

Trabajo de Fin de Máster

**Máster en Cadena de Suministro, Transporte y
Movilidad**

**Remodelación del flujo logístico de una planta de
hormigón premezclado (HPM), considerando la
recuperación de material devuelto**

MEMORIA

Autor: José Antonio Samaniego Pactong
Director: Francesc Xavier Gavaldá Aran
Convocatoria: Julio 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El hormigón es la segunda sustancia artificial más consumida en el mundo después del agua, su producción a escala industrial se da, con el desarrollo de plantas especializadas que mezclan las materias primas en un sitio fijo, para luego entregarlo en el lugar solicitado, a este hormigón se lo conoce como hormigón premezclado. La alta variación de la demanda y el hecho de que el hormigón es un material perecible, obligan a tener un flujo logístico ágil. Este proyecto presenta el diseño de flujo de materiales para una nueva planta, en las afueras de la ciudad de Quito, que reduce los desplazamientos de los camiones mixer durante la producción, permitiendo sacar 1 camión cada 7 minutos, de manera ininterrumpida con una flota de 29 camiones. Se considera también la implementación de un proceso de recuperación de materiales no existente en la anterior planta, brindando la posibilidad de reutilizar las materias primas, los agregados en nuevas mezclas, el agua en nuevos procesos y el desecho de hormigón en nuevas mezclas para elementos no estructurales, todos sin comprometer la calidad del producto final, logrando ahorrar un 15% en materia prima por cada metro cúbico de hormigón fabricado con agregado recuperado y 63% en materia prima por cada metro cúbico fabricado con pasta gris. Se puede recuperar la inversión del proyecto en un tiempo no mayor a 3 años y a partir del año 4 se tendrán ganancias.

Índice

ÍNDICE	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas.....	8
Índice de ecuaciones	9
1. GLOSARIO	10
2. INTRODUCCIÓN	12
2.1. Origen del Proyecto.....	12
2.2. Motivación	13
2.3. Objeto.....	14
2.4. Objetivos del proyecto	15
2.5. Alcance del Proyecto.....	15
2.6. Contenido	15
3. LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO (HPM)	16
3.1. Ventajas del HPM.....	16
3.2. Tipos de HPM.....	16
3.3. Producción del HPM.....	18
3.4. Camiones Mixers.....	18
3.5. Demanda de hormigón premezclado	19
3.6. Entrega del producto	19
3.7. Tamaño del pedido.....	20
3.8. Precisión de la cantidad de pedido.....	20
4. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA A RESOLVER	21
4.1. Proceso productivo.....	21
4.2. Capacidad actual de la planta	23
5. PROPUESTA DE MEJORA	24
5.1. Materia prima, recepción y almacenaje.....	25
5.1.1. Agua	25
5.1.2. Cemento	25
5.1.3. Aditivos	26
5.1.4. Agregados.....	26
5.2. Proceso Productivo	28
5.2.1. Estación 1	30
5.2.2. Estación 2	34

5.2.3. Estación 3.....	35
5.2.4. Estación 4.....	36
5.3. Distribución en planta	36
6. IMPACTO AMBIENTAL	39
6.1. Huella de carbono de la planta actual.....	39
6.2. Huella de Carbono de la planta con recuperación por lavado.....	40
6.2.1. Hormigón estructural.....	41
6.2.2. Hormigón no estructural.....	41
6.3. Manejo de sólidos	42
6.3.1. Recuperación de agregado grueso (3/4" y 1/2").....	42
6.3.2. Recuperación de pasta gris	42
6.4. Manejo de Agua.....	43
7. BENEFICIO ECONÓMICO	44
7.1. Costo de la implementación de Recuperación de agregados	44
7.2. Recuperación de Agregado Grueso	44
7.3. Pasta Gris	45
7.4. Rentabilidad del proyecto	46
8. PRESUPUESTOS	49
8.1. Nueva planta.....	49
8.2. Proyecto.....	49
8.2.1. Recursos humanos.....	49
8.2.2. Recursos tecnológicos.....	50
8.2.3. Costo total del proyecto	50
9. PLANIFICACIÓN	51
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	53
Referencias bibliográficas	53
Bibliografía complementaria.....	55

Índice de Figuras

Figura 2.1 Mapa de la intensidad media diaria de tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2013. Fuente: [3].	13
Figura 2.2 Ciudad de Quito, alcance de entrega dentro de la zona urbana y zona de interés para el proyecto Fuente: propia.	14
Figura 3.1 Giro de la cuba de un camión mezclador, Mezclado (izq.) Vertido (der.). Fuente: propia.	19
Figura 4.1 Secuencia de un camión mixer en la panta actual. Fuente: propia.	21
Figura 4.2 Diagrama de recorrido de la planta actual, sin manejo de desechos. Fuente: propia.	22
Figura 5.1 Tipos de distribución en planta. Fuente: [9].	24
Figura 5.2 Silo de cemento Holcim, Malagueño, Argentina. Fuente: [10].	26
Figura 5.3 Camión Silo, realizando una entrega de cemento. Fuente: [11].	26
Figura 5.4 Vista de la mina de Holcim, en Pifo, Quito. Fuente: [12].	27
Figura 5.5 Almacenaje de agregados. Fuente: propia.	28
Figura 5.6 Esquema de la línea de producción con recuperación para lavado. Fuente: propia.	29
Figura 5.7 Estaciones de la línea de producción. Fuente: propia.	29
Figura 5.8 Entrada de la línea de producción Fuente: propia.	30
Figura 5.9 Sistema de lavado integrado. Fuente: [14, p. 13].	31
Figura 5.10 Poso de sedimentación de una planta de hormigón. Fuente: [16].	32
Figura 5.11 Proceso decantador para sedimentación de aguas grises. Fuente: [17, p. 3].	33
Figura 5.12 Estación 1, Lavado interno y recuperación. Fuente: propia.	33
Figura 5.13 Estación 2, Lavado exterior, remojo y pesaje. Fuente: propia.	34

Figura 5.14 Estación 3, Planta dosificadora. Fuente: propia.	35
Figura 5.15 Estación 4, pesaje, control de calidad y salida. Fuente: propia.	36
Figura 5.16 Plano de la línea de producción, para la nueva planta. Fuente: propia.	37
Figura 5.17 Diagrama de recorrido de la planta actual. Fuente: propia.	37
Figura 5.18 Diagrama de recorrido de la nueva planta. Fuente: propia.	38
Figura 6.1 Nivel de hormigón premezclado devuelto en varias regiones. Fuente: [15, p. 239].	39
Figura 6.2 Proceso de generación de desechos de hormigón fresco (A), pasta gris deshidratada (B), desecho de hormigón fresco (C). Fuente: [21].	42
Figura 9.1 Planificación para el desarrollo de la nueva planta. Fuente: propia.	51
Figura 9.2 Planificación para el desarrollo del proyecto. Fuente: propia.	51

Índice de Tablas

Tabla 1 Dosificaciones utilizadas en la planta actual para 7 m ³ . Fuente: propia.	40
Tabla 2 Cálculo de la huella de carbono. Fuente: [19].	40
Tabla 3 Cálculo de la huella de carbono de la producción de HPM con agregado recuperado Fuente: propia.	41
Tabla 4 Cálculo de la huella de carbono de la producción de HPM, con recuperación por lavado. Fuente: propia.	41
Tabla 5 Costo de operación y mantenimiento del sistema de recuperación de agregados. Fuente: propia.	44
Tabla 6 Cálculo para del costo de 1 m ³ sin agregado grueso recuperada. Fuente: propia...	45
Tabla 7 Cálculo para del costo de 1 m ³ sin agregado grueso recuperada. Fuente: propia...	45

Tabla 8 Cálculo para del costo de 1 m ³ sin pasta gris. Fuente: propia.	46
Tabla 9 Cálculo para del costo de 1 m ³ con pasta gris. Fuente: propia.	46
Tabla 10 Cálculo del ahorro total generado por el procedimiento de recuperación por lavado Fuente: propia.	47
Tabla 11 Cálculo del VAN y del TIR. Fuente: propia.	48
Tabla 12 Presupuesto total de la nueva planta. Fuente: propia.....	49
Tabla 13 Costos de recursos humanos para el proyecto. Fuente: propia.....	50
Tabla 14 Costos de recursos tecnológicos para el proyecto. Fuente: propia.	50

Índice de ecuaciones

(Ec. 7.1).....	47
----------------	----

1. Glosario

Aditivo: Los aditivos para hormigón son componentes de naturaleza orgánica o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades físicas de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones

Agregado: Roca o grava triturada obtenida de las fuentes previamente seleccionadas, se le llama agregado grueso si su tamaño es superior a 2,4 mm, y agregado fino si su tamaño menor.

Camión Mixer: Camión equipado con tanques de agua, aire y principalmente una cuba. Usado principalmente para transportar y mezclar hormigón.

Capacidad instalada: Cantidad de metros cúbicos de hormigón que una planta puede mezclar, independientemente si existen pedidos o no.

Capacidad real: Cantidad de metros cúbicos producidos por una planta en un periodo de tiempo.

Cuba: Tambor giratorio de un camión mixer, en cuyo interior posee espas que ayudan a mezclar y verter material.

Dosificación: Proporciones apropiadas de los materiales que componen el hormigón, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado o adherencia correctos.

Durabilidad: Resistir a los efectos del paso del tiempo, las heladas, los rayos solares. No alterar la coloración y la textura de los materiales expuestos al medio ambiente

Esfuerzo: En Física, más específicamente en la rama de la Mecánica, como esfuerzo se conoce la fuerza que actúa sobre un cuerpo para deformarlo.

Estanqueidad: Es la posibilidad de crear una superficie por donde no acceda el agua al interior del material en casos de lluvia; es una exigencia a cumplir muy importante cuando se construye un edificio.

Hormigón premezclado (HPM): Hormigón elaborado en un sitio especializado llamado planta, que es fijo y normalmente diferente al lugar donde se lo va a utilizar.

Hormigón: Mezcla de cemento, agregados y agua, que se endurece al cabo de horas para formando un material capaz de soportar grandes esfuerzos.

Mezcladora de la planta: Lugar de la planta donde se depositan las materias primas, ya pesadas para mezclarlas y producir hormigón.

Pila: Se denomina pila de agregado a un agrupamiento de material en una zona específica, su apariencia se asemeja a una montaña pequeña.

Resistencia: La resistencia es una de las capacidades físicas básicas, particularmente aquella que nos permite llevar a cabo una actividad o esfuerzo durante el mayor tiempo posible.

Stock: Conjunto de mercancías, materia prima o productos que se tienen almacenados en espera de su venta o comercialización.

Tiempo muerto: Tiempo en el cual un proceso está parado, debido a que para continuar necesita estrictamente que otro proceso termine.

Tolva: Recipiente en forma de pirámide o cono invertido, con una abertura en su parte inferior, que sirve para hacer que su contenido pase poco a poco a otro lugar o recipiente de boca más estrecha.

2. Introducción

El hormigón es una mezcla de material aglutinante (cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un todo compacto (piedra artificial) y al cabo de 28 días, es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión [1].

Durante el siglo 20, se ha vuelto el material más utilizado en los proyectos de construcción alrededor del mundo debido a su relativo bajo costo, fácil elaboración y principalmente a que es un material muy versátil que puede tomar casi cualquier forma pudiendo resistir grandes concentraciones de carga. Hoy en día es la segunda sustancia artificial más consumida en el mundo después del agua, es ampliamente utilizado en la industria de la construcción a nivel mundial con una tasa de producción superior a 3,8 toneladas per cápita por año [2].

Es elaborado en plantas especializadas que lo entregan en el lugar especificado, a este hormigón se lo conoce como hormigón premezclado (HPM). Suministrar material de calidad en el tiempo correcto tiene sus complicaciones, si bien la producción en sí del hormigón es relativamente simple, la entrega al cliente no lo es, puesto que tiene que ser entregado en un tiempo no mayor a 90 minutos luego de la adición de agua caso contrario, el producto se pierde. Esto obliga a las empresas de HPM a tener un flujo logístico ágil, no solo para minimizar los retrasos, si no para reponer el material que se pierda en caso de una demora grande, ya sea esta por culpa de la misma empresa o por causas ajenas.

2.1. Origen del Proyecto

La empresa posee una planta de HPM en el norte de la zona urbana de Quito, desde hace 20 años, tiempo en el que ha logrado captar la demanda de hormigón proveniente de varios proyectos realizados por el municipio de la ciudad, así como también distintos proyectos inmobiliarios del sector privado. Sin embargo, esta demanda se visto reducida en los últimos años, ya que la ciudad ha crecido hacia la periferia este, donde se encuentran los valles de Cumbayá, Tumbaco y los Chillos.

Intensidad de tráfico en la ciudad

Acorde con el estudio de Vega y Parra [3]. Las vías con mayor actividad se localizan principalmente al norte de la zona urbana de la ciudad. También presentan altos niveles de tráfico vías periféricas y aquellas que conectan con los valles. En la Figura 2.1, se muestra un

mapa de la ciudad de Quito donde se observan el nivel de congestión de las vías.

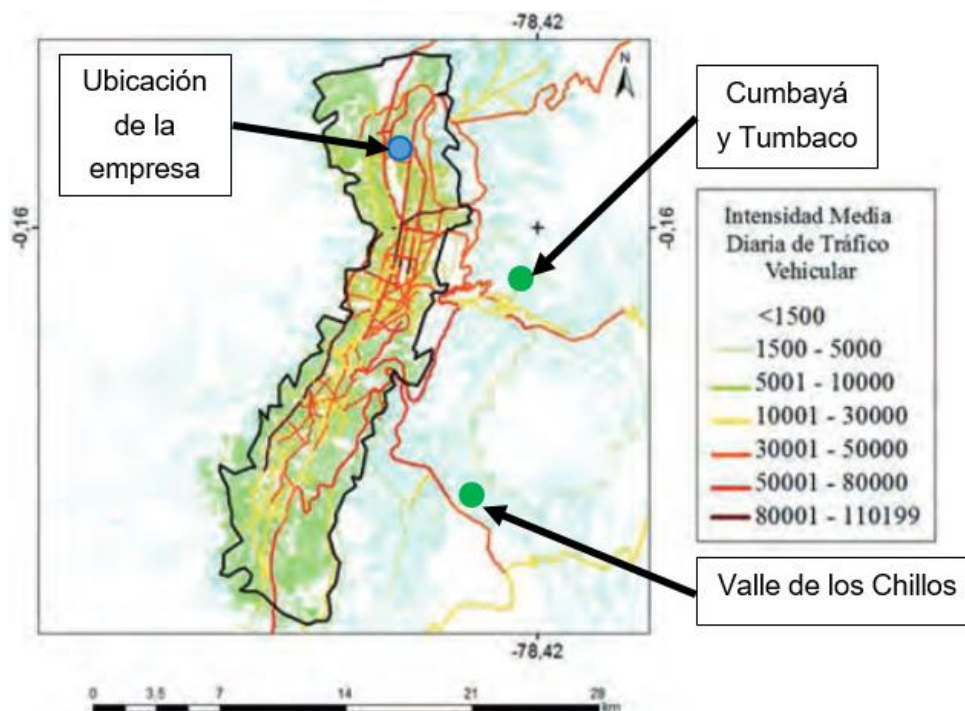


Figura 2.1 Mapa de la intensidad media diaria de tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2013. Fuente: [3].

En la zona norte, el flujo vehicular de días laborables es mayor a los flujos de los sábados (en un 10%) y domingos (en un 60%). En las vías de las zonas norte y sur, el tráfico se reduce en días feriados. Sin embargo, en las vías de la periferia hay un incremento (entre 11 y 47%) con respecto al flujo de los días laborables.

En los momentos cuando el flujo de tráfico es bajo, el tiempo de viaje para llegar a la zona de los valles desde el norte de la ciudad es de 30 minutos para el valle de Cumbayá y 45 minutos para el valle de los chillos, sin embargo, cuando el flujo aumenta el viaje puede llegar a superar los 90 minutos, haciendo menos atrayente la idea de realizar entregas a estos lugares, debido al riesgo de que el producto pierda sus propiedades en el trayecto.

2.2. Motivación

Ante esta creciente demanda en el sector de los valles, la empresa se ve en la necesidad de conseguir una locación nueva y más grande, En la Figura 2.2 se puede ver el alcance de la planta actual en azul, en esta zona la empresa puede garantizar una entrega en menos de 30 minutos. En amarillo, se muestra la zona donde la nueva planta se ubicará para captar la nueva demanda de los valles de Cumbayá, Tumbaco y brinda también la posibilidad de

abastecer al valle de los chillos, será lo suficientemente cerca para responder de manera ágil ante cualquier eventualidad. La adquisición de una nueva instalación presenta una oportunidad, no sólo para incrementar las ventas sino para también de mejorar el diseño de la planta, optimizando la distribución física de los procesos, en el nuevo terreno que tiene un tamaño de 3 hectáreas, de 225 m x 133 m.

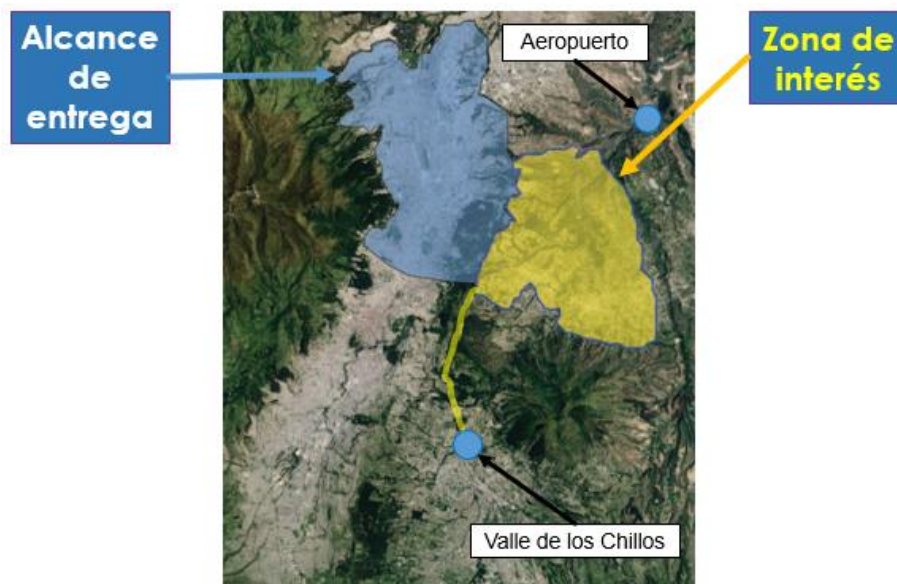


Figura 2.2 Ciudad de Quito, alcance de entrega dentro de la zona urbana y zona de interés para el proyecto Fuente: propia.

Una nueva planta en la zona de interés permitirá captar la demanda de los sectores de los valles en un tiempo menor a 15 minutos dentro de la zona de interés, sin dejar de lado la zona del valle de los chillos, pudiendo suministrar hormigón en alrededor 30 minutos, además se estará más cerca de los proveedores de materia prima y se abre la posibilidad de suministrar producto a los sectores de Tababela, Puembo y Pifo, que se encuentran cercanos al aeropuerto de Quito presentando una interesante oportunidad a futuro, ya que actualmente son sectores de baja densidad poblacional.

2.3. Objeto

El proyecto se centra en una planta de hormigón premezclado (HPM) en la ciudad de Quito, con una capacidad instalada de 60 m³/h a construirse en un terreno libre a las afueras de la ciudad.

2.4. Objetivos del proyecto

- Establecer la distribución en planta más eficiente para la producción de HPM, que tome en cuenta la reutilización de material recuperado para reducir la huella de carbono.
- Determinar si existe un beneficio económico producto de la recuperación de materiales de hormigón devuelto.

2.5. Alcance del Proyecto

Dentro del proyecto se tratará la optimización del movimiento dentro de una nueva planta de los camiones mixers durante la producción de HPM, bajo capacidades instaladas y dosificaciones dadas y suponiendo que la ubicación de la planta será en un terreno ya comprado de 3 hectáreas a 30 minutos de viaje de los clientes, desde su entrada a la línea de producción hasta su salida hacia la obra, también incluirá los movimientos realizados al regresar a la planta y al parqueadero.

2.6. Contenido

En el presente trabajo presenta una evaluación de la planta actual de hormigón, se realiza una propuesta para la distribución de actividades dentro de una planta de hormigón, el análisis del flujo de camiones dentro de la misma, el análisis de capacidad, el manejo de material devuelto, su recuperación, balance económico de la huella de carbono.

3. La industria del hormigón premezclado (HPM)

La práctica estándar era que las empresas de construcción mezclaran su propio hormigón en el lugar de trabajo utilizando cemento en bolsas y agregados comprados directamente por los contratistas, esta práctica sigue siendo común para construcciones pequeñas. Sin embargo, conforme aumentó el auge de la construcción de edificios, viviendas y carreteras, la demanda de material fue suficiente para aprovechar las economías de escala de los mezcladores de hormigón especializados fuera del sitio.

El hormigón se lo puede producir de manera artesanal sin mayor dificultad, pero únicamente en bajas cantidades, alrededor de 0,5 m³ máximo, para obtener cantidades más grandes, que son las que normalmente se requieren en el sector de la construcción, es necesaria una planta de hormigón que realice el proceso de mezclado.

3.1. Ventajas del HPM

Dentro de las principales ventajas que presenta este tipo de hormigón en cuanto al rubro de la construcción se tiene:

- Fabricación de grandes volúmenes de hormigón en poco tiempo.
- Ahorro de mano de obra, durante la manipulación de éste.
- Planta dosificadora puede ser controlada electrónicamente.
- Competitividad de costo total, respecto de otros materiales de construcción.
- La preparación se la realiza justo antes de la entrega.
- La producción está a cargo de una empresa especializada que cuenta con personal calificado.

Se entrega un material de mejor calidad a menor precio, dado el mejoramiento continuo al interior de las empresas proveedoras. Además, debido a la necesidad de contar con hormigones de calidad certificada, su uso ha ido en aumento en los últimos años.

3.2. Tipos de HPM

Existen muchas formas de clasificar hormigones: Por su resistencia, por el tamaño de piedra

utilizada, por su modo de empleo, etc. Para lo que concierne a la presente investigación, desde un punto de vista logístico, se puede clasificar de tres formas.

1. Tipo de uso

- a) Hormigón estructural: Utilizado para la elaboración de estructuras destinadas a soportar grandes concentraciones de esfuerzos, por ejemplo: columnas, losas y vigas
- b) Hormigón no estructural: Se definen como aquellos que no aportan responsabilidad estructural a la construcción, su función es completar geometrías requeridas, mejorar el diseño visual de la estructura, entre otras. Por ejemplo: Aceras, bordillos o rellenos.

2. Peso unitario

- c) Normal: El hormigón que contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, que generalmente pesan alrededor de 2400 kg/m^3 , en estado fresco, es el hormigón más comúnmente utilizado para fines estructurales.
- d) Liviano: Para aplicaciones donde se desea una mayor relación resistencia/peso, es posible reducir el peso unitario del hormigón utilizando ciertos agregados naturales o piro procesados que tienen menor densidad aparente, aproximadamente 1800 kg/m^3 , en estado fresco.
- e) Pesado: Usado en ocasiones para el blindaje contra la radiación, es hormigón producido a partir de agregados de alta densidad, y generalmente pesa más de 3200 kg/m^3 , en estado fresco

3. Tipo de mezclado (sólo para HPM)

- a) Hormigón de mezclado central: Se realiza el mezclado en planta ya sea mediante la mezcladora o mediante la cuba del camión. El hormigón sale de planta listo y el camión solo cumple con el papel de agitador.
- b) Hormigón de mezclado en tránsito: Los materiales son introducidos a la cuba por medio de una planta dosificadora, el camión lleva los componentes a la obra y cumple con la función de mezclador y agitador, ya sea en el trayecto o al llegar al destino.
- c) Hormigón parcialmente mezclado en tránsito: Se realiza la mezcla en planta de manera parcial y camino a la obra se completa para llegar al destino con el producto listo.

3.3. Producción del HPM

Cada uno de los materiales que componen el hormigón tienen una función dentro de la mezcla, sus diferentes características le brindan al producto final sus propiedades, por ende, las empresas diseñan preparaciones con la correcta cantidad de cada material que produzca un producto con las propiedades requeridas para cada momento, esta cantidad se la denomina dosificación, debido a la variabilidad de las materias primas debe ser corregida continuamente, por esto las empresas buscan mantener casi siempre a los mismos proveedores para minimizar estas correcciones.

Una planta de HMP normalmente tiene instalaciones que incluyen silos de cemento de acero (el cemento debe protegerse de la humedad en el aire, para que no se endurezca prematuramente); pilas abiertas de áridos (arena, grava y roca) clasificadas por tamaño; un sistema de carga y transportador para mover agregados; y una fuente de agua.

El proceso básico no ha cambiado durante los últimos 60 años: se miden las materias primas secas, se cargan en un contenedor, se mezclan, se colocan en un camión y se agrega agua (a veces el orden de los últimos dos pasos es inter cambiado).

3.4. Camiones Mixers

A diferencia de los camiones normales, estos llevan sobre el bastidor una cuba de forma aproximadamente cilíndrica sobre un eje inclinado con respecto al bastidor, esto le permite girar y mantener el hormigón en movimiento. De esta forma se logra que el fraguado del hormigón se retrase y la mezcla se homogenice antes de llegar a obra para su posterior vertido.

La cuba gira por medio de un motor auxiliar o mediante el mismo motor del camión, ya sea de forma mecánica o hidráulica, en su interior existen palas de una forma determinada tal que al girar en un sentido lleva el hormigón de la parte más alta de la cuba hacia la más baja, como se muestra en la Figura 3.1, generando así que se mezcle el material, y al hacerlo en sentido contrario hace fluir el hormigón hacia el exterior para verterlo en el lugar deseado.

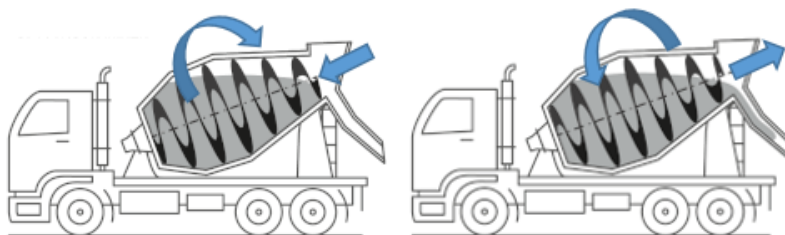


Figura 3.1 Giro de la cuba de un camión mezclador, Mezclado (izq.) Vertido (der.). Fuente: propia.

El proceso de descarga se lo realiza mediante una canaleta mecánica o manual, situada en la parte trasera del camión, el operador puede ser un ayudante o el mismo conductor. Adicionalmente el camión cuenta con un depósito de agua con el respectivo mecanismo para que salga a presión por una manguera, esta se usa para lubricar la canaleta, limpiar herramientas y el propio camión.

3.5. Demanda de hormigón premezclado

Las órdenes esperadas son muy variables a lo largo del día, entre 10 y 50 mixers en un día, incluso cuando la cantidad total de hormigón para una ubicación específica o un proyecto puede estimarse con margen de error de un 5%, otros factores como el hecho de que los requisitos para la colocación del hormigón no estén listos, que las circunstancias climáticas no permitan realizar el vertido, temas de la planeación, sincronización, organización, tráfico y demás, aumentan el rango de error en el momento de suministrar este material, por lo que mejorar agilizando el proceso de producción da una ventaja competitiva a la empresa sobre sus competidores [4, p. 100].

3.6. Entrega del producto

Debido a que el hormigón (sin aditivo retardante), por norma [5] debe colocarse en un tiempo no mayor a 90 minutos después de la adición de agua. Una entrega sincronizada es crucial para el contratista ya que el retraso del hormigón puede resultar en una unión difícil entre las capas de hormigón. La escasez de hormigón dará como resultado juntas de construcción no deseadas que pueden poner en peligro la resistencia, la estanqueidad, la apariencia o la durabilidad del hormigón. En cambio, una demora importante genera retrasos en el proceso constructivo que a su vez acarrea pérdidas. Para esto se mantendrá una persona en obra cuando la pieza a fundir requiera de trabajos intermedios entre vertidos, así se podrá establecer una comunicación confiable con planta.

El rango de entrega está limitado en función de las rutas existentes para llegar a la obra y del estado del tráfico al momento de agendar un pedido, evitando las horas en las que el tiempo de viaje al lugar de destino sea mayor a los tiempos normativos dichos anteriormente.

Con la nueva ubicación y el nuevo diseño de distribución, la empresa será más ágil y podrá responder de mejor manera ante situación imprevistas que pongan en riesgo la entrega del producto en el tiempo permitido.

3.7. Tamaño del pedido

Un elemento de una obra grande, de más de 9 m³, requiere un suministro de hormigón ininterrumpido para evitar juntas no planificadas, y así obtener una sola pieza de hormigón macizo. Entonces será necesario que 2 o más camiones se encuentren listos en obra para verter el hormigón, así cuando el primero haya terminado, el otro pase inmediatamente a descargar.

Para lograr la continuidad de entrega requerida, la planta y el sitio deben comunicarse en tiempo real para retransmitir cuando se retrasa una colocación y evitar que los camiones se "agrupen" en el sitio. Para obtener datos precisos y en tiempo real sobre el viaje de los camiones y las condiciones del sitio, la planta de usa sistemas de información geográfica (SIG) basados en redes telefónicas inalámbricas locales (en lugar de sistemas basados en satélites).

Los elementos de obra grandes pueden inmovilizar un número considerable de camiones y, por lo tanto, la capacidad de una planta. Una planta puede incluso tener que hacer arreglos con las plantas cercanas para proporcionar capacidad adicional o al menos una copia de seguridad en caso de que surjan problemas con su sistema de producción.

3.8. Precisión de la cantidad de pedido

La planta cobra a los contratistas por todo lo que ordenan como, por ejemplo, el exceso de hormigón en el camión que retorna de obra luego de haber entregado el pedido. El contratista puede cancelar el resto del pedido, eso sí, pagando una compensación a razón de costo de oportunidad para la planta. Sin embargo, la planta se acomoda si la cancelación llega 1 día antes de la planificación original.

4. Análisis de la problemática a resolver

Hoy en día, las plantas de hormigón son altamente especializadas, por lo general las plantas en la industria fabrican poco tipo de productos, a pesar de las similitudes en el proceso y el hecho de que los compradores finales en la industria de la construcción son a menudo los mismos. Esto ya que más del 90% de los ingresos de las plantas de hormigón provienen de las ventas de mezclas ya sean hormigones, morteros o bases, lo que significa que las empresas de una sola planta en la industria obtienen la gran mayoría de sus ingresos de su producto primario [6]. También son totalmente automatizadas y funcionan con diésel, electricidad o ambos. Las principales fuentes de consumo de energía en las plantas incluyen el generador diésel, las operaciones de la oficina del sitio, el cargador utilizado para manejar los agregados desde el patio de almacenamiento hasta el transportador de banda automatizado y los vehículos de la compañía. La planta de procesamiento por lotes es capaz de producir diferentes grados y tipos de hormigón. Las proporciones de la mezcla ya están almacenadas en los sistemas de control automatizado de la planta de procesamiento por lotes. La planta utiliza una mezcladora de pan o una mezcladora de doble eje de capacidad específica [7].

4.1. Proceso productivo

Para una planta todas las referencias de hormigones tienen el mismo proceso de mezclado, que se indica en la Figura 4.1, esto otorga una gran ventaja logística desde el punto de vista de los camiones mixers, puesto que la secuencia sería la misma sin importar la carga.

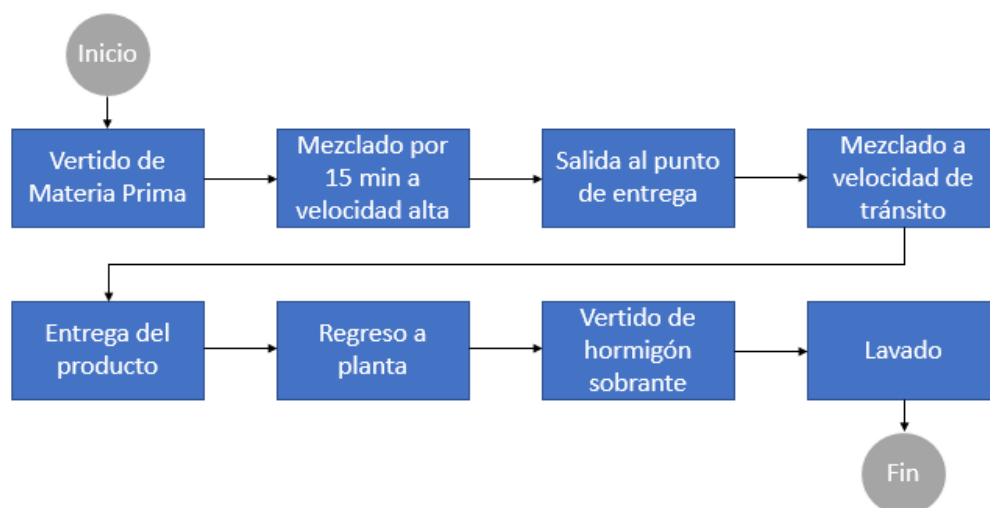


Figura 4.1 Secuencia de un camión mixer en la planta actual. Fuente: propia.

Cada uno de estos procesos se los realiza en un área específica, sin embargo, estos sitios no están distribuidos de una manera óptima en la planta, generando un exceso de desplazamientos de los camiones mixers, como se ve en la Figura 4.2. El camión se estaciona en reversa, luego sale al sitio de toma de muestras y control de calidad, para finalmente ir al sitio de descarga de sobrantes y lavado. La mayoría de las plantas hormigoneras tienen un diseño que no se acopla a las necesidades logísticas de la empresa, debido a que en muchos casos a una falta de planificación.

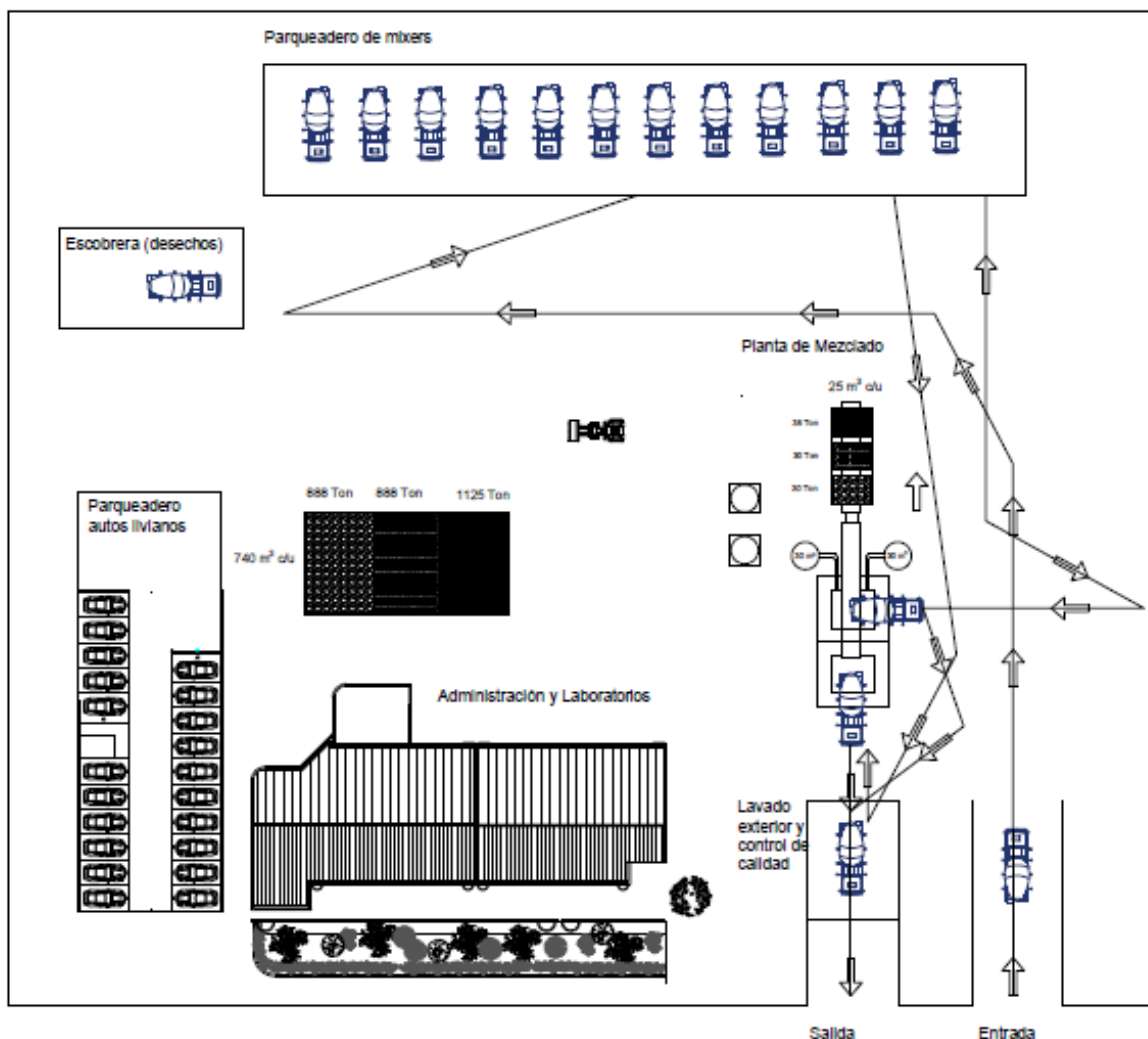


Figura 4.2 Diagrama de recorrido de la planta actual, sin manejo de desechos. Fuente: propia.

4.2. Capacidad actual de la planta

La capacidad de producción de la planta es mayor que su capacidad de entrega. Con una capacidad instalada de 60 m^3 , la capacidad real utilizada puede estar entre el 41 y el 48%, basado en el estudio de Checa de 2018 [8], gran parte de las demoras son causadas por circunstancias ajenas a la gestión de la empresa, como el tráfico o demoras del mismo cliente, para tener una idea, el tiempo para mezclar los componentes y obtener el producto final es del orden de minutos. Por el contrario, el tiempo de ciclo de un camión, que incluye el tiempo de vertido, la entrega y el regreso, puede ser de 30 minutos a 2 horas.

Un cálculo rápido y determinista basado en un tiempo de carga de 2 minutos y un tiempo de ciclo de camión de 30 minutos produce aproximadamente 15 camiones atendidos por la planta. Un ciclo de 1 hora rinde para 30 camiones. Debido a la gran variabilidad del tiempo de ciclo, la planta estará inactiva en ocasiones cuando espere a que regresen los camiones, mientras que en otras tendrá a los camiones en espera para recibir el producto [4, p. 101].

Otros factores que afectan la capacidad de la planta son la disponibilidad de materiales y espacio para limpiar camiones. Sin embargo, en condiciones normales de funcionamiento, estos no serán relevantes.

5. Propuesta de mejora

Se cambia el diseño de planta y se quiere pensar desde cero en una distribución orientada a producto, siguiendo lo indicado en la Figura 5.1, ya que todos los productos de la planta se fabrican de la igual forma y se producen grandes cantidades de los mismos. En este caso el producto final es el camión mixer lleno con el hormigón solicitado, cada uno de los subprocessos por los que tiene que pasar un camión mixer se colocan en fila.

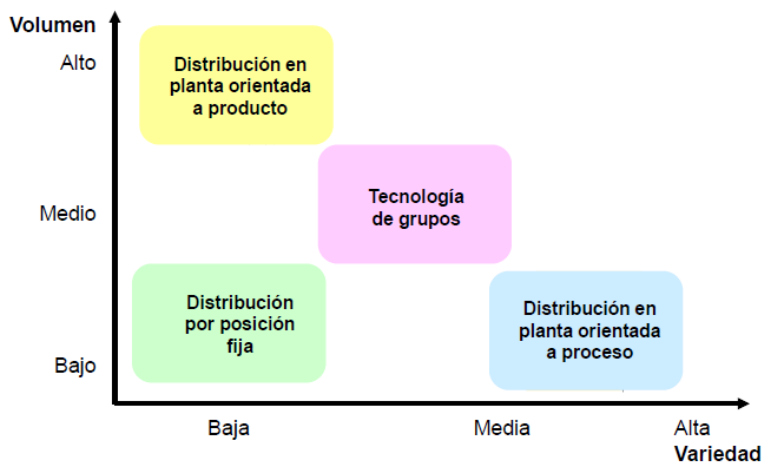


Figura 5.1 Tipos de distribución en planta. Fuente: [9].

Entre los inconvenientes de este tipo de distribución, se tiene que es un sistema rígido, el ritmo de producción lo marca el subprocesso más lento, una avería puede interrumpir la producción entera y hace que existan subprocessos con tiempos muertos. En la planta actual, dichos problemas se hacen más evidentes, los excesos de movimientos del mixer hacen que coordinar el proceso productivo sea más complicado, con lo que el riesgo a caer en un parado de la línea de producción se incrementa. Con el nuevo diseño se busca reducir estos problemas lo más posible, simplificando los movimientos del camión mixer en el proceso productivo, y agrupando las actividades minimizando los tiempos muertos y sobretodo permitiendo tener una visión más clara de la producción.

El proyecto se explica primero en dos partes, primero la gestión de la materia prima y segundo el funcionamiento de la línea de producción en cada parte.

5.1. Materia prima, recepción y almacenaje

Cemento, agregados, aditivos y agua, las materias primas de la planta generalmente se reponen diariamente. Siempre hay la opción de generar ordenes adicionales si la demanda así lo exige. Estos materiales se cargan en contenedores controlados por computadoras que alimentan las básculas y se vacían en cintas transportadoras que conducen al mezclador. Las arenas y gravas pueden almacenarse en compartimientos al aire libre, a menudo ubicados en el perímetro de la planta y trasladados con una pala mecánica a los transportadores que los llevan a los contenedores cuando es necesario. Una planta puede quedarse sin materiales, pero esto rara vez ocurre dado que individualmente las materias primas no son perecibles.

Cuando ocurre, rara vez se debe a un sistema de reabastecimiento deficiente (la mayoría de las plantas de hormigón tienen relaciones cercanas con sus proveedores de aguas arriba), sino más bien debido a la falla del equipo [4, p. 102].

5.1.1. Agua

El agua se toma de la red pública, acorde con la norma ISO 12439:2010, el agua potable de la ciudad cumple con los requerimientos mínimos.

Hay que tomar en cuenta que el agua no sólo es necesaria como ingrediente sino también para lavado y ensayos, por lo que es necesario tener un tanque adecuado a las necesidades de producción, que permita un almacenamiento libre y un fácil acceso para su uso.

5.1.2. Cemento

El cemento se guarda en silos con capacidad de hasta 150 toneladas, con un interior liso y con una inclinación de por lo menos 50° respecto a la horizontal en la tolva inferior, cada silo debe ser único para cada cemento que se utilice, en la Figura 5.2, se pueden ver los diferentes silos para el almacenaje de todos los tipos de cemento de la marca Holcim. El cemento se transporta en camiones-silo cuya capacidad es de entre 30 a 40 toneladas, como el mostrado en la Figura 5.3, luego se descarga directamente al silo de la planta mediante compresores de aire manteniendo al material protegido contra la intemperie para evitar la absorción de humedad.



Figura 5.2 Silo de cemento Holcim, Malagueño, Argentina. Fuente: [10].



Figura 5.3 Camión Silo, realizando una entrega de cemento. Fuente: [11].

5.1.3. Aditivos

Se mantiene un stock fijo de tres tipos de aditivos: acelerante, plastificante y retardante. Al ser utilizados en menor cantidad, se almacenan en tanques más pequeños en comparación con los silos, de alrededor de 60 m³.

5.1.4. Agregados

Los agregados, tanto el grueso como el fino, son entregados por los proveedores en volquetas, el tiempo desde que se emite la orden hasta llegar a la planta actual normalmente es de 2 horas, ya que se encuentran en zonas alejadas de la periferia de la ciudad, la ubicación de la nueva planta será más cercana a ellos, permitiendo reducir sus tiempos de entrega en a la mitad.

Al llegar a la nueva planta, las volquetas de entrega se pesan llenas del material pedido, posteriormente se apilan las piedras en una sección específica de fácil acceso para la entrada de maquinaria pesada y finalmente se pesa la volqueta nuevamente antes de salir, con la diferencia de pesos se controla la cantidad que ha sido entregada.

Los tamaños con los que se trabajan en la planta son piedra de 3/4" y 1/2", la arena será material que pase el tamiz número 8, es decir, partículas que tengan un tamaño menor a 2,35 mm.

Su transporte dentro de la planta requiere de palas mecánicas, por lo que el almacenamiento se realiza en patios amplios que permitan su circulación, como se ve en la Figura 5.4, están divididos en varias partes para alojar cada tipo de agregado. En la nueva planta se tendrá un piso duro para evitar la contaminación del material, con pendiente suave para que no formen pilas cónicas y con un buen drenaje para minimizar la diferencia de humedades entre los montones.



Figura 5.4 Vista de la mina de Holcim, en Pífo, Quito.
Fuente: [12].

Es importante que las bandas transportadoras no pasen sobre las pilas de diferentes agregados para evitar la contaminación entre agregados.

Los agregados se protegen con muros a su alrededor para evitar que los vientos se lleven el material más fino, si esto ocurre la arena perdería propiedades que fueron consideradas para el diseño de la mezcla, generando errores en la producción.

En la Figura 5.5, se ve a la izquierda la entrada y salida de volquetas de proveedores, mediante una rampa el vehículo se elevará para depositar los agregados en la parte superior de la pila, en el lado derecho se almacenan los agregados recuperados del procesos de

lavado que se detallará más adelante. Se contará con dos palas mecánicas que moverán el material desde las pilas hasta las tolvas de la parte superior izquierda, a través de ellas el material irá hacia la mezcladora para continuar con el proceso de producción.

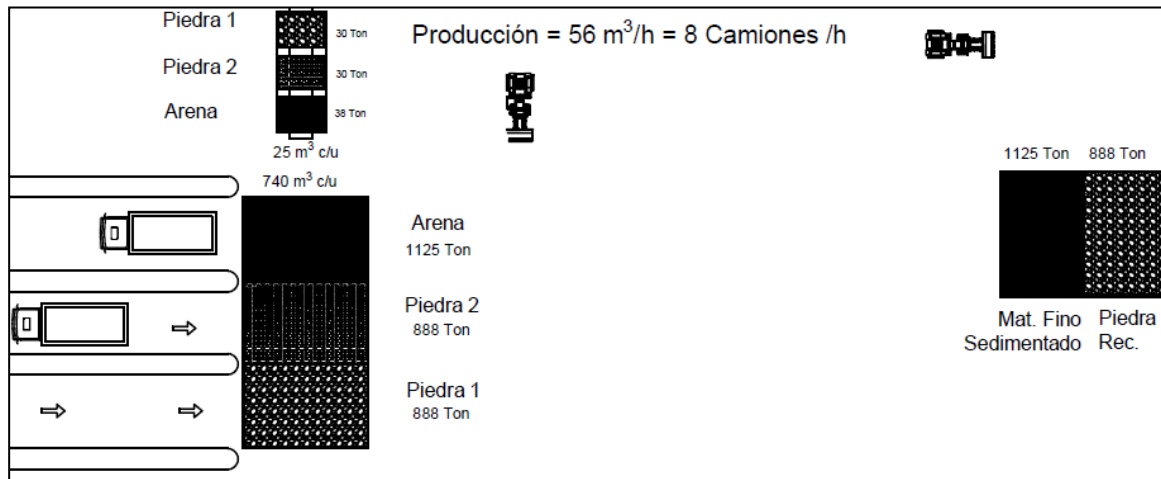


Figura 5.5 Almacenaje de agregados. Fuente: propia.

5.2. Proceso Productivo

Para la empresa, el producto final es el camión mixer lleno con el hormigón, para poder despachar el camión un camión tiene que pasar por los siguientes procesos.

- Lavado interior: Se lavará el interior de la cuba del mixer, eliminando cualquier resto de producto sobrante del camión.
- Lavado exterior: Es una limpieza superficial de la carrocería del camión.
- Báscula 1: Pesaje del mixer antes de recibir el material
- Mezcla: En este proceso se realiza un pesaje y mezclado de materias primas para luego verter el material resultante al camión.
- Báscula 2: Pesaje del mixer después de recibir material
- Calidad: Controles de calidad del camión previo al despacho.

Los procesos mencionados en el punto anterior se colocan en la planta de acuerdo con el esquema de la Figura 5.6.

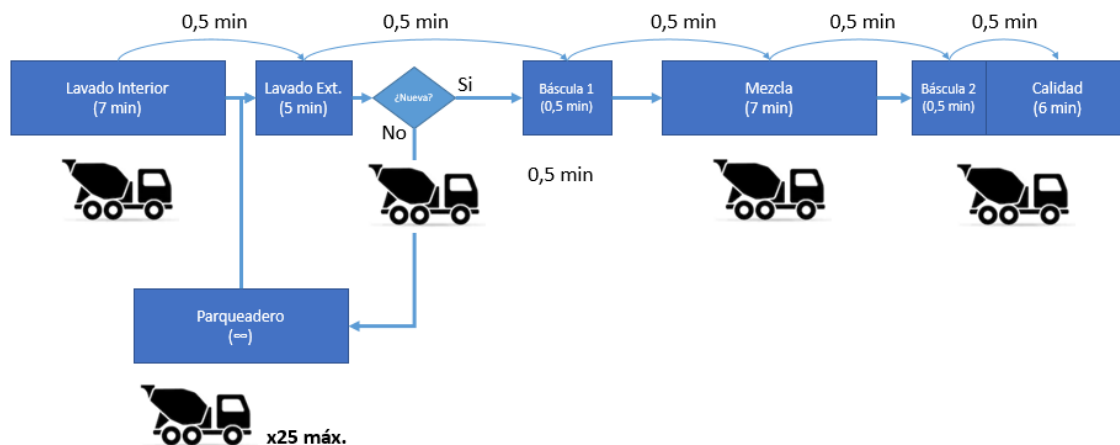


Figura 5.6 Esquema de la línea de producción con recuperación para lavado. Fuente: propia.

Al estar situados de manera continua, el camión transita de manera directa de un proceso al siguiente proceso que le corresponde. La planta se divide en 5 estaciones con un tiempo de ciclo de 7,5 min/camión, como se muestra en la Figura 5.7. El tiempo de transición de proceso a proceso a lo largo de la línea, será de 30 segundos. A una tasa de producción de 8 camiones/h (56 m³/h), un 93% de la capacidad instalada.

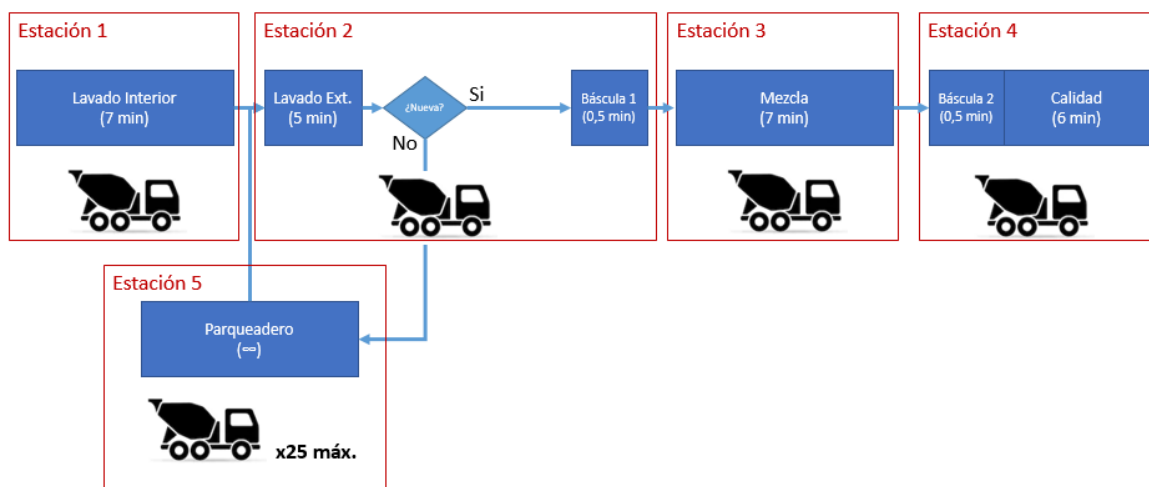


Figura 5.7 Estaciones de la línea de producción. Fuente: propia.

En los siguientes apartados se explicará el funcionamiento de cada una de las estaciones.

5.2.1. Estación 1

La primera estación contemplará 2 procesos la entrada y el lavado interior del camión mixer:

Entrada

En la Figura 5.8, se observa como al ingresar desde la vía pública, el camión se coloca en un parqueadero de espera lineal para ingresar a la línea de producción cuando quede libre la entrada. En esta estación se deberá ajustar la canaleta en posición, para verter el material sobrante en el siguiente paso. La entrada a esta estación solo es posible desde la vía pública ya que los camiones que vengan del parqueadero ingresarán directamente a la estación 2.

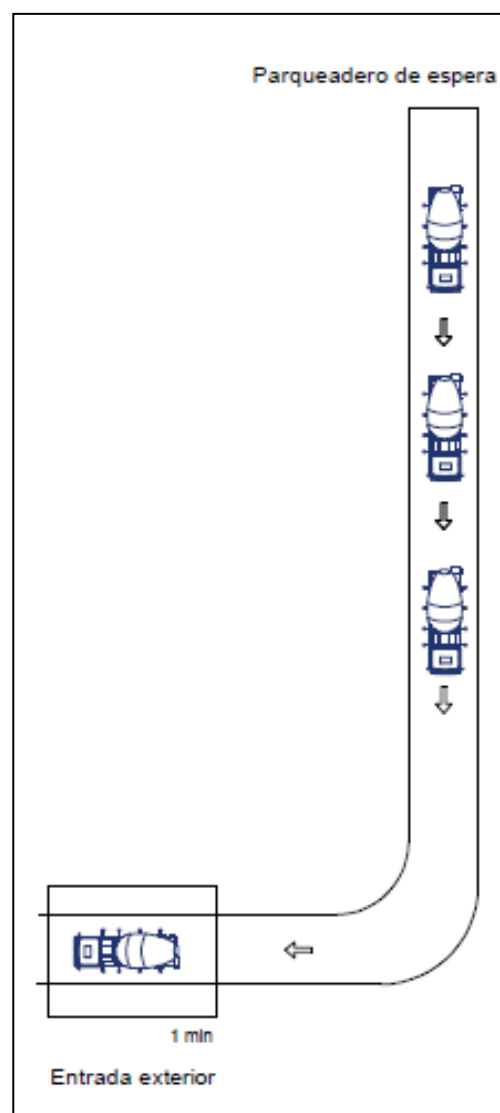


Figura 5.8 Entrada de la línea de producción Fuente: propia.

Lavado interior y recuperación de desperdicios

El lavado interior se refiere a la limpieza necesaria dentro de la cuba que se tiene que realizar luego de cada entrega, para esto se necesitan entre 0,7 y 1,3 m³ de agua [13], el proceso utiliza aire comprimido para enviar el agua desde el depósito del camión hacia el interior de la cuba, pasando a través de una serie de boquillas ubicadas en ángulos estratégicos, facilitando el cubrimiento de todas las zonas afectadas por los residuos de concreto. Este sistema fue desarrollado por Pedraza et al. [14] y se puede ver en la Figura 5.9, su utilización dio como resultado, una disminución del riesgo ocupacional padecido por los operadores de camiones mixers en su operación diaria de carga y descarga de hormigón, ya que no tienen que subir a la plataforma de acceso trasero para lavar la boca de la cuba y la punta externa del embudo de carga. Al final del proceso se obtiene una mezcla líquida fácil de verter, ideal para aplicar técnicas que nos permitan reutilizar los materiales que formaban parte del hormigón original.



Figura 5.9 Sistema de lavado integrado. Fuente: [14, p. 13].

Específicamente, existen 4 estrategias para la reutilización de los materiales desechados por las plantas de hormigón según el estudio de Dongxing [15, p. 240].

- Reciclaje para elaboración de productos prefabricados (bloques, adoquines, etc.)
- Reutilización directa de mezcla en nuevos productos.
- Reutilización como agregado luego del fraguado del hormigón devuelto.
- Recuperación por lavado.

Las tres primeras estrategias buscan reutilizar el hormigón devuelto directamente en distintas formas, pero los resultados no fueron prometedores, el producto elaborado con el material reciclado resultaba ser de menor calidad, se obtuvieron resistencias bajas y muy variadas para un mismo diseño, también se evidenció que las mezclas tenían una baja trabajabilidad,

lo que implicaba agregar aditivos, incrementando su costo.

En cambio la cuarta estrategia, de recuperación por lavado, reutiliza cada elemento del hormigón de formas diferentes. Separa el agregado para reusar en nuevas mezclas, el agua se reutiliza en otros lavados y el resto como sustituto de cemento en otras mezclas. Los resultados fueron más alentadores por lo que se utilizará la recuperación por lavado en el proyecto.

Para poder implementar este método, el camión debe llegar a planta en un tiempo no mayor a 25 minutos, aunque puede permitirse un margen de 10 minutos más dependiendo si el hormigón en cuestión lleva aditivo retardante. En caso de que el camión se demore más de lo estimado o no se pueda extraer completamente el hormigón residual, se re direcciona al vehículo hacia el parqueadero para un lavado más minucioso.

Al llegar el camión el sistema integrado empieza el lavado, formando una mezcla entre el agua y el hormigón sobrante, esta mezcla se vierte por una malla, separando los agregados y dejando el resto de componentes caer en una piscina de sedimentación como la indicada en la Figura 5.10, aquí se separan aceites, agua y pasta gris (desecho de hormigón), se puede ver el proceso en la Figura 5.11. El agua pasa hasta la quinta piscina, mientras el aceite se queda en la primera y la pasta gris en tanto en la primera como en la segunda.

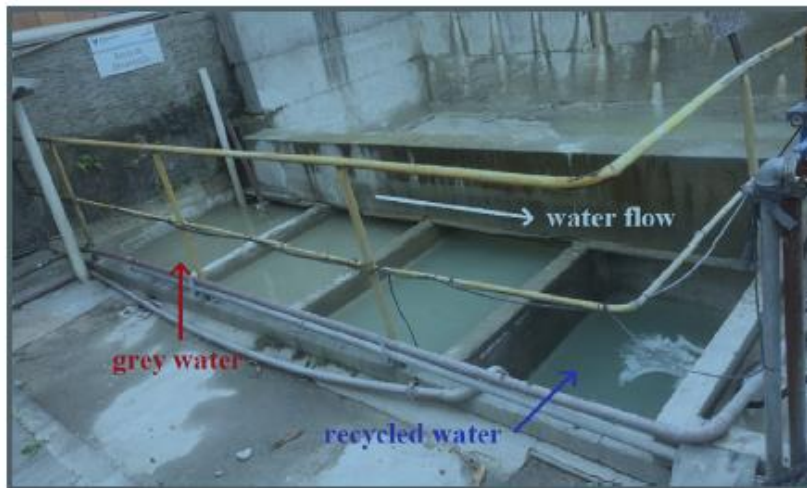


Figura 5.10 Poso de sedimentación de una planta de hormigón.

Fuente: [16].

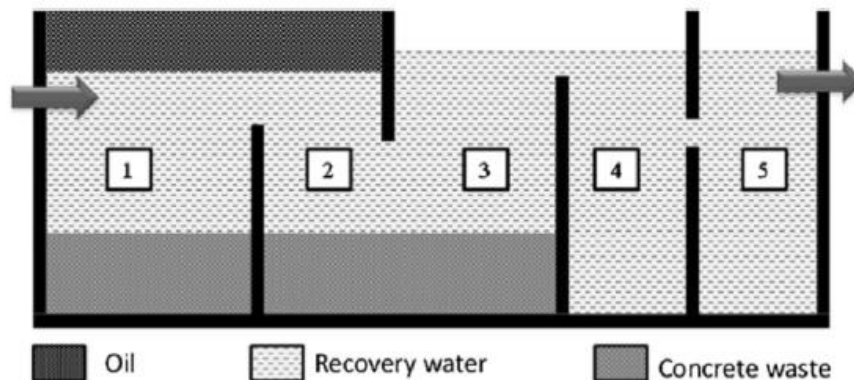


Figura 5.11 Proceso decantador para sedimentación de aguas grises. Fuente: [17, p. 3].

Con este método, se recupera el 100% de la piedra para su reutilización, la mezcla sedimentada de material cementante y arena también puede ser usada en nuevos productos luego de que se fragüe, finalmente el agua recuperada luego del proceso de sedimentación es utilizada para nuevos procesos de lavado y también para nuevas mezclas considerando los efectos respecto a las propiedades del hormigón. En el esquema de la Figura 5.12, se muestra la ubicación de los materiales recuperados respecto a la línea de producción, estarán cerca de su área de almacenamiento, se empleará de una pala mecánica para su traslado.

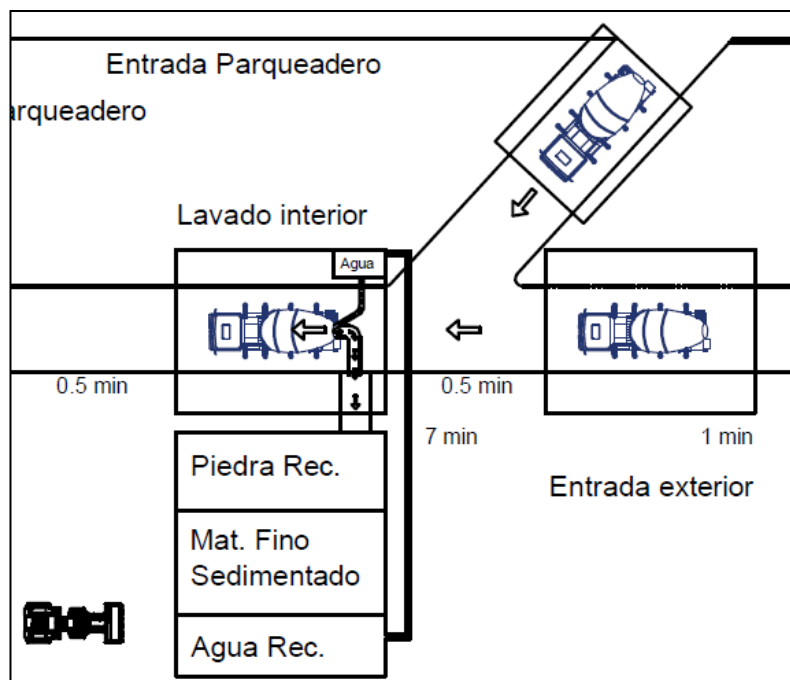


Figura 5.12 Estación 1, Lavado interno y recuperación. Fuente: propia.

El tiempo del camión en esta sección se espera que sea de 7 minutos, el sistema integrado no tardará más de 2 minutos en limpiar el interior de la cuba, tomará otros 2 minutos revisar el interior de la cuba para controlar el proceso y finalmente 3 minutos recargar los tanques de agua y aire del camión.

5.2.2. Estación 2

Aquí se juntan 3 procesos, un lavado exterior, el remojo interior y el pesaje como se ve en la Figura 5.13. En esta estación está una entrada y una salida de la línea, ambas conectadas al parqueadero de mixers, los camiones entran o salen en función de las ordenes en cola del momento.

Para el caso que un camión venga del parqueadero, ingresa a la línea para realizar el proceso de lavado exterior que tiene una duración de 5 minutos, es sólo superficial para eliminar polvo o cualquier resto de hormigón fresco que quede, se aplica un proceso automatizado similar al que se implementó en Zaragoza en 2019 [18], donde se instaló un lavado automático para camiones que tarda de 5 a 10 minutos dependiendo del tipo de camión, el método tradicional en comparación puede tardar hasta 40 minutos. La única diferencia es la implementación de una manguera adicional, que ingresa agua dentro de la cuba para el remojo.

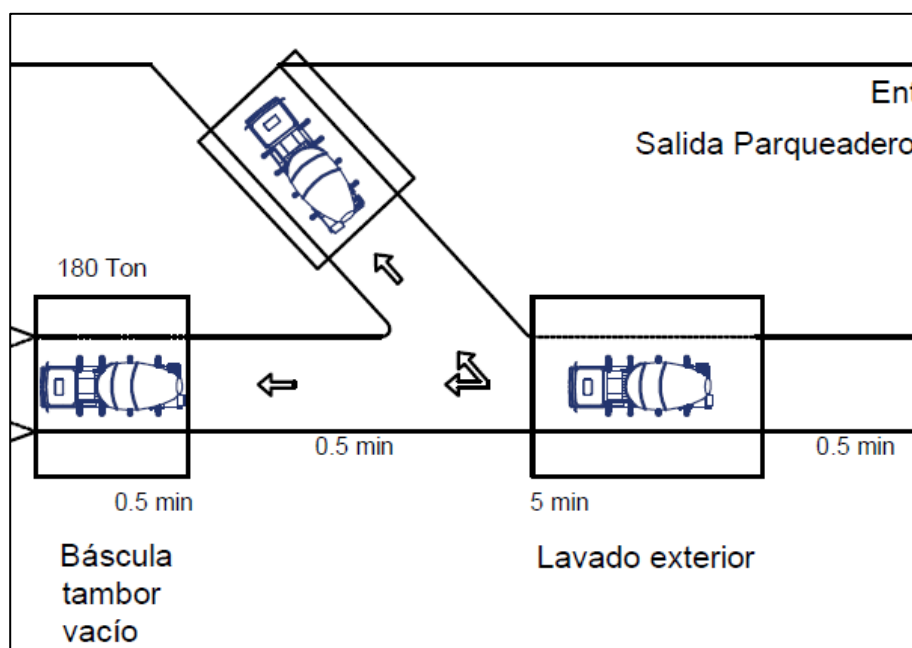


Figura 5.13 Estación 2, Lavado exterior, remojo y pesaje. Fuente: propia.

El siguiente proceso es remojar el interior de la cuba con una cantidad no superior a $0,5 \text{ m}^3$, devuelve el agua y pasa al pesaje, medida de control para el control de producción, los procesos tardan 30 segundos cada uno.

5.2.3. Estación 3

Para esta estación únicamente se considera el proceso de mezclado y vertido, desde la planta hacia el mixer, con los materiales pesados previamente. Como se ve en la Figura 5.14, se tienen dos tolvas para dosificar las materias primas de manera independiente, la línea se divide en dos, un carril para cada tolva, esto da mayor agilidad a la línea de producción en caso de mantenimiento o bien de alta demanda.

El cemento y los aditivos se vierten directamente a la cuba desde los puntos de almacenamiento mediante un sistema automatizado. Los agregados son transportados mediante una pala mecánica desde el almacenamiento hasta las tolvas, cada una puede cargar hasta 25 m^3 de cada agregado, esto es aproximadamente 30 toneladas de piedra y 38 de arena.

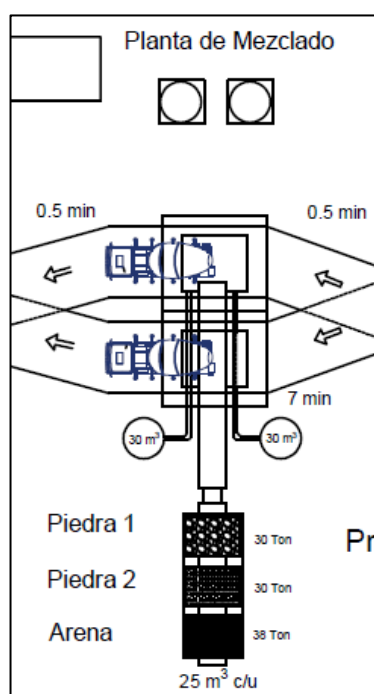


Figura 5.14 Estación 3, Planta dosificadora.
Fuente: propia.

Mezclado

La arena y el ripio se colocan en la cinta transportadora para llevarlos a la tolva, mediante un software, cada componente es pesado según la dosificación deseada, de igual forma con el cemento, el agua y los aditivos, aunque estos se los lleva por tuberías a presión en lugar de cintas transportadoras, el siguiente paso es mezclar los materiales directamente en la cuba del camión mixer. El camión se posiciona debajo de la tolva dosificadora, el material se vierte

en la cuba mientras gira en sentido horario a velocidad de mezclado, entre 12 y 18 rpm, durante 7 minutos.

La producción de hormigón depende principalmente del equipo del operador de la planta, la metodología de colocación aplicada por el contratista y los horarios individuales de cada uno de estos, así como su respectiva coordinación.

5.2.4. Estación 4

El esquema se presenta en la Figura 5.15, aquí el camión mixer es inspeccionado, primero se realiza el pesaje de igual forma que en la estación 2, luego pasa a la sección de control de calidad del material, se toma la presión interna del mixer y cuando se requiera se toma una muestra, en estos casos, se vierte un poco por la canaleta hacia un costado de la línea donde los técnicos puedan realizar los ensayos correspondientes.

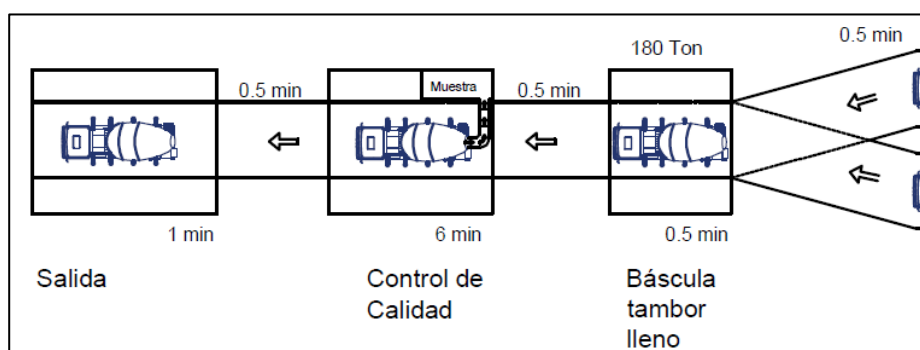


Figura 5.15 Estación 4, pesaje, control de calidad y salida. Fuente: propia.

Finalmente, con los indicadores revisados, se da la aprobación para su salida, se guarda la canaleta y se sella con un collar de plástico, se lava rápidamente la parte externa del camión con agua limpia, y sale de planta.

5.3. Distribución en planta

La distribución orientada a producto diseñada para la nueva planta se muestra en la Figura 5.16. Esta organización reduce la manipulación de materiales y el tiempo desde el inicio de la producción hasta la obtención del producto, hace que tanto la programación como los procesos individuales sea más sencilla.

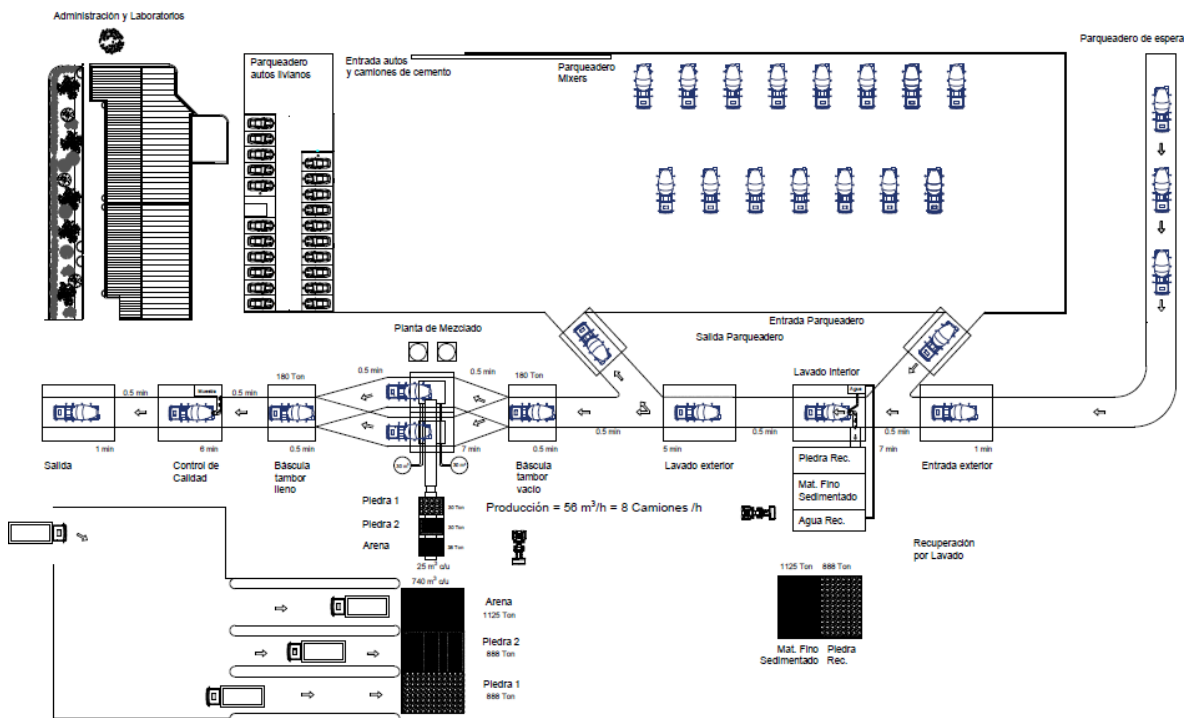


Figura 5.16 Plano de la línea de producción, para la nueva planta. Fuente: propia.

En comparación al diseño de la planta actual mostrado en la Figura 5.17, el nuevo diseño analiza los diferentes procesos por los que el camión mixer tiene que pasar y los reorganiza en una sola línea de flujo para establecer una distribución en planta que minimiza los desplazamientos. Se ve en el diagrama de recorrido de la Figura 5.18 que el movimiento es más directo y limpio a través de la planta.

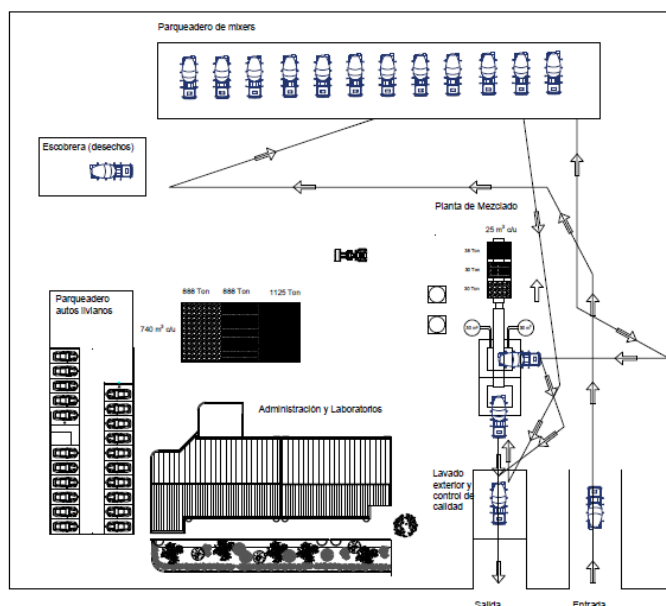


Figura 5.17 Diagrama de recorrido de la planta actual. Fuente: propia.

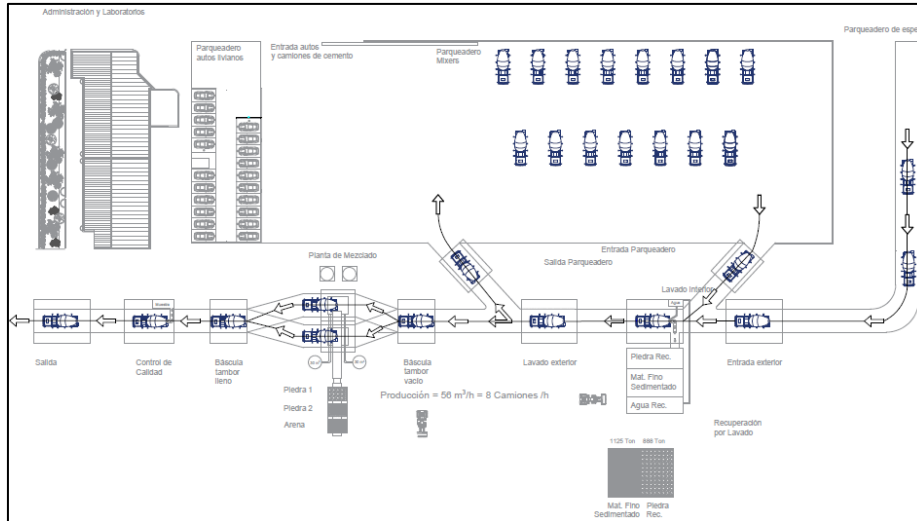


Figura 5.18 Diagrama de recorrido de la nueva planta. Fuente: propia.

6. Impacto Ambiental

El tratamiento de residuos de hormigón juega un papel fundamental en el impacto ambiental de la industria. La cantidad generada de estos varía de región en región acorde a la Figura 6.1, la variación se da por la calidad de los procesos de construcción en obra, para el proyecto vamos a suponer que se devuelve el 9% de la producción, ya que el desarrollo tecnológico de Quito es similar al de Brasil, este porcentaje toma en cuenta tanto a los restos de hormigón que quedan en la cuba luego de una entrega, como también a las devoluciones realizadas por parte del cliente.

Countries/regions	Level of returned fresh concrete waste by weight	
	Average Level	Range and Reference
Italy	1.4%	0.9–1.8%(Sandrolini and Franzoni, 2001)
Japan	1.5%	1.0–2.0% (Iizuka et al., 2012a)
Hong Kong	1.5%	≈ 1.5%(Tam and Tam, 2007)
Denmark	2.0%	1.0–3.0% (Nielsen and Glavind, 2007)
Europe	2.5%	1.0–4.0 % (Correia et al., 2009)
Mauritius	2.5%	1.0–4.0% (Rughooputh et al., 2016)
USA	6.0%	2.0–10% (Obla et al., 2007)
Brazil	9.0%	≈ 9.0% (Correia et al., 2009)

Figura 6.1 Nivel de hormigón premezclado devuelto en varias regiones.

Fuente: [15, p. 239].

Implementar un sistema de recuperación, busca disminuir los daños causados al medioambiente producto de la generación de escombros, para medir el impacto ambiental del proyecto se analizará la huella de carbono generada en la nueva y en la actual planta, también se describirá cómo será el manejo de los sólidos y el aprovechamiento del agua durante el proceso productivo.

6.1. Huella de carbono de la planta actual

Para realizar la cuantificación de la huella de carbono, se toma una unidad funcional de fabricación de un m³ de hormigón, de acuerdo con las dosificaciones que se utilizan, en este caso se utilizará el promedio de cantidad usada de cada material, la Tabla 1 indica las dosificaciones para elaborar 7 m³ de cada mezcla:

δ (kg/m ³)	1000		3070		1550		1190	
RESISTENCIA	AGUA		CEMENTO		ARENA		RIPIO	
MPa (Tam.máx)	kg	m ³	kg	m ³	kg	m ³	kg	m ³
14 (1/2")	1298,0	1,30	1369,2	0,45	6661,1	4,30	6410,1	5,39
18 (1/2")	1298,5	1,30	1559,0	0,51	6467,2	4,17	6449,5	5,42
21 (3/4")	1299,2	1,30	1849,7	0,60	6170,0	3,98	6510,0	5,47
21 (1/2")	1202,4	1,20	1668,5	0,54	5574,0	3,60	7496,0	6,30
28 (3/4")	1300,1	1,30	2229,8	0,73	5781,6	3,73	6589,0	5,54
28 (1/2")	1202,2	1,20	2009,0	0,65	5217,5	3,37	7578,0	6,37
35 (1/2")	1301,6	1,30	2867,5	0,93	5129,8	3,31	6721,6	5,65
Promedio	1271,7	1,3	1936,1	0,6	5857,3	3,8	6822,0	5,7

Tabla 1 Dosificaciones utilizadas en la planta actual para 7 m³. Fuente: propia.

Para cada material se tienen las emisiones de CO₂ equivalentes por cada KWh de energía eléctrica necesaria para su extracción y procesamiento. Estos datos son tomados de [19] y se presentan en la Tabla 2. La planta actual utiliza aditivo BASF MasterClast 560 que se utiliza en una dosis del 0,5% de la cantidad de cemento, también basándose en [20], se establece que se necesitan 0,00896 KWh/kg de hormigón fabricado. Se obtiene que la fabricación de hormigón genera una cantidad total de 276 kg de CO₂e.

Material	t CO ₂ e/tmaterial o KWh	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg o KWh)	kg CO ₂ e
Agua	0,0001941	181,7	0,04
Cemento Portland	0,95	276,6	262,76
Agregado Fino	0,0051	836,8	4,27
Agregado Grueso	0,00752	974,6	7,33
Aditivo	1,17	1,4	1,62
Electricidad	0,000332	0,00896	0,000003

Tabla 2 Cálculo de la huella de carbono. Fuente: [19].

6.2. Huella de Carbono de la planta con recuperación por lavado

La huella de carbono del proceso productivo, cuando se incluye el sistema de recuperación por lavado, se distingue para dos productos: el primero para hormigón estructural y el segundo para hormigón no estructural, esto debido a que se reutilizan diferentes materiales recuperadas para cada una de estas.

6.2.1. Hormigón estructural

Para la elaboración de hormigón estructural se utiliza el 100% de agregado grueso recuperado, lo que significa una reducción del 9% de agregado grueso nuevo, la huella de carbono del agregado recuperado se la considera despreciable, a continuación se detallan los kg de CO₂e en la Tabla 3.

Material	t CO ₂ e/tmaterial o KWh	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg o KWh)	kg CO ₂ e
Agua	0,0001941	181,7	0,04
Cemento Portland	0,95	276,6	262,76
Agregado Fino	0,0051	836,8	4,27
Agregado Grueso	0,00752	886,9	6,67
Agregado Recuperado	0	87,7	0,00
Aditivo	1,17	1,4	1,62
Electricidad	0,000332	0,0	0,000003

Tabla 3 Cálculo de la huella de carbono de la producción de HPM con agregado recuperado
Fuente: propia.

En total la producción de hormigón genera 275,35 kg CO₂e. Comparado con la planta actual la reducción no es significativa ya que baja menos del 0,5%.

6.2.2. Hormigón no estructural

Para este caso además del uso de agregado reciclado se utilizará la pasta gris como pasta cementante reduciendo la cantidad de cemento por mezcla, reduciendo en promedio un 29% la huella de carbono. A continuación, se detallan los kg de CO₂e en la Tabla 4.

Material	t CO ₂ e/tmaterial o KWh	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg o KWh)	kg CO ₂ e
Agua	0,0001941	181,7	0,04
Cemento Portland	0,2755	276,6	76,20
Agregado Fino	0,0051	836,8	4,27
Agregado Grueso	0,00752	886,9	6,67
Agregado Recuperado	0	87,7	0,00
Aditivo	1,17	1,4	1,62
Electricidad	0,000332	0,00896	0,000003

Tabla 4 Cálculo de la huella de carbono de la producción de HPM, con recuperación por lavado. Fuente: propia.

En total se obtiene que la producción cada m^3 de HPM produce 88,79 kg CO_2e . Lo que significa una reducción del 67% respecto a los 276 kg CO_2e de la planta actual. sin embargo, no hay que olvidar que este beneficio solo se lo obtiene en la producción de hormigón no estructural.

6.3. Manejo de sólidos

Entre los desechos sólidos generados tanto por el proceso productivo como por las devoluciones, se tienen los que se describen en la Figura 6.2. Estos últimos tienen que ser separados mediante el proceso de sedimentación de la estación 1.



Figura 6.2 Proceso de generación de desechos de hormigón fresco (A), pasta gris deshidratada (B), desecho de hormigón fresco (C). Fuente: [21].

6.3.1. Recuperación de agregado grueso (3/4" y 1/2")

En cuanto al rendimiento de estos materiales, el hormigón elaborado con un 100% de piedra recuperada presenta propiedades similares a aquellos hechos en los que se utilizó agregado nuevo [17, p. 15]. En Australia, es permitido usar el 100% de agregados recuperados en hormigones con resistencia de hasta 320 kg/cm^2 [22].

6.3.2. Recuperación de pasta gris

La pasta gris se recolecta del fondo de los 3 primeros pozos y se deshidrata para usarla como pasta cementante como medio de captura de CO_2 durante un régimen de curado de CO_2 ,

acorde al procedimiento descrito en [23, p. 671]. La mezcla de hormigón preparada con pasta gris, rápidamente gana resistencia en unas pocas horas y sufre una menor contracción por secado a largo plazo. Debido a la falta de estudios del uso de la pasta gris en hormigón su uso es exclusivo para hormigones que estén destinados a un uso no estructural, es decir, que no aportan responsabilidad estructural a la construcción pero que colaboran en mejorar las condiciones durables del hormigón estructural o que aportan el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado.

6.4. Manejo de Agua

El agua necesaria para lavar los camiones mixers y recuperar material, puede ser tomada de las mismas piscinas de sedimentación, ya que en la última sección está lo suficientemente limpia para su empleo en estas actividades, sin embargo, su uso debe ser limitado a procesos que no formen parte de la elaboración de nuevas mezclas de hormigón, si bien esto es un mejor aprovechamiento del material y un punto muy importante al momento de promocionar al producto como ecológico, lo cierto es que el uso de esta agua genera variaciones muy grandes en las propiedades del producto final. Aunque se ha comprobado que dichas dudas no están bien fundamentadas ya que la resistencia no se afecta en más del 4 % a la resistencia y tienen efectos menores en otras propiedades [13, p. 488], los clientes no suelen tener un buen concepto de la resistencia de hormigón elaborado con agua reciclada porque en la mayoría de los casos su pH suele ser demasiado alto en relación al máximo permitido por la normativa [24, p. 8]. Además, el uso de aguas residuales para la fabricación de hormigón no se ha generalizado debido a la necesidad de invertir en nuevas instalaciones, el requisito de control de calidad de las mismas y las normativas locales conservadoras que rigen la producción de hormigón estructural [15, p. 243].

7. Beneficio económico

Al recuperar y reutilizar los materiales de las mezclas devueltas y de los residuos de hormigón en las cubas, se logra un ahorro por cada m³ de producción, esto menos los costos de inversión, operación y mantenimiento, traerá un beneficio a la compañía en un horizonte determinado. A continuación, se realiza el cálculo de los costos y ahorros generados por el proyecto para poder determinar su rentabilidad.

7.1. Costo de la implementación de Recuperación de agregados

El costo de construcción en Ecuador de una piscina se encuentra entre \$ 400 y \$ 600 el m² [25], se puede estimar que el costo de la construcción para la recuperación de agregados sería de \$ 480 el m², ya que necesita de menores acabados que una piscina normal. Tomando en cuenta que el tamaño del sistema es de 512 m², el coste de inversión sería de \$ 245 760,00. Adicionalmente se necesita del tiempo de un ingeniero y dos técnicos, que realicen las actividades de operación y mantenimiento (O y M), como se muestra en la Tabla 5.

Personal	Costo x hora	Tiempo al mes (h)	Costo Mensual	Costo Anual
Ingeniero	\$ 7,00	8	\$ 56,00	\$ 672,00
Técnico x2	\$ 6,00	64	\$ 384,00	\$ 4608,00
Costo de O y M			\$ 440,00	\$ 5280,00

Tabla 5 Costo de operación y mantenimiento del sistema de recuperación de agregados. Fuente: propia.

7.2. Recuperación de Agregado Grueso

El proyecto permite ahorrar costos de materia prima, tanto de adquisición como de transporte, al reutilizar el agregado en nuevas mezclas. El cálculo del costo de cada m³ de hormigón fabricado con y sin material recuperado se lo detallan en la Tabla 6 y en la Tabla 7, se utilizan los precios establecidos por la cámara ecuatoriana de la construcción y el promedio de las cantidades necesarias para la elaboración del hormigón de la Tabla 1:

Material	\$ por tonelada	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg)	Costo
Agua	\$ 1,33	181,7	\$ 0,24
Cemento Portland	\$ 120,00	276,6	\$ 33,19
Agregado Fino	\$ 3,84	836,8	\$ 3,22
Agregado Grueso	\$ 8,40	974,6	\$ 8,18
Agregado Recuperado	\$ -	1,4	\$ -
Aditivo	\$ 2,70	1,4	\$ 0,00
Costo de materia prima para 1 m³ sin agregado grueso recuperado			\$ 44,83

Tabla 6 Cálculo para del costo de 1 m³ sin agregado grueso recuperada. Fuente: propia.

Material	\$ por tonelada	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg)	Costo
Agua	\$ 1,33	181,7	\$ 0,24
Cemento Portland	\$ 120,00	276,6	\$ 33,19
Agregado Fino	\$ 3,84	836,8	\$ 3,22
Agregado Grueso	\$ 8,40	87,7	\$ 0,73
Agregado Recuperado	\$ -	886,9	\$ -
Aditivo	\$ 2,70	1,4	\$ 0,00
Costo de materia prima para 1 m³ con agregado grueso recuperada			\$ 37,38

Tabla 7 Cálculo para del costo de 1 m³ sin agregado grueso recuperada. Fuente: propia.

El ahorro por cada m³ de hormigón elaborado con agregado reciclado es de \$ 7,45. Un 15% más barato.

7.3. Pasta Gris

Siguiendo el procedimiento descrito por Xuan et al. [23, p. 241], se reemplaza el 85 % del cemento con pasta gris. La cantidad de cemento utilizada se reduce de 276 a 41 kg por cada m³ de hormigón no estructural. Considerando un precio de \$ 120 por tonelada de cemento, el costo de hormigón estructural se reducirá en \$ 28. Lo que lleva a una reducción en el costo de las materias primas del hormigón no estructural de \$ 44,84 a \$ 16,62 como se indica en la Tabla 8 y la Tabla 9, esto es un 63% más barato.

Material	\$ por tonelada	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg)	Costo (\$)
Agua	\$ 1,33	181,7	\$ 0,24
Cemento Portland	\$ 120,00	276,6	\$ 33,19
Agregado Fino	\$ 3,84	836,8	\$ 3,21
Agregado Grueso	\$ 8,40	974,6	\$ 8,19
Agregado Recuperado	\$ -	0,0	\$ -
Aditivo	\$ 2,70	1,4	\$ 0,00
Costo de materia prima para 1 m³ sin pasta gris			\$ 44,84

Tabla 8 Cálculo para del costo de 1 m³ sin pasta gris. Fuente: propia.

Material	\$ por tonelada	Cantidad usada por m ³ de hormigón (kg)	Costo (\$)
Agua	\$ 1,33	181,7	\$ 0,24
Cemento Portland	\$ 120,00	41,5	\$ 4,98
Agregado Fino	\$ 3,84	836,8	\$ 3,21
Agregado Grueso	\$ 8,40	974,6	\$ 8,19
Agregado Recuperado	\$ -	-	\$ -
Aditivo	\$ 2,70	1,4	\$ 0,00
Costo de materia prima para 1 m³ con pasta gris			\$ 16,62

Tabla 9 Cálculo para del costo de 1 m³ con pasta gris. Fuente: propia.

7.4. Rentabilidad del proyecto

La rentabilidad depende de cuánto hormigón se puede elaborar con el material recuperado, ya que las nuevas mezclas usan la misma cantidad de agregado que el existente en el producto devuelto, el total de hormigón que se puede fabricar con agregado recuperado es igual a la cantidad de hormigón devuelto es decir un 9% de la producción. A partir de una previsión de demanda, dada por la empresa para los siguientes 3 años, se calcula la cantidad de producto devuelto. El proyecto permite ahorrar \$ 7,45 en agregado grueso, al no tenerlo que transportar desde la mina, también se ahorra el costo de transporte que según la cámara ecuatoriana de la construcción está en \$ 11 el m³ y finalmente al no necesitar de una zona de escombros, la empresa se ahorra el tratamiento de los mismos, un total de \$ 1,12 por cada m³, según un reportaje de diario El Comercio [26]. De no tener el sistema de recuperación la cantidad de escombros generados sería igual a la del hormigón devuelto, por lo que para determinar el ahorro de escombros se multiplica el costo de tratamiento por la cantidad devuelta. Se detallan los cálculos en la Tabla 10.

Año	2021	2022	2023
Previsión de Demanda (m ³)	79 443	77 999	76 551
Devuelto esperado (m ³)	7 150	7 020	6 890
Ahorro de Agregado por m ³	\$ 7,45	\$ 7,45	\$ 7,45
Ahorro de Transporte por m ³	\$ 11,00	\$ 11,00	\$ 11,00
Ahorro por materia prima	\$ 131 915,10	\$ 129 517,34	\$ 127 112,94
Tratamiento del m ³ de escombros	\$ 1,12	\$ 1,12	\$ 1,12
Ahorro por escombros	\$ 8.007,85	\$ 7 862,30	\$ 7 716,34
Ahorro Total	\$ 139 922,96	\$ 137 379,64	\$ 134 829,28

Tabla 10 Cálculo del ahorro total generado por el procedimiento de recuperación por lavado
Fuente: propia.

Una vez calculado el ahorro total que el sistema generará, se determina la rentabilidad del proyecto mediante el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), dos indicadores de la rentabilidad.

El VAN es la suma actualizada de los flujos de tesorería a lo largo del horizonte del proyecto, se lo calcula de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{Q_t}{(1+i)^t}$$

(Ec. 7.1)

Donde:

T = Inversión con un horizonte de evaluación

t = Periodo

Q_t = flujo de tesorería en el periodo t

i = Tasa de interés

El TIR en cambio, es un indicador de rentabilidad relativa, su valor es la tasa de interés necesaria para que el VAN sea igual a 0.

Para el cálculo en cuestión se tendrá un horizonte de 3 años. Con una inversión inicial de \$ 245 760 y una tasa de interés anual de 10 %, esta última es la utilizada por bancos ecuatorianos para la emisión de préstamos empresariales [27].

Los resultados mostrados en la Tabla 11, indican un valor del VAN positivo y de TIR mayor a la de tasa de interés utilizada, lo que quiere decir que el proyecto resulta rentable en el horizonte planteado y que a partir del 4to año se empezarán a generar ganancias de aproximadamente de \$ 130 000 anuales producto del ahorro de adquisición y transporte de materia prima, así como también del hecho de no tener que costear un proceso de tratado de escombros.

Interés	10%			
Concepto	Horizonte			
	0	1	2	3
Inversión	\$ -245 760,00			
Mantenimiento		\$ -5 280,00	\$ -5 280,00	\$ -5 280,00
Total Pagos	\$ -245 760,00	\$ -5 280,00	\$ -5 280,00	\$ -5 280,00
Ahorro total*		\$ 139 922,96	\$ 137 379,64	\$ 134 829,28
Movimiento de Fondos	\$ -245 760,00	\$ 134 642,96	\$ 132 099,64	\$ 129 549,28
VAN i	\$ -245 760,00	\$ 122 402,69	\$ 109 173,26	\$ 97 332,29
Beneficio	\$ -245 760,00	\$ -123 357,31	\$ -14 184,06	\$ 83 148,23

VAN	TIR
83 148,23 €	17%

Tabla 11 Cálculo del VAN y del TIR. Fuente: propia.

* según cálculo de la Tabla 10

8. Presupuestos

Se mostrarán los presupuestos necesarios tanto para la construcción de la planta, como para la elaboración del presente proyecto.

8.1. Nueva planta

El presupuesto se detalla en la Tabla 12. Los valores están expresados en dólares americanos al ser la moneda local del país del proyecto. El costo por unidad se basa en los datos de la CAMICON [28].

Presupuesto de la nueva planta				
Detalle	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo
Oficinas y Laboratorio	1 814	m ²	\$ 800,00	\$ 1 451 200,00
Zona Pavimentada	16 167	m ²	\$ 360,00	\$ 5 820 120,00
Estación de recuperación por lavado	512	m ²	\$ 480,00	\$ 245 760,00
Estación de lavado exterior	1	u	\$ 1 080 000,00	\$ 1 080 000,00
Estación de control de calidad	200	m ²	\$ 420,00	\$ 84 000,00
Planta dosificadora RMC	1	u	\$ 144 000,00	\$ 144 000,00
Básculas	2	u	\$ 7 200,00	\$ 14 400,00
Equipos de laboratorio	1	u	\$ 90 000,00	\$ 90 000,00
Pala mecánica	2	u	\$ 36 000,00	\$ 72 000,00
Camión Mixer	29	u	\$ 54 000,00	\$ 1 566 000,00
			TOTAL	\$ 10 567 480,00

Tabla 12 Presupuesto total de la nueva planta. Fuente: propia.

8.2. Proyecto

La elaboración de este proyecto tuvo los siguientes costos:

8.2.1. Recursos humanos

- Costo de la hora del estudiante, considerando un costo de 20 € la hora, durante 420 horas.
- Costo de la hora del tutor, considerando un costo de 50 € la hora, durante 8 sesiones de consulta de una hora y 7 horas de correcciones, en total 15 horas.

Se detalla el valor de recursos humanos en la Tabla 13. En total se obtiene un costo de 9150,00 €.

Detalle	Costo por hora	Tiempo (hora)	Costo
Estudiante	€ 20,00	420	€ 8 400,00
Tutor	€ 50,00	15	€ 750,00
Costo Total			€ 9 150,00

Tabla 13 Costos de recursos humanos para el proyecto. Fuente: propia.

8.2.2. Recursos tecnológicos

Amortización del Computador portátil, considerando un precio de compra de 750 €, con una vida esperada de 5 años, uso del 50 % durante los 4 meses del proyecto.

Gastos de uso del software en un 50%, incluyendo paquete Microsoft Office con un costo de 150 €, Adobe PDF con costo de suscripción de 15 € al mes, no se incluye AutoCad 2020, ya que se utilizó la versión gratuita para estudiantes.

Gastos de uso de internet en un 60%, pagos mensuales de 80 € durante los 4 meses.

El costo de total de recursos tecnológicos es de 322,00 €, se lo detalla en la Tabla 14.

Detalle	Costo unitario	Uso	Tiempo (meses)	Vida (año)	Amortización	Costo
Computador Portátil	€ 750,00	50%	4	5	€ 50,00	€ 25,00
Software Microsoft Office	€ 150,00	50%	***	***	***	€ 75,00
Software Adobe PDF	€ 15,00	50%	4	***	***	€ 30,00
Internet	€ 80,00	60%	4	***	***	€ 192,00
Costo Total						€ 322,00

Tabla 14 Costos de recursos tecnológicos para el proyecto. Fuente: propia.

8.2.3. Costo total del proyecto

Considerando los costos humanos y tecnológicos en total el proyecto tiene un costo de 9 472 €, sumado el I.V.A. del 21% el costo final sería: **11 461,12 €**.

9. Planificación

La Figura 9.1, indica el tiempo necesario para completar el proyecto, en total será de 8 meses y medio.

Planificación Nueva Planta	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8				Mes 9			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Tramitación de permisos municipales	■	■	■	■																																
Preparación de Tierras					■	■	■	■	■	■	■	■																								
Preparación de instalaciones sanitarias						■	■	■	■	■	■	■																								
Preparación de instalaciones eléctricas									■	■	■	■																								
Construcción de oficinas													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Construcción de laboratorio													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Compra y entrega de equipos de laboratorio													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Calibración de equipos de laboratorio																					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Losa para la planta													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Construcción de Parqueadero																																				
Instalación de la planta dosificadora																																				
Calibración de la planta dosificadora																																				
Pruebas de mezclas																																				
Compra y entrega de la estación de recuperación																																				
Compra y entrega de la estación de lavado exterior																																				
Compra y entrega de Básculas																																				
Instalación de la estación de recuperación																																				
Instalación de la estación de lavado exterior																																				
Instalación de Básculas																																				
Compra y entrega de mixers y palas																																				

Figura 9.1 Planificación para el desarrollo de la nueva planta. Fuente: propia.

El desarrollo de este proyecto, está indicado en la Figura 9.2.

Planificación Proyecto	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Selección de Tema	■	■																		
Subscripción a revistas científicas			■																	
Investigación del estado del arte del HMC				■																
Investigación de la industria del HMMC							■													
Redacción de Capítulos 1-7								■												
Investigación de técnicas ecológicas de producción											■									
Diseño de la nueva planta												■								
Evaluación del flujo logístico															■					
Evaluación de beneficios económicos																■				
Evaluación de la huella de carbono																			■	
Redacción de Capítulos 7-14																				■
Correcciones																				■

Figura 9.2 Planificación para el desarrollo del proyecto. Fuente: propia.

Conclusiones

- El diseño de la nueva planta permitirá a que se puedan producir HPM a un 93% de la capacidad instalada, es decir 56 m³ por hora en las condiciones óptimas de operación, permite tener un flujo más ágil satisfaciendo de mejor manera las necesidades cambiantes de los clientes, producidas por las distintas dificultades del sector.
- El valor de positivo del VAR igual a 83 148,23 € y el TIR de 13%, superior a la tasa de interés utilizada, indican que el proyecto para la inclusión de un proceso de recuperación por lavado para la planta, es rentable, es posible recuperar la inversión del proyecto en 3 años, a partir del 4to año se estarán generando beneficios económicos a la planta de alrededor de \$ 130 000 anuales. Esto tomando únicamente en consideración reutilizar el agregado grueso, con lo que la reutilización del agua y la pasta gris en cualquier cantidad, dará beneficios adicionales tanto económica como ambientalmente.
- El impacto del uso de la pasta gris que llevo a generar una huella de carbono 67% más leve, y un costo económico 63% más bajo, respecto al producto convencional. Puede tener un gran beneficio económico como ambiental de emplearse en hormigón estructural, que es el producto principal, sin embargo, se necesitan realizar más estudios con el material local para implementar su uso a gran escala, por el momento solo podrá ser utilizado en hormigones no estructurales.
- La nueva ubicación brinda el beneficio adicional de estar más cerca de los proveedores de agregados, bajando el tiempo de viaje a la mitad, permitiendo reaccionar con una mayor agilidad en caso de ruptura de stock.
- Después del análisis se ve que en la industria del HPM, la sincronización y organización de la nueva planta con los constructores es fundamental para aprovechar la capacidad de producción y generar utilidades al final de la gestión, se sugiere el desarrollo de una investigación más profunda en lo que respecta al diseño de rutas y cronogramas para la entrega del producto en la ciudad de Quito.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] D. Sánchez de Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero*, Santa fé de Bogotá: Bhandar Editores Ltda., 2001.
- [2] A. Gursel, E. Masanet, A. Horvath y A. Stadel, «Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review,» *Cem. Concr. Comp.*, pp. 51, 38-48, 2014.
- [3] D. Vega y R. Parra, «Caracterización de la intensidad media diaria y de los perfiles horarios del tráfico vehicular del Distrito Metropolitano de Quito,» vol. 6, nº 2, 2014.
- [4] I. D. Tommelein y A. E. Yi Li, «Just-in-time Concrete Delivery: Mapping alternatives for vertical supply chain integration,» *University of California*, p. 101, 1999.
- [5] INEN 1855, «Hormigones. Hormigón premezclado. Requisitos,» Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, 2016.
- [6] C. Syverson, «Markets, Ready-Mixed Concrete,» *Journal of Economic Perspectives*, pp. 217-233, 2008.
- [7] A. G. Nellickal, A. V. Rajendra y S. Palaniappan, «A simulation-based model for evaluating the performance of ready-mixed concrete (RMC) production processes,» de *Living and Learning: Research for a Better Built Environment*, Melbourne, 2015.
- [8] C. Checa, Plan de mejora de la productividad en la planta de hormigón premezclado mediante el uso de la teoría de restricciones, Quito: Universidad de las Américas, 2018.
- [9] I. Ribas Vila, de *Descripció i Millora de processos*, Barcelona, 2019.
- [10] Huella Minera, «Fuerte apuesta de Holcim por la demanda de la construcción,» *Huella Minera*, 2017.
- [11] E. Claros, «Tratamiento de cemento a grandel,» Argos, 30 5 2020. [En línea]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/transporte-de-cemento-a-granel>. [Último acceso: 15 7 2020].

- [12] F. Ramirez y A. Samaniego, Estudio comparativo de los efectos sobre la resistencia a la flexión del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) usando macro fibras de acero DRAMIX RC-6535-BN y de polipropileno/polietileno TUF-STRAND SF, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [13] F. Sandrolini y E. Franzoni, «Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants,» *Cement and Concrete Research*, pp. 31(3), 485-489, 2001.
- [14] C. A. Pedraza Yepes, J. Durán Serpa y R. D. J. Galet Villafañe, «Implementación de un sistema de lavado en la tolva chutter de los camiones mixers,» *Espacios*, p. 2, 2018.
- [15] X. Dongxing, P. Chi Sun y Z. Wei, «Management and sustainable utilization of processing wastes from readymixed concrete plants in construction: A review,» *ELSEVIER Resources, Conservation & Recycling*, pp. 136, 238-247, 2018.
- [16] P. Matos, L. Prudencio Jr., R. Pilar, P. J. Paul Gleize y F. Pelisser, «Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties,» *Construction and Building Materials*, p. 230, 2020.
- [17] L. Vieira y A. de Figueiredo, «Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants,» *Waste Manage*, pp. 56, 337–351., 2016.
- [18] C. Ivars, «Llega a Zaragoza el primer lavado de camiones robotizado de Europa,» *Heraldo*, p. 1, 17 2 2019.
- [19] R. Agudo de Pablo, Estudio de nuevos hormigones ecoeficientes. Reología y comportamiento, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [20] L. Medina Romero, 6. Proceso de fabricación del hormigón, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [21] S. Kou, B. Zhan y C. Poon , «Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. Construction and Building Materials,» *Construction and Building Materials*, pp. 28, 549-556, 2012.
- [22] Cement Concrete and Aggregates Australia, «Use of Recycled Aggregates in Construction,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.ccaa.com.au..>
- [23] D. Xuan, B. Zhan, C. Poon y W. Zheng, «Carbon dioxide sequestration of concrete slurry waste and its valorisation in construction products,» *Construction and Buildings*

Materials, pp. 113, 664-672, 2016.

[24] J. Ferriz-Papi, «Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants,» vol. 64, nº 313, 2014.

[25] El Diario, «El costo de una piscina,» *El Diario*, 06 03 2017.

[26] E. Jácome, «En Quito hay 3 lugares autorizados para arrojar escombros; el incumplimiento se sanciona con USD 197,» *El Comercio*, 10 07 2019.

[27] BCE, «Tasas de interés,» Banco Central del Ecuador, Quito, 2020.

[28] CAMICON, «Manual de costos 2019,» 2019.

Bibliografía complementaria

1. M. Park, W.-Y. Kim, H.-S. Lee and S. Han, 2011, "Supply chain management model for ready mix concrete," *Automation in Construction*, pp. 44-55.
2. O. Al-Araidah, A. Momani, N. AlBashabsheh, N. Mandahawi and R. Fouad, 2012, "Costing of the Production and Delivery of Ready Mix Concrete," *JJMIE, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, pp. 163-173.
3. S. Moon, P. R. Zekavat and L. E. Bernold, 2017, "Dynamic Quality Control of Process Resource to improve concrete supply chain," *J. Constr. Eng. Manage.*, p. 143 (5).
4. S. Yan, H.-C. Lin and Y.-C. Liu, 2011, "Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete," *Automation in Construction*, pp. 1041-1050.
5. S. Yan, L. Weishen and M. Chen, 2006, "Production scheduling and truck dispatching of ready mi concrete," *Transportation Research Part E*, pp. 164-179.
6. J.-S. Chou and C. Ongkowitzo, 2013, "Reliability-based decision analysis for ready mixed concrete supply chain using stochastic method," *Proceedings of the 2013 IEEE IEEM*, pp. 968-974.
7. P. R. de Matos, L. R. Prudencio Jr., R. Pilar, P. J. Paul Gleize and F. Pelisser, 2020, "Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: Effect on the hydration, fresh and hardened properties," *Construction and Building Materials*.