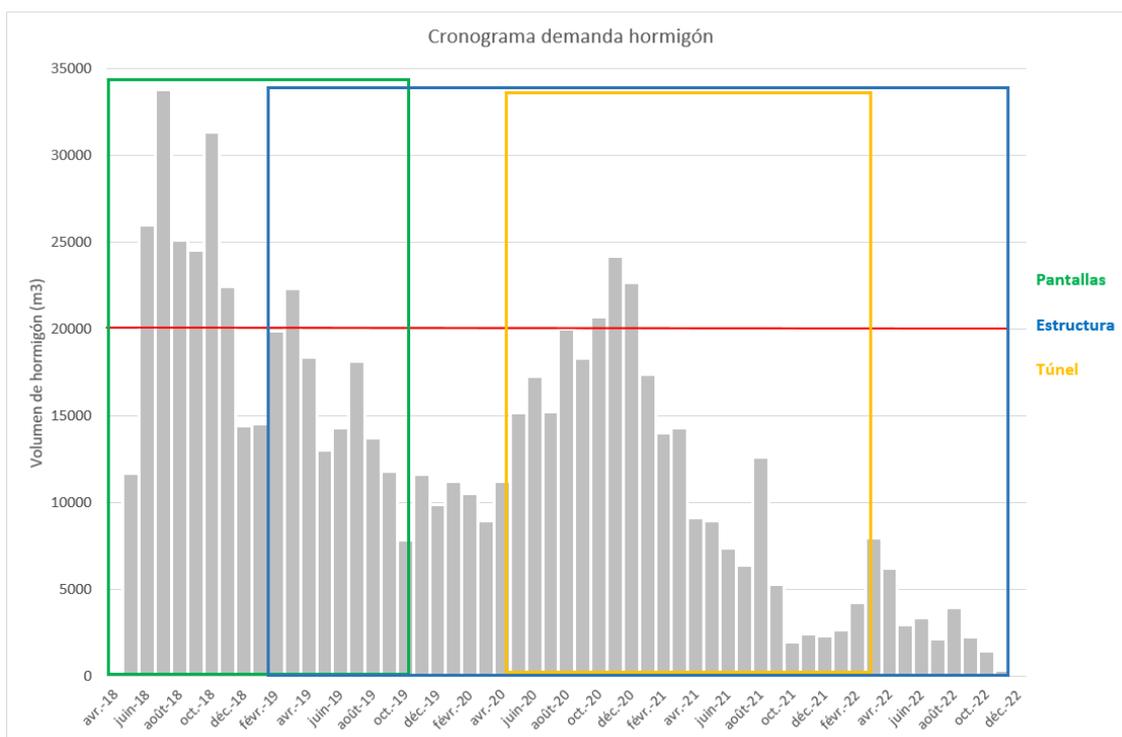
En lo que concierne a la Línea 16.1, el proyecto estaba pensado para una duración total de 69 meses y una inauguración para los JJOO de París 2024. No obstante, la SGP, ha pospuesto la entrega de la mayor parte de la línea férrea al 2026 debido al retraso actual del proyecto. Este ha sido causado principalmente por tres factores:

- la sobrestimación de la capacidad semanal de avance de las obras de muros pantalla y de la cadencia de excavación de las tuneladoras
- la ralentización de la velocidad de excavación de las tuneladoras a causa de las averías y de la presencia de un terreno más duro y abrasivo de lo esperado
- la parada y consiguiente disminución de la actividad por el COVID-19

Estos tres, unidos a un cambio en la política gubernamental de reducción de costes en materia de inversiones e infraestructuras, ha hecho que el proyecto se dilate en el tiempo y con ello, la repartición de la demanda de hormigón.

2.4.1. PROPUESTA INICIAL (FASE CONCEPCIÓN)

En primer lugar, durante la fase de concepción del primer trimestre de 2018, se analizaron las necesidades de consumo de recursos y se proyectaron en forma de cronograma para concluir los contratos con los proveedores seleccionados. Para el hormigón, y el acero, se preveía una distribución bimodal con una ligera asimetría positiva de los valores con consumos desde mayo 2018 hasta diciembre 2022 (ver gráfica 1).



Gráfica 1. Cronograma de las necesidades de hormigón planificadas en 2018. Elaboración propia.

Además, la demanda se clasifica según el tipo de hormigón, asociado a las principales actividades de construcción: los muros pantalla, las estructuras civiles y el relleno del túnel hasta el nivel de la vía.

El periodo de muros pantalla en sí mismo contaba con una duración de 18 meses y la realización de 1 000 elementos con un total de 300 000 m³. En esta fase se encontraba el mayor pico de demanda en el segundo semestre de 2018 con un pico mensual de casi 34 000 m³.

La finalidad de estos muros de dimensiones medias de 2 x 6 x 35 m de profundidad es crear una caja estanca para proteger su interior de las llegadas de agua por el terreno y las capas freáticas colindantes. Así, la zona interna creada se puede excavar y aislar del agua para albergar las estructuras civiles, ya sean las estaciones o los pozos de mantenimiento.

A medida que estas excavaciones avanzan, se van construyendo (del nivel del suelo hacia el nivel mínimo de 35 metros bajo tierra) los distintos niveles de las estructuras. Esta fase, se extiende desde principios de 2019 hasta finales de 2022 y se necesitan 250 000 m³ de hormigón.

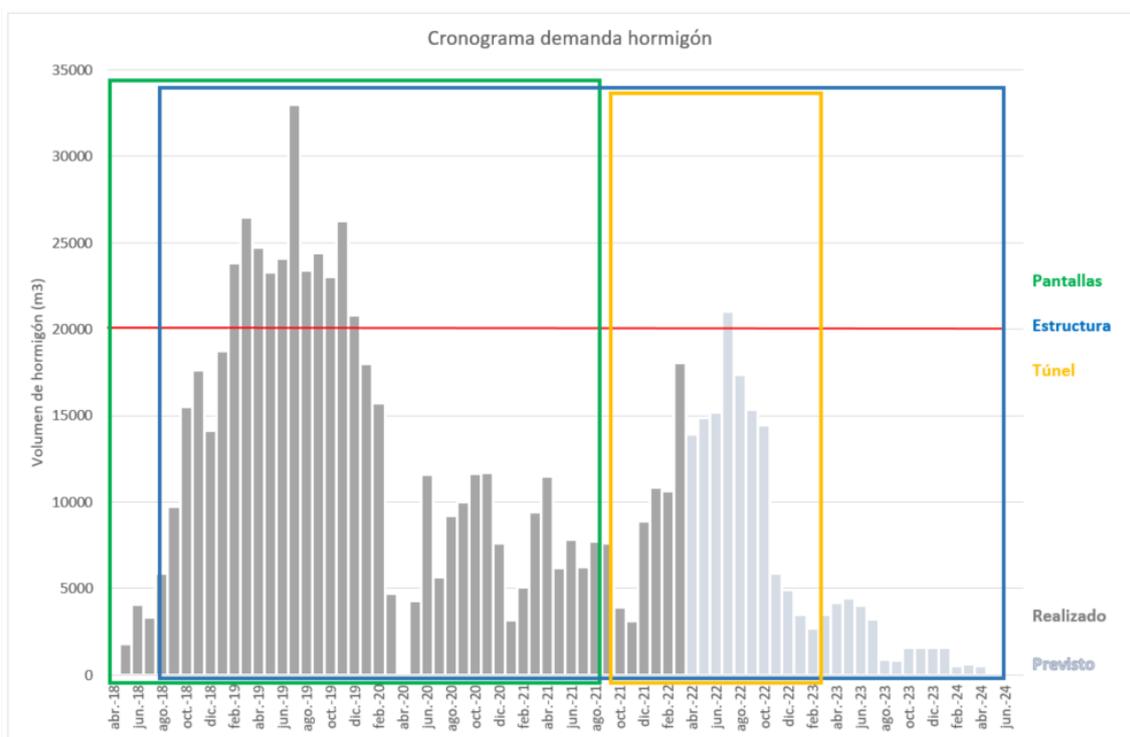
La última fase consiste en 200 000 m³ de hormigón de relleno para completar la sección circular de los casi 20 km de túnel hasta el nivel en el que se instalan los raíles de las vías férreas. El lanzamiento de esta fase estaba directamente condicionado por el ritmo de avance de la excavación de las seis máquinas tuneladoras que perforan túneles de diez metros de diámetro entre las distintas estaciones y pozos. Es durante esta fase, que coexiste con la de estructuras, que se encuentra un segundo pico de demanda a finales de 2020.

Cabe destacar un periodo valle de nueve meses de duración entre ambos picos (agosto 2019 – abril 2020) en los que solo se realizarán estructuras civiles y que supondrá un punto de análisis importante en el dimensionamiento de la estructura debido a la contraposición entre la

infrautilización de los recursos disponibles y la necesidad de conservarlos en estado latente para el segundo pico previsto.

2.4.2. ESTADO EN 2022 (FASE EJECUCIÓN)

Al inicio de la práctica en empresa se recogieron los datos de producción desde 2018 hasta el primer trimestre de 2022 y se reprodujo el cronograma de la oferta pública. Se consideró de nuevo, la subdivisión mensual y se agruparon los periodos en función del tipo de hormigón utilizado (ver gráfica 2). Además de los volúmenes realizados, se añadieron las proyecciones actualizadas del plan al final del proyecto para visualizar los volúmenes restantes. Con esta estimación, se prolongaban las necesidades de hormigón de noviembre 2022 a abril 2024 (18 meses adicionales).

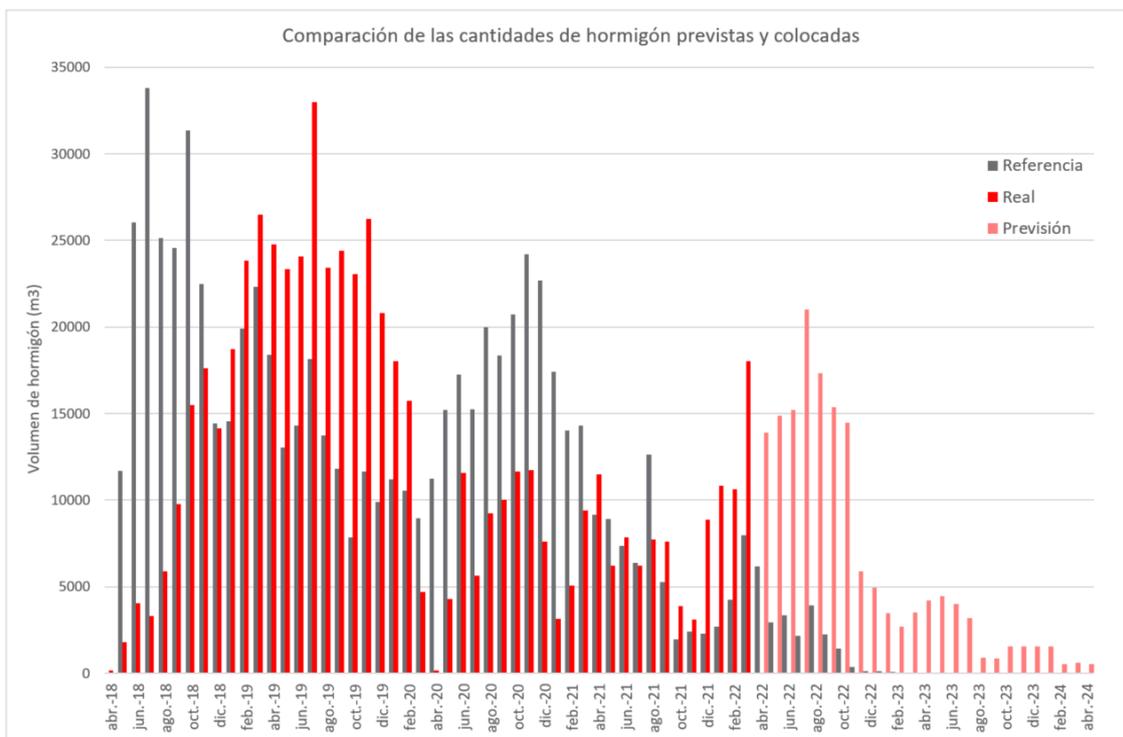


Gráfica 2. Cronograma del volumen de hormigón colocado hasta marzo 2022 y proyecciones a final de proyecto. Elaboración propia.

En este caso, el período de suministro de hormigón para pantallas se dilataba en el tiempo y pasaba de durar un año y medio a tres años con la ralentización de las cadencias de las operaciones. Por su parte, las estructuras se extendían durante toda la duración de la fabricación y las actividades de relleno de túnel debían concentrar toda su actividad en un año y medio en vez de los dos inicialmente previstos, con el fin de compensar el retraso de excavación de las tuneladoras.

2.4.3. COMPARATIVA Y ANÁLISIS DE LA DESVIACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN

Al superponer las dos curvas de los apartados anteriores en un mismo gráfico (ver gráfica 3), se observa el retraso del consumo de hormigón, así como una mayor amplitud de la curva de demanda. En particular, aparece una nueva cola de año y medio al final del proyecto y se ve como los dos picos previstos, se atrasan de algo más de un año. El consumo medio mensual también se ve reducido y, lo más inquietante, hay una gran demanda en 2022, período en el que se había acordado por contrato el desmontaje de las centrales instaladas en 2018. En contrapartida, se tiene un gran descenso del consumo desde mediados de 2020 a principios de 2022, lo que puede implicar la infrautilización de los recursos.



Gráfica 3. Cronograma comparativo entre el volumen planificado y el realizado. Elaboración propia.

Por consiguiente, este desfase entre previsión y realidad tiene fuertes impactos financieros, contractuales y de producción en 2022, año en el que se preveía que la actividad hubiese acabado. Para satisfacer la demanda inicial, se instalaron 4 centrales de hormigón, sabiendo que una se utilizaría a partir de 2020 para la fabricación de mortero para el avance de las tuneladoras, considerando que el fuerte pico de las pantallas habría pasado. Además, como se preveía que la actividad acabase en 2022, el proveedor de hormigón impuso plusvalías contractuales de explotación por cada mes suplementario y por central. Sabiendo que una central fabrica 6 000 m³ mensuales a ritmo normal, y hasta un máximo de 10 000 m³, y que la distribución de la demanda entre los distintos días de la semana no es homogénea (véase gráfica 8) existe en 2022 una falta puntual de abastecimiento y se prevé un importe de plusvalías a pagar (negociable) altamente significativo para paliar la demanda hasta 2024.

Debido a esta situación, en caso de sobrecarga, se obliga a una obra a desplazar su hormigonado al día siguiente, o al previo si están preparados, lo que altera su actividad y puede conllevar retrasos y penalizaciones financieras. La priorización entre las distintas obras se lleva a cabo en base a las actividades sobre el camino crítico del Plan General del Proyecto.

Siguiendo con los aspectos financieros, como consecuencia del escenario inflacionista actual y del retraso en los envíos de materias primas, el precio unitario del metro cúbico de hormigón se ha incrementado. Por consiguiente, las empresas de hormigón tienden a forzar a las constructoras a equilibrar las demandas semanales y reducir las distancias de envío en la medida de lo posible (es decir, aprovisionarse desde la central más cercana, so pena de ver ralentizada su cadencia si se debiese trabajar con el mismo tamaño de flota de transporte desde una central más lejana por sobrecarga de la primera).

Este aumento de precios en combustibles, solicita la búsqueda de modos de transporte más limpios, baratos y eficientes para el transporte de hormigón. Asimismo, la Société du Grand Paris incita las empresas constructoras a proponer soluciones bajas en emisiones de dióxido de carbono para continuar su actividad, pudiendo compensar los sobrecostes y otorgando un mayor porcentaje de repartición de las minusvalías derivadas.

2.4.4. SÍNTESIS

Considerando que la construcción de infraestructuras representa en Francia 22,9 Mt CO₂e según Carbone4 (2021), se pretende incluir el criterio optimización de las emisiones de CO₂ en la reflexión inicial sobre la infraestructura material. Esto se traduce por la elección de las centrales, maquinaria y tipo de transportes a utilizar y por reducir las distancias recorridas por los camiones.

Otros criterios de decisión a considerar son el impacto sobre el vecindario por el ruido generado por las obras y por las rutas de transporte y la importancia de garantizar la calidad del hormigón, cuyas propiedades solo se mantienen durante el periodo llamado reología que generalmente dura dos horas. Así, los tiempos de trayecto no deberían sobrepasar los 45-60 minutos para que la obra disponga del tiempo necesario para colocar el hormigón y que este mantenga su consistencia.

Igualmente, se busca resolver la falta de flexibilidad del modelo contractual ante las variaciones de la demanda para garantizar las mejores condiciones de aprovisionamiento de hormigón a lo largo de toda la obra. En el caso de los megaproyectos, los cronogramas (optimistas) enviados en la fase de licitación van convirtiéndose en obsoletos a medida que avanza el proyecto y los cambios en la situación PESTEL del entorno pueden tener un gran impacto sobre las decisiones iniciales. Sin embargo, debido al alto coste y tiempo necesarios para desplegar dicha infraestructura, se requiere una visión a largo plazo inicial que contemple todos los escenarios posibles en base a la curva de aprendizaje del sector / empresa constructora.

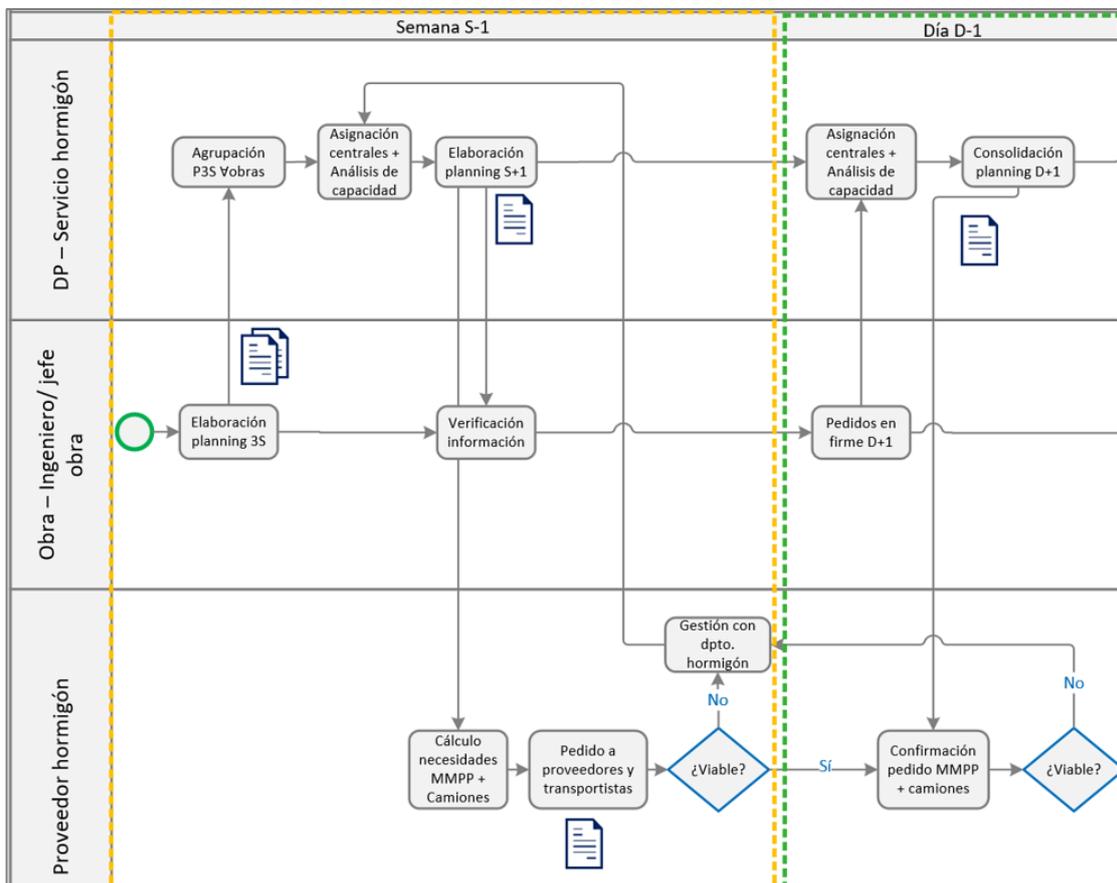
Al disponer de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones actualizable a medida que avanza el proyecto, se pueden ir reevaluando los desfases en la planificación y aplicar acciones o renegociar las condiciones. Esto evitará encontrarse al final del proyecto con una falta de infraestructuras materiales (las centrales se han desmontado), una flota de camiones insuficiente y una factura considerable asociada a las plusvalías por desmontaje tardío.

2.5. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS

Para el presente proyecto, es importante ilustrar el flujo de información entre los principales actores desde la manifestación de la necesidad de realizar un hormigonado hasta las actividades posteriores a su colocación.

En la gráfica 4 se detalla el proceso aguas arriba para la planificación del hormigonado con la demanda a corto plazo y pedidos relativamente confirmados. A partir de la necesidad de las distintas obras, se van concatenando los programas hasta obtener una primera versión del programa semanal. Sobre esta, se realizará la asignación de centrales de hormigón a las obras en acorde con el PAP del proyecto para garantizar la mínima distancia de recorrido y para asegurar la repartición del volumen entre los dos proveedores. Una vez esta atribución efectuada, se transmitirá la versión definitiva del programa semanal a los proveedores de hormigón para que puedan organizar sus pedidos de materias primas (calculando las cantidades de cada componente a partir de las fórmulas y volúmenes indicados en el *Planning S+1*) y la flota de camiones a movilizar (en función de los volúmenes, cadencias, distancias y horarios del hormigonado).

La víspera del hormigonado (*D-1*) se confirmarán de nuevo los pedidos ya que puede haber cambios en la organización de la obra o retrasos en las tareas de armadura o encofrado. Es posible que se deba actualizar la asignación de centrales y ajustar las horas de comienzo para garantizar el mayor nivel de servicio. Así, el *Planning D+1* se envía a obras y proveedores la víspera antes de las 17:00.

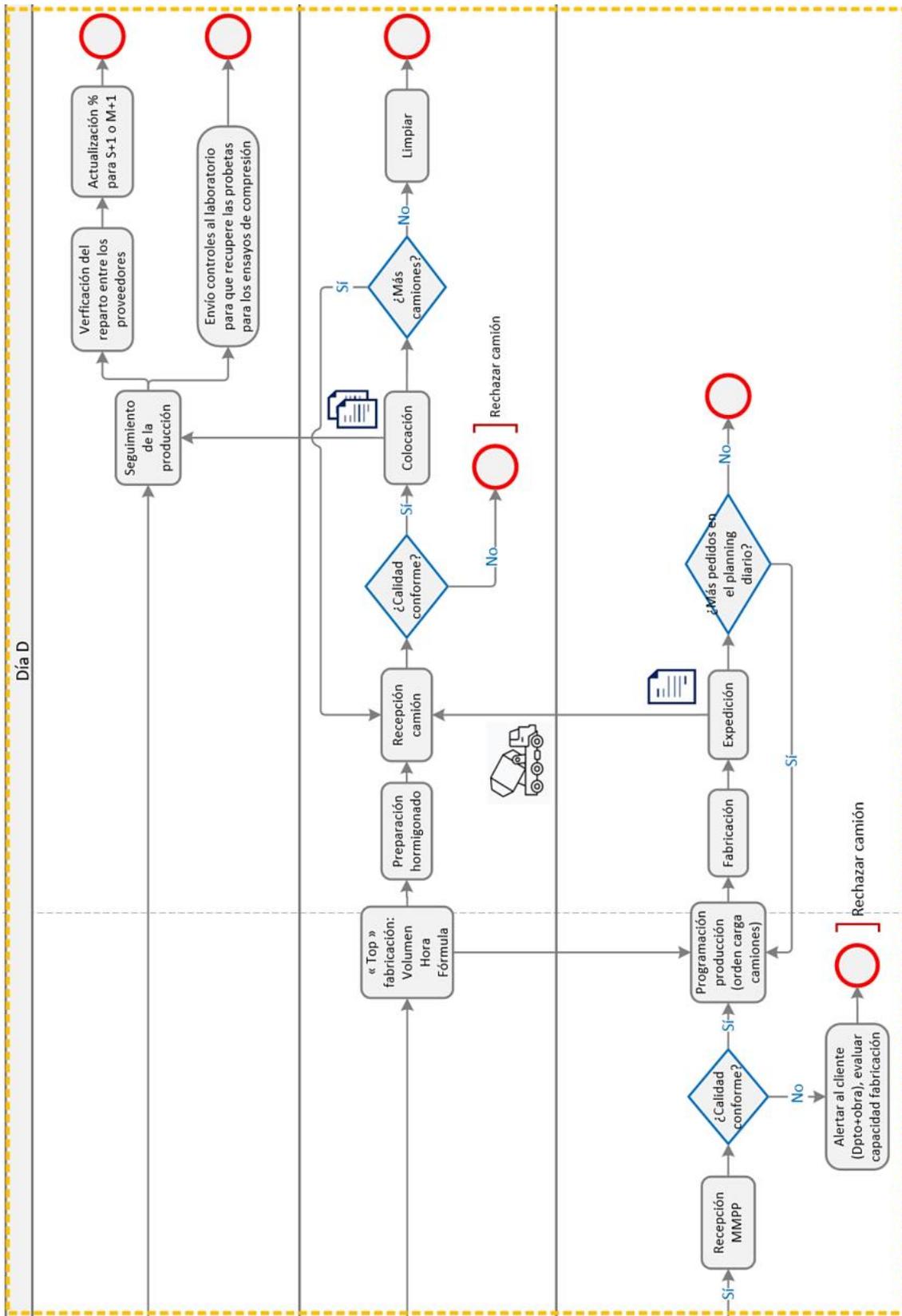


Gráfica 4. Diagrama de flujo del proceso de planificación del abastecimiento de hormigón. Elaboración propia con Microsoft Visio.

El día del hormigonado la obra contactará por teléfono con la central que se le ha asignado en el programa para confirmar la hora de comienzo y precisar, si fuese necesario, el volumen a fabricar.

A continuación, la central de producción deberá secuenciar la carga de los camiones para atender los envíos de todas las obras que hayan confirmado su lanzamiento o *top*, respetando la cadencia exigida para garantizar la calidad del hormigón y evitar atascos en los equipos de colocación. A lo largo de la jornada de trabajo, la central fabricará y enviará progresivamente a la obra los camiones para su colocación. Estos deberán ir siempre acompañados del albarán identificando su carga, cliente y fórmula. En paralelo, se efectuarán las operaciones de recepción y control de materias primas en la central.

Una vez los camiones hormigonera llegan a la obra, se controlan según la frecuencia definida para confirmar que cumplen las especificaciones. Si el producto es conforme, la obra procede a su y, en un documento adjunto sigue la cuenta del volumen recibido. Cuando el hormigonado haya terminado, la obra enviará el conjunto de albaranes al encargado de hormigón. Este último será el encargado realizar el seguimiento de la producción (reparto entre proveedores) y de transmitir la información al laboratorio para realizar los ensayos de compresión.



Gráfica 5. Diagrama de flujo del proceso de programación del abastecimiento de hormigón. Elaboración propia con Microsoft Visio.

CAPÍTULO 3. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este tercer capítulo se busca realizar la planificación de la producción a partir de las previsiones de demanda agregadas de las que se dispone para la duración total del proyecto. El horizonte de trabajo de partida es de seis años con periodos mensuales.

El principal interés es poder anticipar las decisiones sobre la infraestructura y los consumos de materiales durante la planificación estratégica de la producción, que se lleva a cabo en conjunto con los proveedores de hormigón en la fase de licitación de forma previsional y durante la llamada *fase de preparación* con pedidos en firme. Esta fase de preparación tiene una duración variable y se extiende desde la concesión del proyecto hasta los primeros hormigonados. En el proyecto de la L16.1, tuvo lugar desde principios de febrero hasta mediados de mayo de 2018.

Así pues, se pretende trazar de nuevo el camino recorrido desde las primeras decisiones de producción hasta la planificación maestra de la producción, pasando por la planificación agregada y considerando la planificación de recursos y la capacidad de producción de las instalaciones.

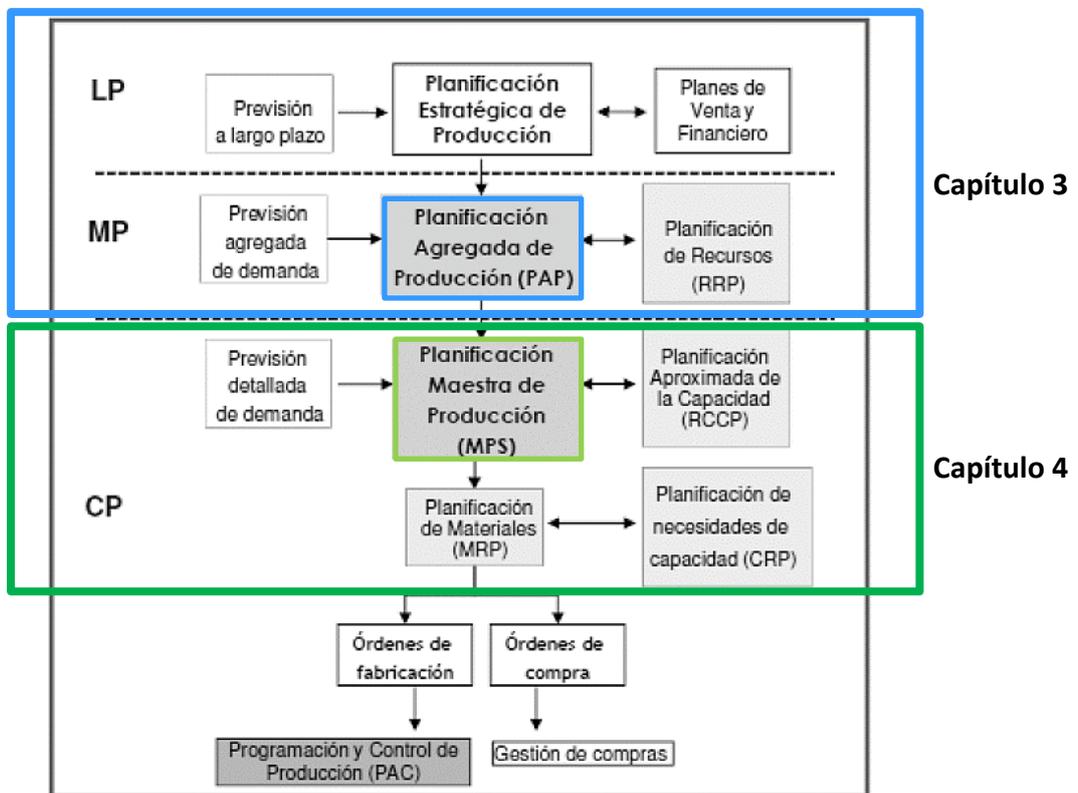


Ilustración 11. Esquema de un proceso de planificación global. Fuente: Berry et al (2000).

3.2. LA DEMANDA DEL PROYECTO L16.1

El hormigón está considerado como un producto perecedero debido a su reología limitada. Así, el periodo máximo entre su fabricación y su colocación oscila entre una hora y media y diez horas en general, aunque los hormigones considerados para este proyecto tienen las reologías de la tabla 6. Este valor se acordó entre Eiffage y BSM y EIME en función de las condiciones de colocación, los tiempos de transporte en Isla de Francia y el coste asociado a la formulación.

Tipo de hormigón	Reología del proyecto L16.1	Dosificación de retardador	Método de colocación
Estructura (GC)	2 h	0% (acción de retraso secundaria dada por los aditivos plastificantes)	Cubilote Bomba y conductos hasta 300 m de distancia
Pantallas (PM)	4 h – 6 h – 10 h (en función del volumen de la pantalla)	0,20% - 0,35% - 0,55%	Tubo-tremie Bomba
Relleno de túnel (RELL)	2 h – 3 h (en función de la distancia de bombeo)	0% - 0,45%	Bomba y conductos hasta 700 m de distancia

Tabla 7. Elementos sobre la reología y método de colocación de los tres tipos de hormigón del proyecto. Elaboración propia.

En consecuencia, no se pueden adelantar pedidos y almacenarlos, si no que estos deben ser entregados *Just-in-Time*. Los retrasos tampoco son aceptables ya que el hormigón inicialmente colocado podría empezar a fraguar, lo que atascaría los equipos de bombeo, y podría generar juntas frías y cavidades entre las capas puestas. Esto ocasionaría efectos negativos sobre la estanqueidad y estabilidad de la obra.

3.2.1. LA DEMANDA A LARGO PLAZO

En primer lugar, para la obtención de la demanda agregada, se concatenan las demandas individuales mensuales según la tipología de hormigón obra por obra. Estas cantidades las calculan los ingenieros y aparejadores a partir de los planos de concepción del proyecto. Cada equipo asocia dichos volúmenes al Plan General de Obra y así establece los consumos mensuales previstos.

Así, se obtienen varios ficheros de demanda, tres en el caso de este proyecto:

- Hormigón de Estructuras: 220 000 m³ de junio 2018 a febrero 2023
- Hormigón de Pantallas: 280 000 m³ de mayo 18 a julio 2020
- Hormigón de Relleno: 170 000 m³ de enero 2019 a septiembre 2022

En el caso del hormigón de relleno, la información de los ingenieros de 2018 se ha completado con las hipótesis de planificación actuales y notas técnicas para atribuir los volúmenes de los tramos de túnel entre los distintos puntos de aprovisionamiento. Para ello, los expertos de

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

planificación y producción de la zona TUN atribuyeron coeficientes aproximativos (marcados en rojo en la tabla 8) para repartir el volumen total del relleno entre las obras desde las que dicho hormigón será bombeado en la superficie.

Código	Obra	Volumen total (m3)	abr.-20	may.-20	jun.-20	jul.-20	ago.-20	sep.-20	oct.-20	nov.-20	dic.-20	ene.-21	feb.-21	mar.-21	abr.-21	may.-21	jun.-21	jul.-21	ago.-21	sep.-21	
RELLENO TUNEL																					
TBM 1		11 872		298	3501	3762	3591	720													
TBM 2a		18 970	1832	6087	4480	4844	1727														
TBM 2b		17 192																	315	3512	420
TBM 3		29 600					2470	8424	7303	6300	5103										
TBM 4a		3 082		2474	608																
TBM 4b		3 115																		1826	1289
TBM 5		24 360					4472	3402	2334	2380	3906	2052	2021	2868	925						
TBM 6		26 165							2225	7452	5642	4638	4107	2092	9						
Reparto del aprovisionamiento																					
TBM 1	SDP	0,3		89	1050	1129	1077	216													
TBM 1	3302P	0,7		209	2451	2633	2514	504													
TBM 2a	3300P	0,4	733	2435	1792	1938	691														
TBM 2a	3301P	0,4	733	2435	1792	1938	691														
TBM 2a	3303P	0,2	366	1217	896	969	345														
TBM 2b	3300P	0,3																	95	1054	126
TBM 2b	SDF	0,3																	95	1054	126
TBM 2b	6401P	0,4																	126	1405	168
TBM 3	3303P	0,2					494	1685	1461	1260	1021										
TBM 3	3401P	0,3					741	2527	2191	1890	1531										
TBM 3	LCO	0,3					741	2527	2191	1890	1531										
TBM 3	0100P	0,2					494	1685	1461	1260	1021										
TBM 4a	0100P	0,9		2227	547																
TBM 4a	0101P	0,1		247	61																
TBM 4b	0100P	0,1																		183	129
TBM 4b	0101P	0,9																		1643	1160
TBM 5	0100P	0,1					447	340	233	238	391	205	202	287	93						
TBM 5	0102P	0,5					2236	1701	1167	1190	1953	1026	1011	1434	463						
TBM 5	0104P	0,4					1789	1361	934	952	1562	821	808	1147	370						
TBM 6	0104P	0,3							668	2236	1693	1391	1232	628	3						
TBM 6	LBM	0,2							445	1490	1128	928	821	418	2						
TBM 6	0210P	0,2							445	1490	1128	928	821	418	2						
TBM 6	0220P	0,3							668	2236	1693	1391	1232	628	3						

Tabla 8. Reparto entre las obras de aprovisionamiento del volumen de hormigón a colocar en los tramos de túnel. Elaboración propia.

Al fin se tiene la hoja *Demanda Total* en el fichero *Input.xlsx*, que concatenará todos los anteriores. En la tabla 9 se muestra un extracto del procedimiento de construcción, cuyo contenido íntegro está disponible en el anexo 1.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Detalle hormigón GC			Detalle hormigón PM			Detalle hormigón RELL			Demanda PROYECTO		
Código	Obra	Volumen total (m3)	Código	Obra	Volumen total (m3)	Código	Obra	Volumen total (m3)	Código	Obra	Volumen total (m3)
O1	SDP	60 153	O1	SDP	49 225	O1	SDP	8 590	O1	SDP	117 968
O2	SDF	10 579	O2	SDF	31 692	O2	SDF	5 158	O2	SDF	47 429
O3	LCO	12 765	O3	LCO	10 055	O3	LCO	11 058	O3	LCO	33 878
O4	LBG	21 073	O4	LBG	27 562	O4	LBG	2 433	O4	LBG	51 068
O5	LBM	9 086	O5	LBM	9 666	O5	LBM	5 746	O5	LBM	24 498
O6	6301P	2 166	O6	6301P	4 384	O6	6301P	0	O6	6301P	6 550
O7	6302P	440	O7	6302P	0	O7	6302P	485	O7	6302P	925
O8	6401P	1 919	O8	6401P	10 860	O8	6401P	6 877	O8	6401P	19 656
O9	3300P	19 176	O9	3300P	23 997	O9	3300P	16 167	O9	3300P	59 340
O10	3301P	1 331	O10	3301P	2 932	O10	3301P	7 608	O10	3301P	11 871
O11	3302P	11 478	O11	3302P	13 591	O11	3302P	8 310	O11	3302P	33 379
O12	3303P	4 356	O12	3303P	7 634	O12	3303P	11 023	O12	3303P	23 013
O13	3304P	3 003	O13	3304P	3 448	O13	3304P	1 450	O13	3304P	7 901
O14	3401P	963	O14	3401P	2 369	O14	3401P	9 140	O14	3401P	12 472
O15	3402P	2 270	O15	3402P	4 593	O15	3402P	406	O15	3402P	7 269
O16	3403P	2 135	O16	3403P	2 803	O16	3403P	362	O16	3403P	5 300
O17	0100P	27 541	O17	0100P	32 017	O17	0100P	17 018	O17	0100P	76 576
O18	0101P	14 808	O18	0101P	24 506	O18	0101P	5 173	O18	0101P	44 487
O19	0102P	635	O19	0102P	1 669	O19	0102P	12 435	O19	0102P	14 739
O20	0103P	1 159	O20	0103P	1 657	O20	0103P	305	O20	0103P	3 121
O21	0104P	4 558	O21	0104P	4 538	O21	0104P	18 105	O21	0104P	27 201
O22	0201P	1 742	O22	0201P	2 174	O22	0201P	355	O22	0201P	4 271
O23	0210P	909	O23	0210P	1 942	O23	0210P	5 800	O23	0210P	8 651
O24	0220P	8 834	O24	0220P	6 655	O24	0220P	12 517	O24	0220P	28 006
	TOTAL GC	223 079		TOTAL PM	279 969		TOTAL RELL	166 519		TOTAL	669 567

Tabla 9. Necesidades de hormigón según la tipología y procedimiento de obtención de la demanda total. Elaboración propia.

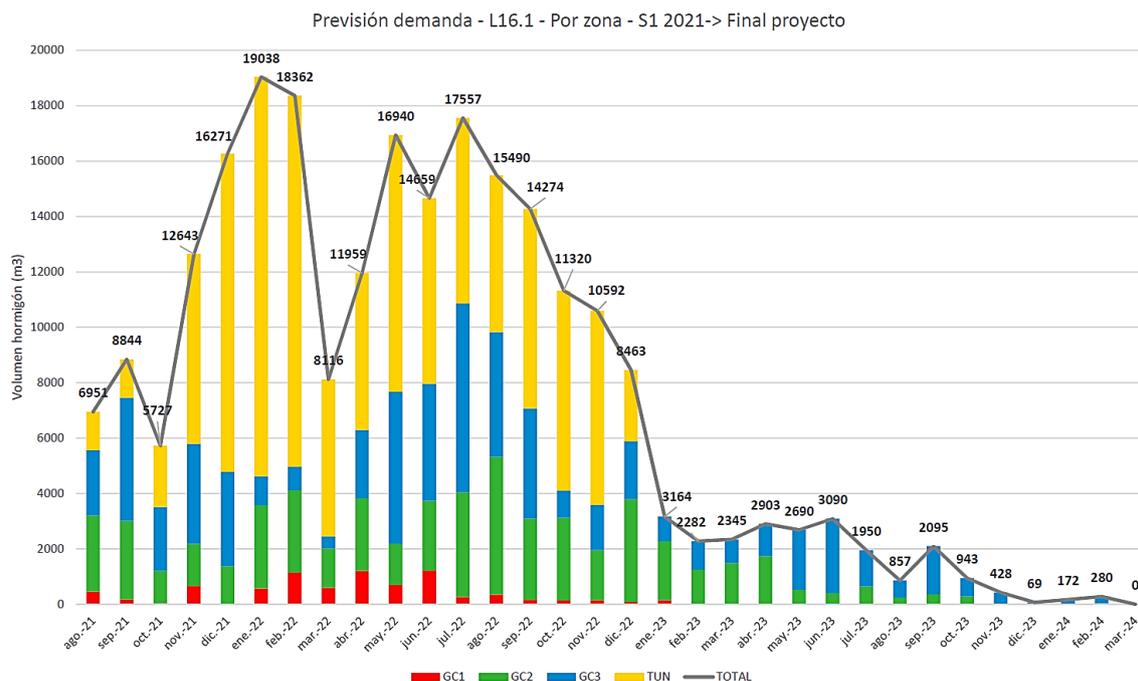
Es esta hoja *Demanda Total* la que servirá de referencia para el plan de ventas y financiero de los proveedores y para la repartición de los volúmenes entre las centrales de fabricación. Según la evolución de las necesidades, se adaptará la infraestructura material, de centrales y camiones, a disposición para satisfacer la demanda. Esta combinación de volumen de fabricación y medios de fabricación es la que se reflejará en los contratos de prestación de servicio, cuya firma tuvo lugar en mayo de 2018.

Asimismo, al tratarse de dos proveedores distintos, se acordó una repartición de los volúmenes totales de 71,5% para BSM y de 28,5% para EIME. Estos coeficientes se establecieron por intereses financieros de Eiffage a largo plazo, que primaron sobre otras consideraciones logísticas o de reducción de distancias y emisiones de CO₂.

3.2.2. LA DEMANDA A MEDIO PLAZO

Esas previsiones se incluirán en el Plan General de Obra en *Primavera* para medir el avance del consumo de los recursos. A partir de dichas previsiones a largo plazo, se irán confirmando las necesidades reales a medida que avanza el proyecto y en coherencia con el Plan de avance de esta para cada obra. Por ello, cada seis meses se generará una Previsión de Demanda con valores más fiables y una mejor consideración de las capacidades de fabricación de las centrales. En ocasiones, junto a la demanda de los proveedores de hormigón, se podrán incluir las necesidades desde la fecha del análisis hasta el final del proyecto (ver gráfica 6) para actualizar las previsiones a largo plazo en caso de grandes cambios en la planificación general o en las hipótesis de secuenciación entre las tareas.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón



Gráfica 6. Previsión de la demanda de hormigón por zona desde agosto 2021. Elaboración propia.

El PAP se elaborará a partir de la información a seis meses proporcionada por el equipo de ingeniería de cada obra. El documento transmitido (ver descomposición de *MS Project* por elemento en la tabla 9 para la obra 3304P en el segundo semestre de 2020) contiene las fechas, volúmenes, tipo de hormigón a fabricar y elementos a realizar (plataformas, columnas, pantallas, relleno de túnel...).

	Nombre de la tarea	Inicio	Fin	Duración	Cantidad	Nombre recurso
3304P	3304P	24/07/2018	19/01/2023	1092 j	0	
3304P	Cimentación grúa	12/06/2020	07/07/2020	18 j	40	Hormigon - GC[40 m3]
3304P	Hormigon propreté + MALT	29/05/2020	02/06/2020	2 j	40	Hormigon - Installation[40 m3]
3304P	Hormigonado	02/07/2020	02/07/2020	1 j	378	Hormigon - GC[378 m3]
3304P	Hormigonado	10/07/2020	10/07/2020	0,5 j	22,4	Hormigon - GC[22,4 m3]
3304P	Hormigonado	06/07/2020	06/07/2020	0,5 j	17	Hormigon - GC[17 m3]
3304P	Hormigonado	15/07/2020	15/07/2020	0,5 j	9	Hormigon - GC[9 m3]
3304P	Hormigonado	28/07/2020	28/07/2020	0,5 j	134	Hormigon - GC[134 m3]
3304P	Hormigonado	31/07/2020	31/07/2020	0,5 j	23	Hormigon - GC[23 m3]
3304P	Hormigonado	05/08/2020	05/08/2020	0,5 j	19	Hormigon - GC[19 m3]
3304P	Hormigonado	04/08/2020	04/08/2020	0,5 j	18	Hormigon - GC[18 m3]
3304P	Hormigonado	11/08/2020	11/08/2020	0,5 j	9	Hormigon - GC[9 m3]
3304P	Plataforma S4	13/08/2020	27/08/2020	10 j	116,5	Hormigon - GC[116,5 m3];Equipe Etai(4H);Etaiment[1 200 m3]
3304P	Muros	27/08/2020	10/09/2020	10 j	50	Hormigon - GC[50 m3];Armatures[5 to];Equipe Ferr (5H)
3304P	Plataforma S3	11/09/2020	25/09/2020	10 j	133	Hormigon - GC[133 m3];Armatures[15 to];Equipe Ferr (7H)
3304P	Muros	28/09/2020	12/10/2020	10 j	63	Hormigon - GC[63 m3];Armatures[6 to];Equipe Ferr (5H)
3304P	Plataforma S2	13/10/2020	26/10/2020	10 j	135	Hormigon - GC[135 m3];Armatures[15 to];Equipe Ferr (7H)
3304P	Muros	27/10/2020	09/11/2020	10 j	69	Hormigon - GC[69 m3];Armatures[7 to];Equipe Ferr (5H)
3304P	Hormigonado	18/11/2020	18/11/2020	0,5 j	40	Hormigon - GC[40 m3]
3304P	Muros	20/11/2020	11/12/2020	16 j	33	Hormigon - GC[33 m3];Armatures[3 to];Equipe Ferr (5H)

Tabla 10. Planificación semestral de la demanda de hormigón de una obra. Fuente: Zona GC2 de la L16.1.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

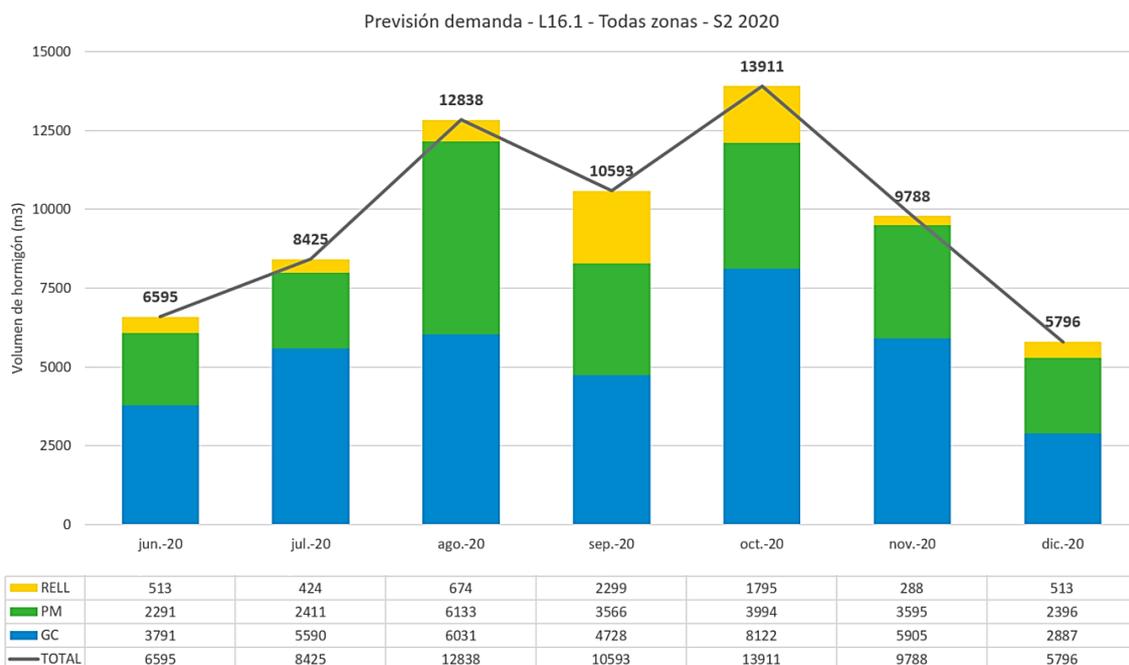
Los encargados de planificación de la zona concatenan esta descomposición para las obras de su zona y envían una síntesis para el semestre (en la tabla 11 extracción para la zona GC2 en el mismo periodo, ver fichero completo en anexo 2) al encargado de hormigón del proyecto. Es este segundo documento el que sirve de entrada para los primeros seis meses de la Previsión General.

En el caso en que las obras no puedan anticipar su consumo de materiales para el horizonte de planificación de seis meses, se completará la información transmitida (por ejemplo 3 meses) con las tareas previstas en *Primavera* para deducir el volumen restante en el semestre. Esta aproximación se hace con la última versión del Plan *Primavera*, que se actualiza mensualmente para evitar grandes diferencias en caso de producirse cambios en la secuenciación de las tareas.

EIFFAGE GC L16-1 ZONE GC2	GC2 - Planning hormigón 6 Meses - Junio - Diciembre 2020											
Meses	jun.-20				jul.-20				ago.-20			
Semanas	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
3304P												
Hormigón de limpieza	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hormigón de estructura	0	0	0	0	378	79	9	0	157	37	9	0
Hormigón de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal	40	-	-	-	378	79	9	-	157	37	9	-
LCO												
Hormigón de limpieza	0	0	83	0	0	0	0	28	0	0	0	0
Hormigón de estructura	0	0	0	120	155	204	264	0	69	0	0	317
Hormigón de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal	-	-	83	120	155	204	264	28	69	-	-	317
3401P												
Hormigón de limpieza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0
Hormigón de estructura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hormigón de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-	-
3402P												
Hormigón de limpieza	0	0	0	40	0	0	20	0	0	0	0	0
Hormigón de estructura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hormigón de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal	-	-	-	40	-	-	20	-	-	-	-	-
3403P												
Hormigón de limpieza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hormigón de estructura	0	62	20	0	0	60	21	0	60	0	21	0
Hormigón de relleno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal	-	62	20	-	-	60	21	-	60	-	21	-

Tabla 11. Extracto de la planificación semestral de la demanda de hormigón de la zona GC2. Fuente: Zona GC2 de la L16.1.

Al poner en común las previsiones semestrales de las diferentes zonas, se obtiene una versión extendida del fichero presentado en la tabla 11 para todas las obras. No obstante, esta información se trata posteriormente para ilustrarla en forma de gráficas simplificadas que se transmiten a los productores de hormigón para que anticipen sus necesidades de materias primas y camiones. Estas contienen el volumen total mensual a realizar según el tipo de hormigón, como se puede ver en la gráfica 7.



Gráfica 7. Demanda mensual del proyecto por tipo de hormigón. Elaboración propia.

3.2.3. LA DEMANDA A CORTO PLAZO

A una semana vista, las distintas obras confirman sus pedidos o bien directamente al encargado de hormigón del proyecto o bien a los encargados de cada una de las zonas que concatenan la información (véase proceso § 2.5).

Estas previsiones se envían antes del viernes a las 12:00 con el formato de la tabla 12 para la semana siguiente y deben contener como mínimo:

- Cliente y obra para la entrega (se dispone de una lista en común con los productores de hormigón donde se detallan las direcciones para cada obra y los contactos telefónicos) (tabla 12 – columnas C-D-E)
- Fecha y hora de inicio (llegada del primer camión a la obra) (tabla 12 – columnas A-B)
- Volumen que realizar (tabla 12 – columna J)
- Fórmula de hormigón deseada (a seleccionar entre una lista de 70 fórmulas disponibles para el proyecto. Salvo los hormigones no estructurales, la normativa francesa de Pliegos Técnicos Generales exige que todas las fórmulas sean validadas por medio de ensayos para usos de estructuras, pantallas y relleno de túnel (tabla 12 – columna F)
- Método de colocación (descritos en la tabla 6) y de manera opcional la cadencia deseada de llegada de camiones a la obra (tabla 12 – columna H)
- Opcionalmente se puede indicar el elemento a hormigonar para mejorar la trazabilidad del avance del plan con respecto al PMP semanal de las necesidades de hormigón (tabla 12 – columna G)

Será el encargado de hormigón del proyecto el que reagrupe las previsiones y genere el Plan Maestro de Producción (ver tabla 12) una vez realice la secuenciación de las tareas y asigne las unidades de producción a cada obra (tabla 12 – columnas K-I). Para ello, deberá contemplar la información del PAP y verificar que las asignaciones hechas son coherentes con las restricciones

del proyecto a medio y largo plazo. Cabe mencionar que, hoy en día, dichas atribuciones se realizan manualmente para satisfacer la demanda. Los recorridos más cortos posibles entre unidades de producción y centrales deberán prevalecer. Además, para respetar la repartición contractual del volumen 71,5%-28,5% entre los dos proveedores se hace un seguimiento de la repartición acumulada y en función de los valores recientes se compensa de hacia una u otra parte sin tener una visión global. Lo cual puede no ser interesante desde la perspectiva de costes ya que para compensar un ligero retraso se van a otorgar hormigonados muy lejanos a un proveedor cuando es posible que unos meses más tarde tenga un volumen equivalente para compensar ese retraso a una distancia mucho menor de sus unidades de producción.

No obstante, esta asignación manual, que se confirma con la difusión del Plan Diario, no integra en su repartición las hipótesis del PAP indicadas en el apartado 3.3.1 por lo que, si bien la demanda es satisfecha y se logra disponer de la capacidad suficiente, puede que el problema de abastecimiento de hormigón no esté bien resuelto. Además, esta visión cortoplacista no permite integrar *descansos* en la capacidad para hacer mantenimientos preventivos y reparar averías lo que puede forzar demasiado algunos mecanismos y desgastar más rápidamente las instalaciones que si se equilibra la demanda o se trabaja al 85%-90% de la capacidad máxima de cada central siempre y cuando la demanda lo permita.

3.3. DESARROLLO DEL MODELO DE PLANIFICACIÓN

En este capítulo se detalla la metodología empleada para resolver el problema inicial de planificación de la demanda, que se dará tanto en las fases de licitación como en la ejecución del proyecto. Para esto, se tomará como dato de partida la demanda agregada de hormigón de y el objetivo será estudiar si dicha demanda puede ser satisfecha a partir de las centrales de hormigón disponibles y bajo las condiciones técnicas y contractuales contraídas con el cliente, la SGP; y los proveedores, BSM y EIME.

Así, lo que se busca decidir cada mes es la cantidad de hormigón que cada central deberá fabricar para cada obra con el fin que se satisfagan las restricciones dadas. Se comenzará con un planteamiento matemático del problema y luego se utilizarán métodos informáticos para resolver el conjunto del problema.

A continuación, se va a proponer un modelo matemático sobre el que desarrollar la herramienta. Este problema ha sido abordado en el pasado por Albayrak et al (2016) pero no incluía la condición de reparto de la demanda entre las unidades de producción ni el análisis de escenarios con varias ubicaciones.

3.3.1. INTRODUCCIÓN

Se plantea el problema de optimización de la producción cuyo objetivo principal será minimizar la distancia recorrida por los camiones entre su fabricación y su entrega. Este problema puede subdividirse en problemas más pequeños dado que el cálculo se realiza individualmente para cada mes.

No obstante, al incorporar la repartición del contrato entre los dos proveedores, se debe incluir una condición transversa para la totalidad de los meses lo que impide la resolución del “mini problema” tantas veces como meses, que se podría resolver con el *Solver* de Excel. Para este nuevo escenario, será necesaria la programación del cálculo.

Se consideran las hipótesis:

- La cantidad de centrales de hormigón y su localización es fija para todo el proyecto
 - UP1: Obra SDP
 - UP2 y UP3: Obra 0100P
 - UP4: Obra 0220P
- Las obras tienen una localización fija, aunque se podrán incorporar nuevas obras
- La capacidad de producción mensual de las centrales es de 10 000 m³ (calculado a partir del capítulo § 2.3.3, y considerando 20 días trabajados y una amplitud de trabajo de 12h, si la central trabaja al 85% de su capacidad límite).
- El periodo de disponibilidad de las centrales es limitado, pero no se conoce con precisión ya que depende de la evolución de la demanda. Una vez desinstaladas, tendrán una capacidad 0. En el escenario inicial, se prevé que la central UP3 esté inactiva durante un par de años para fabricar mortero de relleno de hueco entre dovelas y terreno.
 - UP1: de junio 2018 a septiembre 2020 (28 meses) y opcional 3 meses suplementarios con un solo puesto (cadencia limitada a 5000 m³/mes)
 - UP2: de marzo 2018 a junio 2022 (52 meses)

- UP3: de abril 2018 a enero 2020 (22 meses)
- UP4: de julio 2018 a julio 2022 (49 meses)
- Las distancias son las dadas por *Google Maps* (véase tabla 4) y solo se contabiliza el trayecto de ida para la entrega. Si se deseara calcular la distancia real total, debería multiplicarse ese valor por dos y añadir los recorridos en el interior de obras y para operaciones auxiliares como el lavado de las cubas o el llenado de combustible.
- No existen restricciones de obras que solo puedan ser servidas por un proveedor
- La demanda se tiene que satisfacer cada mes única y exclusivamente por las centrales del proyecto (condición del Pliego Técnico – Libro 10). Si la demanda mensual es inferior a 5 000 m³, en las fases de preparación y finales del proyecto, se podrá satisfacer la demanda a partir de otras centrales *fijas* del proveedor BSM.
Para modelizar este caso de demanda y dado que las centrales fijas de BSM se encuentran a 700 metros de UP2, se le asignará a esta central una capacidad de producción ficticia hasta noviembre 2023 de 5 000 m³.
- El coste unitario del metro cúbico de hormigón para toda la duración del proyecto es común para los dos proveedores e independiente de la distancia real recorrida por los camiones (aunque calculado a partir de la distancia media). El coste de las instalaciones y obras requeridas para la instalación está a cargo de Eiffage.
- El volumen unitario transportado por cada camión es de 7,5 m³, en relación con el peso máximo autorizado del remolque. En la realidad, algunos camiones pueden transportar un volumen inferior si son destinados a pequeños elementos como vigas o columnas o si son el complemento (ultimo camión) de un hormigonado más grande. Dado que el volumen medio transportado por camión desde el principio del proyecto es algo superior a 7 m³, se ha considerado el volumen estándar de 7,5 m³ para la carga del camión.

3.3.2. MODELO MATEMÁTICO

3.3.2.1. Índices

- m: mes de avance del proyecto (1=marzo 2018, 2, ..., 69=noviembre 2023)
- o: obra (O1, O2, ..., O24)
- up: unidad de producción de hormigón (UP1, UP2, UP3, UP4)

3.3.2.2. Parámetros

- β_{up} : porcentaje de la producción que debe fabricar cada up. Vale 0,285 para UP4 y no tiene un valor exigido para las otras unidades de producción.
- $D_{up,i}$: distancia en km de la central up a la obra i (detalladas en la tabla 4)
- $K_{up,m}$: capacidad de producción de la central up en el mes m
- $H_{i,m}$: demanda de hormigón de la obra i en el mes m (volumen en metros cúbicos)

3.3.2.3. Variables

- $P_{up,i,m}$: producción de la central up para la obra i en el mes m (volumen en metros cúbicos)
- $\alpha_{up,i,m}$: coeficiente producción de la central up para la obra i en el mes m (0,1)

3.3.2.4. Función objetivo

Se busca minimizar la distancia total recorrida para la entrega del hormigón. Para calcular el kilometraje a efectuar, se hará la suma producto mensual entre la matriz de distancias de la tabla 4 (dcha.) y la matriz de producción, a la derecha en la tabla 14. Si bien no afecta al proceso de optimización, se ha dividido la expresión por 7,5 m³ para obtener la distancia real recorrida, empleada como criterio de decisión en el capítulo 4.

$$\min \left(\sum_m D_{up,i} \cdot P_{up,i,m} \right) / 7,5$$

Ecuación 3. Función objetivo que minimiza la distancia recorrida

3.3.2.5. Restricciones

Las variables de tipo coeficiente de producción o de asignación de centrales a las obras son positivas y su valor es inferior a uno (representan un porcentaje).

$$\beta_{up} \geq 0 \text{ y } \beta_{up} \leq 1$$

$$\alpha_{up,i,m} \geq 0 \text{ y } \alpha_{up,i,m} \leq 1$$

Ecuación 4. Restricción sobre los valores de los coeficientes de asignación

La cantidad mensual fabricada por cada up está limitada por su capacidad.

$$\sum_i P_{up,i,m} \leq K_{up,m} \quad \forall up, m$$

Ecuación 5. Restricción sobre la capacidad de producción de una central

La central UP4 de EIME fabrica el 28,5% de la demanda.

$$\sum_i \sum_m P_{up,i,m} = B_{up} \cdot \sum_i \sum_m H_{i,m}, \quad up = 4$$

Ecuación 6. Restricción transversa sobre el volumen a producir por EIME con la central UP4

La producción de una obra se reparte entre las distintas unidades de producción. La suma de los coeficientes de asignación de centrales a una obra es 1.

$$\sum_{up} \alpha_{up,i,m} = 1$$

Ecuación 7. Restricción según la que el volumen de una obra se reparte entre las centrales

Se debe satisfacer toda la demanda, por lo que la producción mensual será equivalente al volumen demandado. En realidad, se podría considerar también la desigualdad en la que la producción es mayor que la demanda para contemplar los hormigones

rechazados por defectos de calidad y errores de pedido. Al no disponer de una cuantificación mensual del porcentaje que esto representa, se considerará únicamente el caso en el que el 100% de lo fabricado es colocado.

$$H_{i,m} = \sum_{up} P_{up,i,m} \quad \forall i, m$$

Ecuación 8. Restricción sobre la satisfacción de la demanda

3.3.3. RESOLUCIÓN SUBPROBLEMA

Se procede a explicar el procedimiento de resolución del problema de asignación de demanda para un solo mes (ej. julio de 2018) con el *Solver* de Excel. Para ello, y al tratarse de un problema de optimización por programación lineal, se seleccionará el método de resolución Simplex LP.

Se partirá de la demanda mensual para todas las obras del quinto mes del proyecto, $D_{i,5}$:

Demanda PROYECTO			
Código	OBRA	Volumen total (m3)	Jul-18
O1	SDP	117 968	5607
O2	SDF	47 429	0
O3	LCO	33 878	335
O4	LBG	51 068	3274
O5	LBM	24 498	0
O6	6301P	6 550	0
O7	6302P	925	0
O8	6401P	19 656	0
O9	3300P	59 340	0
O10	3301P	11 871	0
O11	3302P	33 379	4984
O12	3303P	23 013	3359
O13	3304P	7 901	0
O14	3401P	12 472	0
O15	3402P	7 269	2411
O16	3403P	5 300	0
O17	0100P	76 576	11759
O18	0101P	44 487	86
O19	0102P	14 739	0
O20	0103P	3 121	0
O21	0104P	27 201	0
O22	0201P	4 271	0
O23	0210P	8 651	0
O24	0220P	28 006	1782
	TOTAL	669 567	33597
			Jul-18

Tabla 13. Demanda global del proyecto en julio 2018. Elaboración propia.

Se tienen como datos auxiliares la capacidad mensual de las centrales de 10 000 m³/up, la tabla 4 de las distancias, y el coeficiente de reparto del 28,5%. Así, se busca resolver las dos matrices

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

de variables de la tabla 14. La variable principal en la optimización son los coeficientes de asignación de las centrales de la tabla izquierda. A partir de ellos, y efectuando la suma producto con la matriz de demanda, se obtendrá la tabla derecha que representa el volumen de producción de cada central a cada obra.

Se puede observar igualmente el volumen mensual total fabricado por cada unidad de producción y cómo la suma de este coincide con la demanda total de 33 597 m³. En la parte inferior derecha se ha representado el valor de la función a minimizar, es decir, la distancia recorrida por los camiones en el mes.

Para la condición de reparto de volúmenes, se ha añadido la restricción de la ecuación 5 con el coeficiente del 28,5% para el mes de julio.

julio-18					
A	UP1	UP2	UP3	UP4	EC
O1	1	0	0	0	1
O2	1	0	0	0	1
O3	0	0	0	1	1
O4	0	0	1	0	1
O5	1	0	0	0	1
O6	1	0	0	0	1
O7	1	0	0	0	1
O8	1	0	0	0	1
O9	1	0	0	0	1
O10	1	0	0	0	1
O11	0,881	0	0	0,119	1
O12	0	0	0	1	1
O13	1	0	0	0	1
O14	1	0	0	0	1
O15	0	0	0	1	1
O16	1	0	0	0	1
O17	0	0,85	0,064	0,086	1
O18	0	0	0	1	1
O19	0	0	0	1	1
O20	0	0	0	1	1
O21	0	0	0	1	1
O22	0	1	0	0	1
O23	0	0	1	0	1
O24	0	0	0	1	1
					33597

P	UP1	UP2	UP3	UP4	TC
O1	5607	0	0	0	5607
O2	0	0	0	0	0
O3	0	0	0	335	335
O4	0	0	3274	0	3274
O5	0	0	0	0	0
O6	0	0	0	0	0
O7	0	0	0	0	0
O8	0	0	0	0	0
O9	0	0	0	0	0
O10	0	0	0	0	0
O11	4393	0	0	591	4984
O12	0	0	0	3359	3359
O13	0	0	0	0	0
O14	0	0	0	0	0
O15	0	0	0	2411	2411
O16	0	0	0	0	0
O17	0	10000	747,9	1011	11759
O18	0	0	0	86	86
O19	0	0	0	0	0
O20	0	0	0	0	0
O21	0	0	0	0	0
O22	0	0	0	0	0
O23	0	0	0	0	0
O24	0	0	0	1782	1782
TP	10000	10000	4022	9575	33597
				9575	
				D	13345

Tabla 14. Resultado en Solver de los coeficientes de asignación de la demanda de las obras a las centrales de hormigón y producción por cada central de hormigón. Elaboración propia.

A continuación, se busca extender el ejemplo del cálculo del mes de julio 2018 a la integralidad de los 69 meses del proyecto. Sin embargo, las limitaciones de volumen de tratamiento de datos del Solver de Excel (200 variables y 100 restricciones) no permiten realizarlo. En concreto, cada mes se dispone de una matriz de 96 variables y de 5 restricciones, lo que, extrapolado a los 69 meses del proyecto implica un total de más de 6 500 variables y casi 350 restricciones.

Para poder resolver el problema de optimización lineal, se ha recurrido al programa informático Python para poder analizar el conjunto del problema. Se ha seleccionado este programa por ser de código abierto y porque se enseña en las escuelas de ingenieros en Francia, lo cual permite

garantizar la perennidad de la herramienta desarrollada y que el resto de los compañeros presentes y futuros de la empresa puedan trabajar con ella.

3.3.3.1. El entorno Python

La funcionalidad del programa es transformar los datos de entrada del usuario sobre la demanda de las obras y el entorno de producción (número de centrales disponibles, capacidad, localización de puntos en la red...) en un plan de trabajo con la cantidad de hormigón a fabricar por cada central para cada obra para todos los meses del proyecto. En complemento, se desea obtener la mínima distancia posible necesaria a recorrer por los camiones para realizar el proceso de abastecimiento.

Al tratarse de un problema de optimización, ha sido necesario importar el módulo *Pulp* para la modelización de problemas lineales. Como se utilizan matrices y vectores para importar/exportar datos y para los cálculos, también se han añadido las bibliotecas *Pandas* y *Numpy*. El código completo se puede consultar en el fichero *Optim.py* del anexo 3.

3.3.3.2. Datos de entrada

El usuario importará en Python los datos a partir del fichero *Input.xlsx* (ver anexo 1) que contiene:

- La distancia entre las centrales y las obras (ver tabla 4)
- La demanda mensual de las obras
- La capacidad y disponibilidad mensual de las centrales (ver § 3.3.1)
- Los coeficientes de reparto o de asignación impuestos por el problema (pueden ser globales para la producción total de una central o bien del tipo “una central realiza x% de los hormigonados de x obra”.

Además, en dicho fichero se encuentran otras pestañas utilizadas a lo largo de la memoria para desarrollar conceptos y calcular valores; como es el caso de:

- Procedimiento de cálculo y comparación de distancias entre puntos del trazado
- Transcripción de la demanda de hormigón de estructuras (GC), pantallas (PM) y relleno de túnel (RELL) y concatenación de los tres
- Trama de resolución del problema con el *Solver* de Excel para todo el proyecto y aplicación para el mes de julio 2018 (§ 3.3.3.)

3.3.3.3. Resultados obtenidos

Se obtendrá como salida el fichero *Resultats.xlsx* (ver anexo 4 – *Resultats-básico*). Este contiene cuatro hojas con:

- Los coeficientes de producción obra/central para todos los meses en la hoja *Coefficients_UP*
- El volumen de producción obra/central para todos los meses en la hoja *Repartition prod*
- La distancia recorrida por los camiones obra/central para todos los meses en la hoja *Distance camion*
- Una tabla resumen con los totales de producción y porcentajes en la hoja *Production totale par UP* en formato bruto y en la hoja *Tabla resumen* con el formato reorganizado para su inserción en esta memoria.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

En la tabla 15 se ha representado la tabla resumen, clasificando las obras de oeste a este (desde el punto de vista del trazado férreo). Se puede ver, como era de esperar, que los valores de producción se concentran en torno a la diagonal, lo que indica que se fabrica lo más cerca posible. No obstante, para la central más lejana del baricentro de la producción, UP4, se ve en la zona roja de datos cómo debe realizar una gran parte de su producción en zonas lejanas a su campo de acción. Esto es debido a la necesidad de respetar la condición transversal de reparto de la producción con el otro proveedor y es esta parte la que hace que no se pueda obtener la distancia mínima de abastecimiento de hormigón.

Además, para equilibrar la demanda mensual entre los proveedores, se añadió una condición extraoficial que se tiene en cuenta semanalmente en la planificación manual según la cual la central UP4 debe fabricar como mínimo el 20% de la demanda mensual.

Los puntos en naranja corresponden únicamente a las fechas extremas del proyecto, es decir cuando no todas las centrales están instaladas y se debe satisfacer la demanda.

OA	Total m3	Total %	UP1 - (m3)	UP1 - (%)	UP2 - (m3)	UP2 - (%)	UP3 - (m3)	UP3 - (%)	UP4 - (m3)	UP4 - (%)
3300P	59 340	8,86%	49 059	82,67%	9 997	16,85%	-	-	283	0,48%
6302P	925	0,14%	925	100,00%	-	-	-	-	-	-
SDP	117 968	17,62%	85 571	72,54%	32 397	27,46%	-	-	-	-
3301P	11 871	1,77%	11 871	100,00%	-	-	-	-	-	-
6301P	6 550	0,98%	5 100	77,86%	1 374	20,98%	-	-	76	1,16%
3302P	33 379	4,99%	21 718	65,06%	858	2,57%	3 398	10,18%	7 406	22,19%
SDF	47 429	7,08%	35 930	75,76%	156	0,33%	-	-	11 342	23,91%
6401P	19 656	2,94%	12 417	63,17%	7 068	35,96%	-	-	171	0,87%
3303P	23 013	3,44%	14 411	62,62%	827	3,59%	454	1,97%	7 321	31,81%
3304P	7 901	1,18%	4 645	58,80%	1 619	20,49%	781	9,88%	856	10,83%
LCO	33 878	5,06%	-	-	27 586	81,43%	1 376	4,06%	4 916	14,51%
3401P	12 472	1,86%	-	-	9 098	72,95%	499	4,00%	2 875	23,05%
3402P	7 269	1,09%	-	-	5 728	78,79%	312	4,29%	1 229	16,91%
3403P	5 300	0,79%	-	-	5 054	95,35%	71	1,34%	175	3,31%
0100P	76 576	11,44%	-	-	54 773	71,53%	19 669	25,68%	2 135	2,79%
LBG	51 068	7,63%	-	-	41 644	81,55%	7 677	15,03%	1 748	3,42%
0101P	44 487	6,64%	-	-	2 546	5,72%	-	-	41 941	94,28%
0102P	14 739	2,20%	-	-	459	3,11%	-	-	14 280	96,89%
0103P	3 121	0,47%	-	-	-	-	-	-	3 121	100,00%
0104P	27 201	4,06%	-	-	-	-	-	-	27 201	100,00%
LBM	24 498	3,66%	-	-	-	-	-	-	24 498	100,00%
0201P	4 271	0,64%	-	-	-	-	-	-	4 271	100,00%
0210P	8 651	1,29%	-	-	-	-	-	-	8 651	100,00%
0220P	28 006	4,18%	-	-	1 674	5,98%	-	-	26 332	94,02%
TOTAL	669 567	100,00%	241 648	36,09%	202 857	30,30%	34 236	5,11%	190 827	28,50%

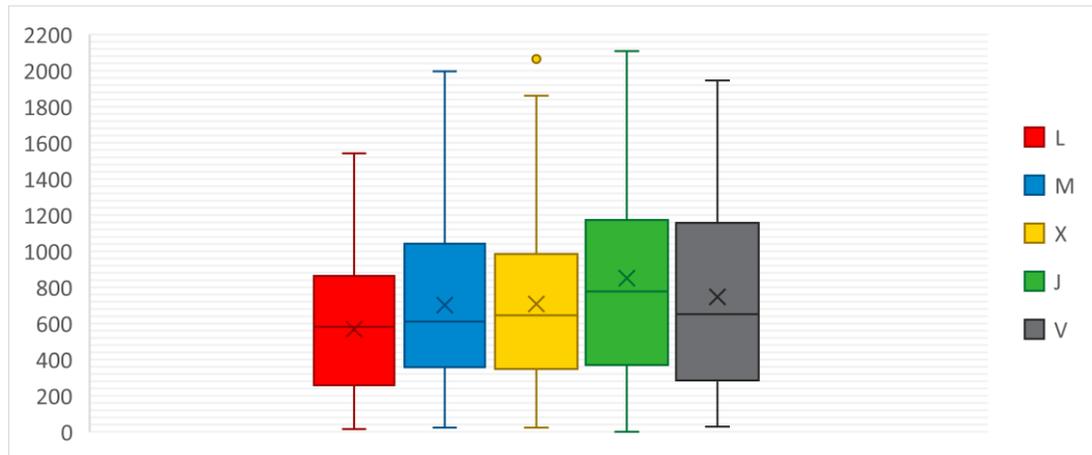
Tabla 15. Asignación de la producción entre las obras y las centrales. Elaboración propia

Con esto se obtiene que la distancia total recorrida por los camiones para la entrega de hormigón es de 289 000 km. Es decir, 0,435 km/m³ hormigón entregado o una media de 3,26 km por trayecto ida en comparación con la distancia media entre puntos del proyecto que es de 6,38 km, tal y como se describe en la tabla 4.

En la línea inferior de la tabla 15 se puede ver el porcentaje de repartición de la producción entre las distintas centrales, siendo UP1 la líder con un 36%. Dada su localización, UP4 realizará el volumen justo y necesario para cumplir la condición de reparto, y el volumen restante (35,41%) debería repartirse entre las centrales UP2 y UP3 situadas en la misma obra, una en frente de la otra. No obstante, al tener un desmontaje anticipado, la central UP3 está menos tiempo disponible. Se podría interpretar pues que UP3 no es necesaria para la satisfacción de la

demanda. Sin embargo, su rol es esencial para absorber los picos de demanda del proyecto ya que la repartición real de las necesidades de las obras no es lineal entre los veinte días hábiles del mes, sino que varía según las semanas y además las jornadas de trabajo suelen tener una mayor demanda por las mañanas.

Para ilustrar dicho desfase diario, se ha generado un diagrama de caja y bigotes con los volúmenes según el día de la semana basado en la producción de 65 semanas aleatorias del proyecto. En la gráfica 8 se ve cómo el lunes es el día de menor producción (en varias ocasiones las centrales han permanecido cerradas o realizado un volumen inferior a 100 m³), mientras que el jueves es el día con más operaciones (de media, 50% más que el lunes).



Gráfica 8. Diagrama de caja y bigotes con los volúmenes fabricados según el día de la semana. Elaboración propia.

Volviendo a la hipótesis de prescindir de la central UP3, y sabiendo que cuando está en funcionamiento, hay otras 3 centrales presentes, la capacidad máxima de producción es de 40 000 m³ mensuales, con una media diaria de 2 000 m³ para las 4 centrales. Si bien las centrales pueden ser operadas durante la noche o los fines de semana para aumentar la capacidad de fabricación, el horario de trabajo de las obras está limitado al intervalo 7:00 a 20:00 para reducir el impacto sonoro en el vecindario, lo que impide que se utilicen en mayor cantidad.

Además, de las 65 semanas de producción analizadas, 30 corresponden al periodo de funcionamiento de la central UP3. De los 150 días trabajados, 23 tuvieron una producción superior a 1 500 m³, es decir el 15%. Sería interesante para la empresa evaluar el impacto de producir el 15% del volumen de ese periodo con centrales fijas, que tienen un ligero sobrecoste, en comparación con evitar el gasto de la instalación de esa central.

En lo que respecta a la decisión de localización de las centrales, el emplazamiento del proveedor EIME en la parcela más alejada del proyecto, es una restricción asociada que va en contra de la minimización de las distancias de aprovisionamiento.

CAPÍTULO 4. ANALISIS DE DIFERENTES ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN

En este capítulo se van a analizar distintos escenarios de producción variando la decisión de localización de las centrales para intentar reducir la distancia total. En complemento, se estudiará el caso en el que no se contemple la condición transversal de producción. Es decir, en la que un mismo proveedor realizase todo el volumen o que no hubiese una condición de reparto; si bien esta segunda hipótesis suele ser incompatible con el modo de trabajo de una UTE.

4.1. ESCENARIO 1. SUPRESIÓN DE LA CONDICIÓN TRANSVERSAL

Si se reproduce el cálculo inicial eliminando el requisito del 28,5% de la producción realizado por EIME y conservando la localización y fechas de disponibilidad de las centrales, se obtiene la tabla 16, extraída del fichero *Resultats-sin reparto.xlsx* disponible en el anexo 4. En este caso se tiene una reducción de distancias del 40%; pasando de 289 000 km a 173 500 km.

Para su representación, se ha vuelto a reproducir el procedimiento de clasificación de la tabla 15 y se constata como se acentúa el principio de *diagonalidad* de los valores, ya que desaparece la zona roja necesaria en el pasado para cumplir con el reparto de los proveedores. Se mantienen algunos valores discordantes en naranja debido a las fechas de montaje y desmontaje de las centrales.

OA	Total m3	Total %	UP1 - (m3)	UP1 - (%)	UP2 - (m3)	UP2 - (%)	UP3 - (m3)	UP3 - (%)	UP4 - (m3)	UP4 - (%)
3300P	59 340	8,86%	58 959	99,36%	381	0,64%	-	-	-	-
6302P	925	0,14%	925	100,00%	-	-	-	-	-	-
SDP	117 968	17,62%	110 922	94,03%	7 046	5,97%	-	-	-	-
3301P	11 871	1,77%	11 871	100,00%	-	-	-	-	-	-
6301P	6 550	0,98%	6 091	92,99%	459	7,01%	-	-	-	-
3302P	33 379	4,99%	19 348	57,96%	5 877	17,61%	7 225	21,65%	929	2,78%
SDF	47 429	7,08%	47 429	100,00%	-	-	-	-	-	-
6401P	19 656	2,94%	19 294	98,16%	362	1,84%	-	-	-	-
3303P	23 013	3,44%	13 302	57,80%	4 322	18,78%	454	1,97%	4 935	21,44%
3304P	7 901	1,18%	5 235	66,26%	2 666	33,74%	-	-	-	-
LCO	33 878	5,06%	12 201	36,01%	16 935	49,99%	4 742	14,00%	-	-
3401P	12 472	1,86%	1 890	15,15%	10 582	84,85%	-	-	-	-
3402P	7 269	1,09%	-	-	7 269	100,00%	-	-	-	-
3403P	5 300	0,79%	-	-	5 300	100,00%	-	-	-	-
0100P	76 576	11,44%	-	-	53 959	70,46%	22 617	29,54%	-	-
LBG	51 068	7,63%	-	-	50 690	99,26%	378	0,74%	-	-
0101P	44 487	6,64%	241	0,54%	27 180	61,10%	16 980	38,17%	86	0,19%
0102P	14 739	2,20%	-	-	14 610	99,12%	129	0,88%	-	-
0103P	3 121	0,47%	-	-	2 991	95,83%	130	4,17%	-	-
0104P	27 201	4,06%	-	-	25 467	93,63%	199	0,73%	1 534	5,64%
LBM	24 498	3,66%	-	-	19 932	81,36%	409	1,67%	4 157	16,97%
0201P	4 271	0,64%	-	-	-	-	-	-	4 271	100,00%
0210P	8 651	1,29%	-	-	1 273	14,71%	-	-	7 378	85,29%
0220P	28 006	4,18%	-	-	2 800	10,00%	-	-	25 205	90,00%
TOTAL	669 567	100,00%	307 707	45,96%	260 101	38,85%	53 263	7,95%	48 496	7,24%

Tabla 16. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que no hay restricciones de reparto del volumen. Elaboración propia.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

En esta nueva asignación de centrales, se tiene que UP1 está fuertemente solicitada, con casi la mitad de la producción total. Es muy posible que estos valores no sean coherentes con el plan de trabajo diario ya que, en los días cargados, con una demanda en torno a 2 000 m³, una sola central no es capaz de suministrar 1 000 m³. Además, esta hipótesis desequilibra fuertemente el reparto entre la producción de las cuatro centrales y puede acrecentar el desgaste de las partes mecánicas de UP1. No obstante, dadas las capacidades de las centrales según los meses, es la solución óptima de la demanda a largo plazo si se busca reducir las distancias y así negociar con los proveedores una reducción del precio unitario de hormigón, del cual un 15% se debe a gastos de transporte.

4.2. ESCENARIO 2. INVERSIÓN UBICACIONES UP1 Y UP4

A continuación, se van a estudiar varias hipótesis modificando el emplazamiento de las centrales existentes. Para el primer caso, se va a invertir la ubicación de UP4 con la de UP1. Así, el proveedor EIME que tiene la condición de reparto limitante estará situado en la zona de mayor demanda y la tercera central de BSM estará en la obra 0220P. Se podrá recurrir a ella como apoyo en caso de sobrecarga o avería de las otras unidades. Cada central conserva igualmente sus fechas de disponibilidad para el análisis, aunque puede que esto no sea compatible con la realidad del proyecto ya que la fecha de desmontaje está determinada en base a las necesidades de la parcela en que se encuentra.

La nueva solución del sistema está recogida en el fichero *Resultats-cambio UP4-UP1.xlsx* consultable en el anexo 4. En la tabla 17 se tiene la asignación de la producción que determina una distancia a recorrer de 220 000 km, valor entre los dos calculados previamente y que permite reducir la distancia en un 24% con respecto a la proposición inicial en la que el proveedor EIME se situaba en la obra 0220P (más al este).

OA	Total m3	Total %	UP1 - (m3)	UP1 - (%)	UP2 - (m3)	UP2 - (%)	UP3 - (m3)	UP3 - (%)	UP4 - (m3)	UP4 - (%)
3300P	59 340	8,86%	47 356	79,81%	11 983	20,19%	-	-	-	-
6302P	925	0,14%	513	55,46%	412	44,54%	-	-	-	-
SDP	117 968	17,62%	110 922	94,03%	7 046	5,97%	-	-	-	-
3301P	11 871	1,77%	1 881	15,84%	9 751	82,15%	239	2,01%	-	-
6301P	6 550	0,98%	821	12,54%	3 505	53,51%	2 224	33,95%	-	-
3302P	33 379	4,99%	7 434	22,27%	20 111	60,25%	4 906	14,70%	929	2,78%
SDF	47 429	7,08%	8 340	17,58%	39 089	82,42%	-	-	-	-
6401P	19 656	2,94%	-	-	15 355	78,12%	4 300	21,88%	-	-
3303P	23 013	3,44%	6 717	29,19%	8 870	38,54%	2 491	10,82%	4 935	21,44%
3304P	7 901	1,18%	-	-	6 264	79,28%	1 637	20,72%	-	-
LCO	33 878	5,06%	4 712	13,91%	17 586	51,91%	11 579	34,18%	-	-
3401P	12 472	1,86%	1 890	15,15%	9 897	79,35%	685	5,49%	-	-
3402P	7 269	1,09%	-	-	4 065	55,92%	3 204	44,08%	-	-
3403P	5 300	0,79%	-	-	5 300	100,00%	-	-	-	-
0100P	76 576	11,44%	-	-	59 497	77,70%	17 079	22,30%	-	-
LBG	51 068	7,63%	-	-	35 720	69,95%	15 348	30,05%	-	-
0101P	44 487	6,64%	241	0,54%	30 803	69,24%	12 147	27,30%	1 296	2,91%
0102P	14 739	2,20%	-	-	9 554	64,82%	81	0,55%	5 104	34,63%
0103P	3 121	0,47%	-	-	1 994	63,89%	1 127	36,11%	-	-
0104P	27 201	4,06%	-	-	18 402	67,65%	3 356	12,34%	5 442	20,01%
LBM	24 498	3,66%	-	-	19 655	80,23%	409	1,67%	4 434	18,10%
0201P	4 271	0,64%	-	-	-	-	-	-	4 271	100,00%
0210P	8 651	1,29%	-	-	1 273	14,71%	-	-	7 378	85,29%
0220P	28 006	4,18%	-	-	2 800	10,00%	-	-	25 205	90,00%
TOTAL	669 567	100,00%	190 827	28,50%	338 932	50,62%	80 813	12,07%	58 995	8,81%

Tabla 17. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra SDP y realiza el 28,5% de la producción global. Elaboración propia.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

En esta segunda optimización, la producción está concentrada en el sector central, ya que los volúmenes a realizar por las obras 3300P, 6302P y SDP representan el 26,5% del volumen global, por lo que la parte de UP1 con EIME queda prácticamente cubierta. De nuevo, se tiene una sobreutilización de la central UP2, si bien una ligera parte se podría ceder a la central UP3.

En el caso ideal en el que la producción de hormigón de la central UP3 no debiese ser interrumpida a principios de 2020 para la producción del mortero de las tres tuneladoras que inician su excavación desde la obra 0100P, se podría equilibrar entre las dos la producción de UP2. Así, ambas tendrían una parte en torno al 30% y se podría dejar la central UP4 para apoyo puntual en las épocas de sobrecarga.

4.3. ESCENARIO 3. UBICACIÓN DEL PROVEEDOR EIME EN LA OBRA 6401P

En este segundo caso de modificación de las ubicaciones de las unidades de producción, se propone situar al proveedor EIME en la obra 6401P, en vez de en el 0220P. Este emplazamiento había sido descartado en el proceso de decisión inicial que se refleja en la tabla 1 debido a la necesidad de disponer de la parcela para la central de mortero del lanzamiento de la tuneladora 2b.

Sin embargo, con el retraso del proyecto, este lanzamiento se pospuso de octubre 2021 a junio 2022, por lo que la parcela disponible era mayor que la inicialmente descrita ya que las instalaciones de las empresas de muros pantallas habían sido retiradas. Esto permitía la coexistencia de la central de mortero con la de hormigón durante los meses hasta el desmontaje de UP4 previsto para julio 2022.

Para poder plantear esta nueva situación se ha tenido que repetir el cálculo de la tabla 4 para la última columna reemplazando la ubicación de UP4 por la obra 6401P. Se ha obtenido la tabla 18 en la que las distancias medias por ambos métodos son inferiores a las de la tabla 4.

Distancias (km) - Fórmula semiverseno					Distancias ruta real (km) - Google Maps				
Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4	Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4
O1-SDP	0,12	5,17	5,17	1,61	O1-SDP	0,0	6,8	6,8	2,9
O2-SDF	1,38	3,95	3,95	0,36	O2-SDF	2,1	5,2	5,2	1,1
O3-LCO	3,22	2,15	2,15	1,68	O3-LCO	4,1	2,7	2,7	2,9
O4-LBG	5,82	0,55	0,55	4,13	O4-LBG	7,3	0,5	0,5	5,9
O5-LBM	9,12	3,90	3,90	7,46	O5-LBM	11,6	5,7	5,7	9,7
O6-6301P	0,61	4,75	4,75	1,16	O6-6301P	1,3	5,6	5,6	2,0
O7-6302P	0,39	5,66	5,66	2,10	O7-6302P	0,5	7,1	7,1	3,2
O8-6401P	1,72	3,58	3,58	0,00	O8-6401P	3,0	4,7	4,7	0,0
O9-3300P	0,58	5,76	5,76	2,27	O9-3300P	0,6	7,3	7,3	3,6
O10-3301P	0,52	4,76	4,76	1,20	O10-3301P	1,5	5,4	5,4	1,9
O11-3302P	1,17	4,13	4,13	0,56	O11-3302P	2,1	4,8	4,8	1,3
O12-3303P	1,82	3,45	3,45	0,29	O12-3303P	3,7	4,4	4,4	2,3
O13-3304P	2,36	2,94	2,94	0,86	O13-3304P	3,4	3,5	3,5	2,5
O14-3401P	3,91	1,47	1,47	2,31	O14-3401P	5,1	2,2	2,2	3,8
O15-3402P	4,28	1,03	1,03	2,62	O15-3402P	5,7	2,1	2,1	4,0
O16-3403P	5,05	0,23	0,23	3,36	O16-3403P	6,7	0,2	0,2	5,3
O17-0100P	5,27	0,00	0,00	3,58	O17-0100P	6,8	0,1	0,1	5,4
O18-0101P	6,59	1,32	1,32	4,91	O18-0101P	8,1	2,9	2,9	6,3
O19-0102P	7,20	1,94	1,94	5,52	O19-0102P	10,0	3,7	3,7	7,1
O20-0103P	7,95	2,71	2,71	6,29	O20-0103P	10,2	4,9	4,9	8,2
O21-0104P	8,46	3,24	3,24	6,81	O21-0104P	10,7	5,1	5,1	9,1
O22-0201P	9,94	4,74	4,74	8,29	O22-0201P	14,5	8,2	8,2	12,8
O23-0210P	10,76	5,62	5,62	9,14	O23-0210P	13,5	8,3	8,3	12,3
O24-0220P	10,67	5,63	5,63	9,09	O24-0220P	13,8	8,5	8,5	12,8
D Media		3,67			D media		5,10		

Tabla 18. Distancias de Haversine (izda.) y GPS (dcha.) entre las obras y las centrales de hormigón con UP4 situada en el 6401P. Elaboración propia.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Sin embargo, comparando ambos métodos para las dos hipótesis de emplazamiento se obtiene casi el mismo porcentaje de desviación. Ahora es del 53% como se puede ver en la tabla 19 mientras que en el caso inicial era del 56% (véase tabla 5).

Comparación de métodos de cálculo de la distancia				
Distancia	UP1	UP2	UP3	UP4
O1-SDP	0%	31%	31%	80%
O2-SDF	53%	31%	31%	203%
O3-LCO	27%	23%	23%	72%
O4-LBG	25%	-9%	-9%	42%
O5-LBM	27%	45%	45%	30%
O6-6301P	114%	17%	17%	72%
O7-6302P	16%	25%	25%	53%
O8-6401P	74%	30%	30%	0%
O9-3300P	3%	26%	26%	59%
O10-3301P	188%	12%	12%	58%
O11-3302P	79%	15%	15%	134%
O12-3303P	103%	26%	26%	690%
O13-3304P	44%	17%	17%	191%
O14-3401P	30%	46%	46%	64%
O15-3402P	33%	100%	100%	52%
O16-3403P	32%	0%	0%	56%
O17-0100P	28%	0%	0%	49%
O18-0101P	23%	115%	115%	28%
O19-0102P	39%	89%	89%	29%
O20-0103P	28%	79%	79%	30%
O21-0104P	26%	56%	56%	34%
O22-0201P	46%	72%	72%	54%
O23-0210P	25%	47%	47%	35%
O24-0220P	29%	50%	50%	0%
Media	46%	39%	39%	88%
Media total	53%			

Tabla 19. Comparación de las distancias de Haversine y Google con UP4 en el 6401P. Elaboración propia.

El resultado de la simulación se encuentra en el fichero *Resultats-cambio UP4-6401P.xlsx* del anexo 4. La tabla resumen asociada con las asignaciones de volúmenes se lee en la tabla 20 y propone un mejor equilibrio entre la producción de las distintas centrales.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

OA	Total m3	Total %	UP1 - (m3)	UP1 - (%)	UP4 - (m3)	UP4 - (%)	UP2 - (m3)	UP2 - (%)	UP3 - (m3)	UP3 - (%)
3300P	59 340	8,86%	49 059	82,67%	9 900	16,68%	381	0,64%	-	-
6302P	925	0,14%	925	100,00%	-	-	-	-	-	-
SDP	117 968	17,62%	74 050	62,77%	37 521	31,81%	6 397	5,42%	-	-
3301P	11 871	1,77%	8 739	73,61%	3 132	26,39%	-	-	-	-
6301P	6 550	0,98%	3 055	46,65%	3 495	53,35%	-	-	-	-
3302P	33 379	4,99%	14 288	42,81%	15 585	46,69%	108	0,32%	3 398	10,18%
SDF	47 429	7,08%	8 359	17,62%	39 070	82,38%	-	-	-	-
6401P	19 656	2,94%	-	-	19 656	100,00%	-	-	-	-
3303P	23 013	3,44%	3 206	13,93%	18 923	82,23%	827	3,59%	57	0,25%
3304P	7 901	1,18%	4 335	54,87%	3 566	45,13%	-	-	-	-
LCO	33 878	5,06%	-	-	23 440	69,19%	9 561	28,22%	877	2,59%
3401P	12 472	1,86%	-	-	5 923	47,49%	5 864	47,02%	685	5,49%
3402P	7 269	1,09%	-	-	399	5,49%	6 619	91,06%	251	3,45%
3403P	5 300	0,79%	-	-	-	-	5 300	100,00%	-	-
0100P	76 576	11,44%	-	-	-	-	54 138	70,70%	22 438	29,30%
LBG	51 068	7,63%	-	-	-	-	39 605	77,55%	11 463	22,45%
0101P	44 487	6,64%	-	-	1 528	3,43%	31 609	71,05%	11 350	25,51%
0102P	14 739	2,20%	-	-	4 830	32,77%	9 901	67,17%	8	0,05%
0103P	3 121	0,47%	-	-	-	-	2 158	69,14%	963	30,86%
0104P	27 201	4,06%	-	-	3 861	14,19%	19 865	73,03%	3 475	12,78%
LBM	24 498	3,66%	-	-	-	-	24 089	98,33%	409	1,67%
0201P	4 271	0,64%	-	-	-	-	3 724	87,19%	547	12,81%
0210P	8 651	1,29%	744	8,60%	-	-	7 769	89,80%	138	1,60%
0220P	28 006	4,18%	-	-	-	-	28 006	100,00%	-	-
TOTAL	669 567	100,00%	166 761	24,91%	190 827	28,50%	255 920	38,22%	56 059	8,37%

Tabla 20. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra 6401P. Elaboración propia.

Con esta repartición se tiene un recorrido total de 200 000 km para garantizar el aprovisionamiento de hormigón, un 31% menor que en el escenario inicial y un 9% inferior a la distancia del escenario 2.

De nuevo vuelve a aparecer una sección roja de valores a efectuar por UP4 que corresponden al último trimestre del 2020 en el que la central UP3 se ha desmontado, la central UP1 trabaja a un solo puesto y la central UP2 trabaja al límite de su capacidad de 10 000 m3 para satisfacer la elevada demanda de la zona GC2.

4.4. ESCENARIO 4. UBICACIÓN DEL PROVEEDOR EIME EN LA OBRA 6401P Y MODIFICACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE UP1

Por último, para intentar acercarse al máximo a la distancia mínima en condiciones reales de disponibilidad de parcelas, se ha creado un cuarto escenario que combina elementos del segundo y del tercero.

Estas condiciones se representan en la tabla 21, extraída del fichero *Resultats-cambio UP4-6401P y disponibilidad.xlsx* (véase anexo 4) y conlleva el posicionamiento de EIME en la obra 6401P y la inversión entre UP2 y UP4 de las fechas de disponibilidad a partir de julio de 2022. Es decir, la central UP2 del 0100P se desmontará en junio de 2022 y UP4 se mantendrá en activo con un turno de trabajo hasta noviembre de 2023.

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

OA	Total m3	Total %	UP1 - (m3)	UP1 - (%)	UP4 - (m3)	UP4 - (%)	UP2 - (m3)	UP2 - (%)	UP3 - (m3)	UP3 - (%)
3300P	59 340	8,86%	50 333	84,82%	9 007	15,18%	-	-	-	-
6302P	925	0,14%	925	100,00%	-	-	-	-	-	-
SDP	117 968	17,62%	89 894	76,20%	28 073	23,80%	-	-	-	-
3301P	11 871	1,77%	8 739	73,61%	3 132	26,39%	-	-	-	-
6301P	6 550	0,98%	3 055	46,65%	3 495	53,35%	-	-	-	-
3302P	33 379	4,99%	14 288	42,81%	15 693	47,01%	-	-	3 398	10,18%
SDF	47 429	7,08%	1 413	2,98%	46 016	97,02%	-	-	-	-
6401P	19 656	2,94%	-	-	19 656	100,00%	-	-	-	-
3303P	23 013	3,44%	3 206	13,93%	19 750	85,82%	-	-	57	0,25%
3304P	7 901	1,18%	4 335	54,87%	3 566	45,13%	-	-	-	-
LCO	33 878	5,06%	-	-	24 913	73,54%	8 088	23,88%	877	2,59%
3401P	12 472	1,86%	-	-	5 923	47,49%	4 457	35,74%	2 092	16,77%
3402P	7 269	1,09%	-	-	399	5,49%	6 644	91,40%	226	3,11%
3403P	5 300	0,79%	-	-	-	-	5 300	100,00%	-	-
0100P	76 576	11,44%	-	-	524	0,68%	53 614	70,01%	22 438	29,30%
LBG	51 068	7,63%	-	-	-	-	39 605	77,55%	11 463	22,45%
0101P	44 487	6,64%	-	-	1 991	4,47%	31 146	70,01%	11 350	25,51%
0102P	14 739	2,20%	-	-	4 830	32,77%	9 828	66,68%	81	0,55%
0103P	3 121	0,47%	-	-	-	-	1 864	59,72%	1 257	40,28%
0104P	27 201	4,06%	-	-	3 861	14,19%	19 865	73,03%	3 475	12,78%
LBM	24 498	3,66%	-	-	-	-	24 089	98,33%	409	1,67%
0201P	4 271	0,64%	-	-	-	-	3 411	79,86%	860	20,14%
0210P	8 651	1,29%	744	8,60%	-	-	7 769	89,80%	138	1,60%
0220P	28 006	4,18%	-	-	-	-	28 006	100,00%	-	-
TOTAL	669 567	100,00%	176 933	26,43%	190 827	28,50%	243 686	36,39%	58 121	8,68%

Tabla 21. Asignación de la producción entre las obras y las centrales considerando que el proveedor EIME está en la obra 6401P y con nuevas fechas de disponibilidad de las centrales. Elaboración propia.

De esta forma se obtiene una distancia total de 189 000 km, la menor distancia factible encontrada con los cinco escenarios y que dista en 15 000 km de la distancia óptima del escenario 1.

4.5. COMPARATIVA DE LOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN

A modo de resumen se han recogido en la tabla 22 los principales datos correspondientes a cada uno de los escenarios estudiados. Sobre ella se han indicado en negrita los parámetros que han sido modificados con respecto al escenario inicial y se han aportado comentarios.

Cabe destacar la última columna, sobre la cual no hay indicaciones previas y que refleja la viabilidad, según el ritmo real de avance del proyecto, de haber implementado dicha variante.

Localización centrales	Distancia por recorrer (km)	Respeto reparto producción	Equilibrio entre centrales	Respeto disponibilidad parcelas	Factible
Escenario inicial					
UP1-SDP UP2-0100P UP3-0100P UP4-0220P	289 000	Sí UP1 - 36,09% UP2 - 30,30% UP3 - 5,11% UP4 - 28,50%	No Baja producción UP3	Sí UP1: 06/18 - 12/20 UP2: 03/18 - 11/23 UP3: 04/18 - 01/20 UP4: 07/18 - 07/22	Sí
Variante 1. Supresión de la condición transversal					
UP1-SDP	173 500	No UP1 - 45,96%	No	Sí UP1: 06/18 - 12/20	No

UP2-0100P UP3-0100P UP4-0220P	↓40%	UP2 - 38,85% UP3 - 7,95% UP4 - 7,24%	Sobrecarga UP1 y falta balance UP2/3	UP2: 03/18 - 11/23 UP3: 04/18 - 01/20 UP4: 07/18 - 07/22	Respeto reparto
Variante 2. Inversión localización UP1 y UP4					
UP4-SDP UP2-0100P UP3-0100P UP1-0220P	220 000 ↓24%	Sí UP4 - 28,50% UP2 - 50,62% UP3 - 12,07% UP1 - 8,81%	No Sobrecarga UP2 y falta balance UP2/3	Sí UP4: 07/18 - 07/22 UP2: 03/18 - 11/23 UP3: 04/18 - 01/20 UP1: 06/18 - 12/20	No Uso parcela SDP
Variante 3. Desplazamiento localización UP4 a la obra 6401P					
UP1-SDP UP4-6401P UP2-0100P UP3-0100P	200 000 ↓31%	Sí UP1 - 24,91% UP4 - 28,50% UP2 - 38,22% UP3 - 8,37%	Sí Posible mejora balance UP2/3	Sí UP1: 06/18 - 12/20 UP4: 07/18 - 07/22 UP2: 03/18 - 11/23 UP3: 04/18 - 01/20	Sí
Variante 4. Modificación de fechas de desmontaje sobre la variante 3					
UP1-SDP UP4-6401P UP2-0100P UP3-0100P	189 000 ↓35%	Sí UP1 - 26,43% UP4 - 28,50% UP2 - 36,35% UP3 - 8,68%	Sí Posible mejora balance UP2/3	Sí UP1: 06/18 - 12/20 UP4: 07/18 - 11/23 UP2: 03/18 - 06/22 UP3: 04/18 - 01/20	Sí

Tabla 22. Comparativa entre los escenarios de producción estudiados. Elaboración propia.

De la tabla 22 se deduce que la localización de EIME en la obra 0220P, si bien no había limitaciones de disponibilidad de la parcela ni en superficie ni en tiempo, ha supuesto un gran freno a la optimización de las distancias recorridas por los camiones. Por ello, dado el retraso de la tuneladora 2b y la infrautilización de una gran parte de la parcela de la obra 6401P, incluso con la tuneladora en proceso de excavación; se sugiere el 6401P como mejor emplazamiento posible para la central UP4 de EIME. Se podría haber considerado igualmente la parcela del 3303P, pero sus dificultades de accesibilidad para los vehículos pesados y la proximidad con las viviendas hacen que sea una opción para evitar.

La elección de la variante 3 es intuitiva dada la reducción del 31% de la distancia total. Para poder adoptar la variante 4, si bien parece ser posible, debería hacerse un estudio más detallado de las vías de circulación de vehículos y del flujo de materiales en la obra durante la actividad de la tuneladora. Esto es debido al flujo continuo saliente de lodos de excavación por cintas transportadoras y a la entrada, también de forma continuada, de mortero para el relleno del hueco anular. Dichos sistemas de transporte pueden cruzarse con las vías de circulación si no se construyen por vía aérea o subterránea.

Otra ventaja de la obra 6401P de cara a la cadena de suministro del hormigón es su proximidad con el canal Saint-Denis, lo cual permite la posibilidad de aprovisionar las materias primas de la central por vía fluvial. Esto reduce el flujo de camiones en los alrededores de la zona, que tienen una accesibilidad moderada por tratarse de una vía con un solo carril por sentido y pueden implicar una reducción de las emisiones de CO₂ si el punto de carga de las barcazas se encuentra a gran distancia.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES FINALES

En este último capítulo se citarán las conclusiones del proyecto y se describirán algunas líneas de trabajo futuras en torno a la programación de la demanda diaria y de la consideración de criterios de decisión adicionales.

5.1. CONCLUSIONES

El objeto de este apartado es la evaluación de la pertinencia de la solución desarrollada y el balance de los resultados obtenidos con ella en el escenario inicial y en las variantes propuestas.

El objetivo principal de este proyecto era concebir una herramienta para dimensionar la infraestructura material, en número y en ubicación, requerida para satisfacer la demanda de hormigón de un megaproyecto. Además, se deseaban analizar nuevos escenarios para saber cómo podría haberse mejorado la infraestructura existente del proyecto de la línea L16.1 recortando los costes y las emisiones de CO₂ derivadas de la actividad. Esto implicaba la reducción de la distancia recorrida por los camiones hormigonera.

Para ello, tras el análisis de la situación inicial, se recogieron los datos de demanda y del entorno de producción sobre los que se generó el programa informático en Python. El resultado de este es la asignación mensual de los volúmenes de producción a las cuatro centrales instaladas y las distancias necesarias para las entregas. Adicionalmente contiene una tabla resumen que identifica la parte del volumen total fabricada por cada central. Esta síntesis permite identificar si la demanda está cubierta y si la producción se reparte de manera equilibrada entre las centrales. También permite verificar si se cumple la condición limitante del reparto contractual entre los dos proveedores BSM y EIME.

A continuación, se propusieron varios escenarios, basados en el contexto real del proyecto para intentar minimizar la distancia del modelo inicial. Estos consistían en la modificación del emplazamiento de las centrales de hormigón, en cambios sobre el reparto entre los proveedores y en los periodos de disponibilidad de las centrales. Destacaron las variantes 3 y 4 que incitaban a ubicar la central UP4 en el baricentro de la demanda en vez de en la obra 0200P para asegurar el cumplimiento de la condición transversal y aportaban una disminución de más del 30% en el total de la distancia.

Hoy en día, según las empresas de transporte la mitad (55%) de sus costes se atribuyen al combustible. Sabiendo que el transporte representa el 15% del precio unitario del hormigón, esta optimización del 30% del trayecto se traduce por una reducción de costes del hormigón del 2,5%. Tomando 125 €/m³ como precio unitario, si plantease la mejora en las etapas de negociación de los precios o de las condiciones de prolongación de la utilización de las unidades de producción, se dispondría de un argumento económico favorable de 2 187 500 €.

5.2. LÍNEAS FUTURAS

Las conclusiones presentadas sobre la herramienta de planificación y su aplicación a los diversos escenarios de producción del proyecto de la línea 16.1, suscitan varias líneas de trabajo para ampliar la aplicabilidad de la herramienta.

En cuanto a su diseño, la empresa está interesada en incluir los costes como criterio de decisión y de optimización, que han sido omitidos en el presente análisis al tratarse de datos confidenciales. Así, se podría tener en cuenta el coste de montaje, desmontaje y amortización de las unidades de producción al mismo tiempo que se consideran sus fechas de disponibilidad y su capacidad de producción mensual.

El criterio de costes, junto con la viabilidad de satisfacer la demanda, son los argumentos principales en las negociaciones con la SGP para poder actuar sobre las fechas de puesta a disposición de una parcela. Por ello, en casos como el planteado en las variantes 2 y 4, donde se prolonga de varios meses la utilización de las parcelas SDP y 6401P, respectivamente, es necesario aportar los cálculos del impacto económico. Además, esta perspectiva financiera se podría completar con la distinción entre las centrales de producción móviles en las obras y las centrales fijas. En estas el metro cúbico de hormigón resulta más económico por considerar periodos de amortización mayores, pero tienen la desventaja de dotar a la obra de menor flexibilidad ya que la producción es compartida con otros clientes.

A raíz de su experiencia en el proyecto L16.1, Eiffage participa en la licitación de nuevos contratos públicos para los cuatro tramos de la línea 15. El objetivo es poder aplicar esta herramienta de planificación desde el principio y sugerir diversas variantes para la simulación de la asignación de las centrales. Se busca evitar la situación actual de problemas de aprovisionamiento de hormigón, proponiendo escenarios en los que todo el proyecto tuviese seis, doce o dieciocho meses de retraso o bien que ciertas obras o tuneladoras juzgadas más sensibles, o con mayores riesgos técnicos, sean realizadas en el doble del tiempo previsto. Así, si bien puede parecer menos favorable para el establecimiento de los contratos de aprovisionamiento con los proveedores de hormigón, a la larga disponer de una mayor flexibilidad en el día a día y en la fase final del proyecto, permite asegurar el Plan General. Adicionalmente, se evitaría el pago de plusvalías mensuales por prolongación de uso de la central más allá del plazo convenido.

Otra línea de trabajo consiste en incluir el dimensionado de la flota necesaria para el abastecimiento en el problema de optimización como hicieron Naso, D et al (2004). Esto podría convenir si Eiffage decidiese reforzar el posicionamiento del proveedor interno de hormigón EIME, o gestionar su propia flota de camiones hormigonera y ponerlos a disposición de los fabricantes. Los estudios de Lu, M. y Lam, H. (2005), si bien se realizaban con un programa informático propio a la empresa, también consideraban entornos sumamente urbanizados y con mucho tráfico como el territorio de Hong Kong.

En cuanto a la gestión de la flota de camiones sería interesante contemplar el uso de varios tipos de remolques con volúmenes de carga variables. Poder adaptar el volumen transportado por viaje al tipo de elemento a construir permite reducir las distancias. En hormigonados significativos como los muros pantalla o las grandes losas de estructuras se podrían emplear camiones de 9 m³, mientras que para las columnas o vigas se recurriría a los de 5 m³.

Por último, la continuación del capítulo 3 sería profundizar en la gestión de la demanda a corto plazo con pedidos en firme a través de la programación del orden de carga de los camiones para satisfacer el PMP como el de la tabla 12. El propósito es obtener una secuenciación y un programa como los de Xiong et al. (2021) para la producción *Just-in-Time* del hormigón prefabricado. El seguimiento de este se haría gracias a la geolocalización de los camiones y se debería añadir una condición para garantizar el respecto de la reología en función del tiempo de transporte, de espera y de vaciado en obra.

Sin embargo, siendo que el ritmo de hormigonado de las obras y las horas reales de comienzo no se pueden anticipar y que se dispone de varias centrales, que pueden producir para todas las obras; el programa obtenido será difícilmente aplicable al contexto de las obras del GPE. No obstante, esta ampliación podría ser interesante para hormigonados más sistemáticos y organizados como son los cajones marinos para extensiones de puertos, los macizos de contención de centrales nucleares o los pilotes de molinos eólicos en alta mar.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

Albayrak, G. y Albayrak, U., (2016), Investigation of ready mixed concrete transportation problem using linear programming and genetic algorithm, Civil Engineering Journal, Octubre, Vol.2, No.10.

Berry, W., Vollmann, T. y Whybark, C. (2000) "Sistemas de Planificación y Control de La Fábrica". Ed. Irwin

Bruitparif (2017). Chiffres clé en Ile-de-France. Recuperado el 13 de junio de 2022, de <https://www.bruitparif.fr/chiffres-cle-en-ile-de-france1/>

Carbone4, Grandjean A. et al (2021). Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France. Recuperado el 9 de julio de 2022, de <https://www.carbone4.com/publication-infrastructures-france>

Computational Infrastructure for Operations Research (2009). Pulp. Recuperado el 7 de agosto de 2022, de https://coin-or.github.io/pulp/main/installing_pulp_at_home.html

Fogarty, D.W.; Blackstone, J.H.; Hoffmann, T.R. (1991). Production and operations management: manufacturing and services, Edición 2, APICS y South-Western Publishing Co.

Fuli, X., Mengling, C., Zhi, L., Yao, D. y Linting W., (2021), Just-in-time scheduling for a distributed concrete precast flow shop system, Computers and Operations Research 129

Google Maps Website, C. d. (2022). Cálculo de distancia entre puntos. Recuperado entre el 3 de julio y el 10 de septiembre de 2022, de <https://www.google.fr/maps>

Lu, M. y Lam,H (2005), [Optimized concrete deliver scheduling using combined simulation and genetic algorithms, Conference paper.](#)

Naso, D., Surico, M., Turchino, B. y Kaymak,U. (2004). Genetic algorithms in supply chain scheduling of ready-mixed concrete, Erasmus Research Institute of Management.

Python Software Foundation (2022). Python. Recuperado el 29 de julio de 2022, de <https://www.python.org/>

Real Academia Española (2014), Diccionario de la lengua española, Editorial: Espasa.

Real Academia Española (2015), Diccionario panhispánico de dudas, Editorial: Taurus.

Société du Grand Paris (2021). La Société du Grand Paris réactualise le calendrier du Grand Paris Express. Recuperado el 15 de julio de 2022, de <https://www.societedugrandparis.fr/gpe/actualite/reactualisation-calendrier-grand-paris-express>

Spyder Website, C. o. (2022). Spyder. Recuperado el 29 de julio de 2022, de <https://www.spyder-ide.org/>

Wikipedia, C. d. (2022). Fórmula del semiverseno. Recuperado el 3 de julio de 2022, de https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_del_semiverseno

Diseño de una herramienta de planificación del abastecimiento de hormigón

Wikipedia, C. d. (2022). Primavera (software). Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Primavera_\(software\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Primavera_(software))

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

INTRODUCCIÓN

En esta sección se busca realizar una valoración económica del proyecto, considerando los costes materiales para el desarrollo de la herramienta, y los costes de personal.

Para contabilizar las horas dedicadas y la utilización de materiales, se considerará el intervalo de tiempo dedicado al proyecto, que empezó en abril de 2022 y acabó en septiembre de 2022. Durante ese periodo, la alumna ha compatibilizado el horario dedicado en las horas de trabajo con otras tareas del departamento de hormigón, por lo que se considerará una dedicación parcial. A esto se le añadirán las horas de trabajo en tiempo personal.

El presupuesto se va a descomponer en las etapas claves del desarrollo de la herramienta, siendo estas:

- Fase 1: Planteamiento del problema en la empresa y comunicación con el tutor UPV
- Fase 2: Análisis de la situación inicial y visita a obras e instalaciones
- Fase 3: Desarrollo de la herramienta
- Fase 4: Evaluación de los resultados
- Fase 5: Redacción de la memoria y presentación de las conclusiones

1. COSTE MATERIAL

1.1. Costes del hardware

Se atribuyen al material informático necesario para el desarrollo y la ejecución de la herramienta. Se distingue el material puesto a disposición por la empresa y con un precio basado en contratos de venta al por mayor del material de la alumna. El primero, tiene un periodo de amortización de 3 años por contrato con la empresa Lenovo, y al segundo, se le estiman 4 años de amortización.

De los seis meses de desarrollo del proyecto, se considera un 40% de uso del material de la empresa y un 60% del material propio. Es decir, 2,4 y 3,6 meses respectivamente.

Descripción del equipo	Coste unitario (€)	Partes empleadas (h/h)	Coste total (€)
Propiedad de la empresa			
Ordenador Lenovo Thinkpad T14s	951,47	3,6/36	95,15
Pantalla Lenovo ThinkVision T23d-10	98,60	2,4/48	4,93
Propiedad de la alumna			
Ordenador Lenovo Ideapad S340-15IIL	750,00	2,4/48	37,50
Pantalla Huawei Display 24"	119,99	3,6/36	12,00
Ratón Logitech M220	15,90	3,6/36	1,59
Presupuesto total de hardware			151,17 €

Tabla 23. Costes materiales del hardware. Elaboración propia.

1.2. Costes del software

Este apartado recoge el coste de las licencias de los programas informáticos utilizados para el desarrollo y la redacción del proyecto. Tal y como se ha hecho con los costes de hardware, se prorrateará al número de horas de utilización de los programas.

Los programas informáticos de la empresa consisten en licencias anuales, por lo que se calcularán las partes utilizadas, en horas, sobre el total de horas trabajadas por un puesto en la empresa. Los contratos de personal son de 216 días anuales y en la dirección de proyecto la dedicación es de 9 horas diarias, por lo que se tienen 1 944 horas de trabajo anuales. De ellas, según el balance en 2021 del departamento de servicios informáticos de la empresa, las licencias solo se emplean el 40% del tiempo de personal, por lo que se establecen 778 partes.

Descripción del programa	Coste unitario (€)	Partes empleadas (h/h)	Coste total (€)
Microsoft Office Profesional 2016	430	150/778	82,90
Microsoft Visio 2016	181,52	10/778	2,33
Microsoft Project 2016	401,57	5/778	2,58
Primavera 2019	6 025,63	20/778	154,90
Presupuesto total de software			242,71 €

Tabla 24. Costes materiales del software. Elaboración propia.

No se ha considerado el coste de Python, principal herramienta para el desarrollo del programa informático ya que se trata de un software de código abierto y libre disposición. Tampoco se consideran las horas de análisis y redacción en el tiempo individual de la alumna con Microsoft Office ya que han sido realizadas con la licencia gratuita para estudiantes puesta a disposición por la UPV.

1.3. Costes de desplazamiento

Para efectuar el análisis de la situación inicial y conocer los procesos de fabricación y colocación del hormigón, se visitaron varias obras y centrales de hormigón. Se cuantifican en la tabla 18 los costes derivados del transporte durante los seis meses del proyecto y del equipo de protección requerido para el acceso a las obras. Los costes de transporte se han calculado a partir del precio mensual de alquiler de larga duración del vehículo de la empresa, que se compartía con otro compañero, y del combustible en la región de Isla de Francia a la fecha de redacción del documento. Para el importe de los EPI, el responsable de prevención del proyecto indicó el coste de adquisición.

En total se hicieron siete visitas distintas a las cuatro unidades de producción y diez visitas a las obras. Por su proximidad a la oficina central, a dos de las visitas se pudo acceder a pie y para acudir al resto, se necesitó el coche.

Descripción del material	Coste unitario (€)	Cantidad	Coste total (€)
Alquiler del vehículo (Renault Clio)	255	3	765
Combustible diésel (consumo 6 l/100 km)	1,97 €/l	400 km	47,28
Equipo de protección individual	140	1	140
Presupuesto total de software			952,28 €

Tabla 25. Costes materiales de transporte y protección. Elaboración propia.

2. COSTE DE PERSONAL

Este apartado considera el coste de todos los recursos humanos que han intervenido en las cinco fases del proyecto, así como su dedicación horaria. El coste unitario de estos recursos se ha calculado en función al coste salarial de dichos puestos en el mercado de empleo francés.

Recurso humano	Coste unitario (€)	Cantidad	Coste total (€)
Fase 1. Planteamiento del problema y comunicación con los tutores			
Alumna - Ingeniera industrial	30	20	600
Tutor de la empresa – Director de proyecto	100	5	500
Tutor de la UPV – Profesor	60	3	180
Fase 2. Análisis de la situación inicial y visitas			
Alumna - Ingeniera industrial	30	75	2 250
Tutor de la empresa – Director de proyecto	100	10	1 000
Responsables de producción de BSM/EIME	70	12	840
Jefe de obra	50	10	500
Ingeniero estudios técnicos	65	3	195
Técnico de planificación	60	3	180
Fase 3. Desarrollo de la herramienta			
Alumna - Ingeniera industrial	30	80	2 400
Tutor de la empresa – Director de proyecto	100	1	100
Tutor de la UPV – Profesor	60	1	60
Consultante analista de datos	65	5	325
Fase 4. Evaluación de resultados			
Alumna - Ingeniera industrial	30	25	750
Tutor de la empresa – Director de proyecto	100	5	500
Tutor de la UPV – Profesor	60	1	60
Fase 5. Redacción de la memoria y presentación de las conclusiones			
Alumna - Ingeniera industrial	30	170	5 100
Tutor de la empresa – Director de proyecto	100	3	300
Tutor de la UPV – Profesor	60	2	120
Responsables de producción de BSM/EIME	70	2	140
Presupuesto total de <i>software</i>			16 100 €

Tabla 26. Costes de personal para cada fase del proyecto. Elaboración propia.

3. RESUMEN POR CAPÍTULOS

En este último apartado se recogen los costes descritos previamente en función del tipo de recurso. Del subtotal de 17 446,16 € se puede observar que más del 90% de los costes corresponden a los recursos humanos empleados para el desarrollo de la herramienta. En los proyectos de tipo consultoría, como es este, el coste final casi siempre viene íntegramente determinado por la cantidad de horas dedicadas y el perfil del personal requerido.

Sobre este importe subtotal se añaden los gastos generales de la empresa en el proyecto de la L16.1 y el beneficio comercial que se pretende obtener con todo producto o servicio propuesto por la empresa. En complemento, se adiciona el impuesto sobre el valor añadido, conocido bajo las siglas TVA en Francia, y cuyo valor es del 20%.

Recurso	Coste parcial (€)	Coste acumulado (€)
Material. Hardware	151,17	151,17
Material. Software	242,71	393,88
Material. Desplazamientos	952,28	1 346,16
Personal	16 100	17 446,16
SUBTOTAL	17 446,16 €	
Gastos generales (8%)	1 395,69	18 841,85
Beneficio comercial (7%)	1 318,93	20 160,78
TVA (20%)	4 032,16	24 192,94
TOTAL	24 192,94 €	

Tabla 27. Presupuesto resumen del coste de la herramienta. Elaboración propia.

El coste total de la herramienta es de 24 192,94 €, compensable con el ahorro sobre los nuevos precios unitario del metro cúbico hormigón. Esta propuesta se ha aplicado recientemente en las negociaciones sobre los aumentos de costes de las materias primas gracias a la reducción entre un 15 y un 20% de las distancias a recorrer por los camiones.

DOCUMENTO 3: ANEXOS

ANEXO 1

El fichero [Input.xlsx](#) que contiene de los citados en el proyecto:

- Modo de cálculo de la tabla 4 de distancias
- Comparativa de distancias en la tabla 5
- Hoja *Demanda Total*
- Resolución de subproblema con *Solver*

ANEXO 3

Código informático de la herramienta en el fichero [Optim.py](#).

ANEXO 4

Documento [Resultats-basico](#) con los datos de salida del escenario inicial.

Documento [Resultats-sin reparto](#) con los datos de salida de la variante 1.

Documento [Resultats-cambio UP4-UP1](#) con los datos de salida de la variante 2.

Documento [Resultats-cambio UP4-6401P](#) con los datos de salida de la variante 3.

Documento [Resultats-cambio UP4-6401P](#) y *disponibilidad* con los datos de salida de la variante 4.