

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ECONOMÍA
CIRCULAR EN UNA OBRA DE CONSTRUCCIÓN *LEAN***

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORAS:

ALEJANDRA NIKITA PALOMINO PANDO

NATALIA VERÓNICA MELÉNDEZ SOTO

ASESOR:

BRIOSO LESCANO, XAVIER MAX, PhD

COASESOR:

VÁSQUEZ ROWE, IAN, PhD

Lima, Abril, 2022

RESUMEN

El sistema insostenible de la industria de la construcción se ha evidenciado a través de actividades como la excesiva extracción de materia prima y la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Ante ello, la presente tesis se enfoca en la implementación de los principios manejados por la Economía Circular en una obra de construcción *Lean*, a fin de lograr cerrar ciclos en la cadena productiva de la construcción con procesos como el diseño de residuos. De esta forma, se propuso la inserción de concreto demolido, caracterizado como RCD, para ser reemplazo parcial de los agregados gruesos de la mezcla de concreto estructural. A partir de ello, se hizo una revisión bibliográfica del agregado de concreto reciclado (ACR) y su desempeño como componente en la mezcla de concreto estructural. El cuadro comparativo resultante de la revisión sirvió como referente para elaborar la dosificación de la mezcla de concreto con el 50% de porcentaje de ACR, finalmente escogido.

Después, se evaluó el desempeño ambiental de la mezcla de concreto con ACR a través de un análisis del ciclo de vida y se comparó con el concreto convencional. Además, se hizo un análisis de sensibilidad con la variable transporte para evaluar su influencia en el impacto ambiental de la producción del ACR. Se concluyó que, para este caso de estudio, el impacto de ACR es aproximadamente el mismo al del agregado natural cuando la distancia recorrida por el primero es entre el 35 al 45% de la distancia del segundo. Ello significa que, por debajo de dicho rango, se demuestra la sostenibilidad del material circular para las categorías de impacto de extracción de minerales, escasez de recursos fósiles y calentamiento global.

Finalmente, se desarrolló la administración del material concreto con ACR en la obra en base a la información obtenida del caso de estudio y mediante el uso de herramientas *Lean Construction*. Ello con el fin de demostrar el aporte de la filosofía *Lean* en el cumplimiento de los objetivos de la presente tesis. Los resultados demostraron la viabilidad de un sistema de construcción circular a micro escala y se resaltaron los cambios pertinentes y aspectos de control a tomar en cuenta.

Agradezco a mi familia por creer en mí

A mi padre por darme el apoyo y la seguridad de lograr mis metas

A mi madre por darme el aliento y la fuerza

A mis hermanitos Leonardo y Oliver por ser mi motivación diaria

A Natalia, una gran amiga, por el esfuerzo, la paciencia y la constancia

A nuestros asesores por la orientación y la confianza

*Y, finalmente, agradezco a todos aquellos, docentes y amigos, que me dejaron una enseñanza en la Universidad
y no dudaron en brindarme su apoyo*

Alejandra Nikita Palomino Pando

A mis padres por impulsarme día a día

Y mi demás familia por mis logros celebrar

Gracias Nikita por superar conmigo esta travesía

Y a las lecciones de mis amigos de universidad

A nuestros asesores e ingenieros por su sabiduría

Y a Luis que no me dejó de apoyar

[Dedicado a mi abuelo, que me mira desde lo más alto]

Natalia Verónica Meléndez Soto

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL ESTUDIO	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. La construcción sostenible	1
1.1.2. La extracción de materia prima en la construcción.....	2
1.2. Definición del estudio	5
1.2.1. Alcance de la investigación	5
1.2.3. Objetivos e hipótesis	7
CAPÍTULO 2 . ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Marco conceptual de Economía Circular	9
2.2. Economía Circular en la construcción.....	12
2.3. Análisis de ciclo de vida	16
2.4. Relación Economía Circular con sostenibilidad	18
2.5. Revisión bibliográfica de sustitución de materias primas del concreto	22
2.6. Lean Construction como herramienta dentro del marco de EC	26
2.6.1. El pensamiento <i>Lean</i> en la construcción	26
2.6.2. Herramientas Lean Construction	29
2.6.3. Administración de materiales con <i>Lean Construction</i>	33
CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA	37
3.1. Definición y descripción del caso de estudio	37
3.2. Marco metodológico	41
CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	43
4.1. Revisión literaria	43
4.3. Elaboración de cuadro comparativo	45
4.4. Evaluación de los casos de éxito	46
4.5. Dosificación de la mezcla de concreto con ACR	47
CAPÍTULO 5 . ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	52
5.1. Definición de objetivo y alcance	52
5.2. Inventario del ciclo de vida	55
5.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida	73
5.4. Interpretación	76
5.4.1. Análisis de sensibilidad entre el ACR y la grava.....	76
5.4.2. Comparación entre el concreto reciclado y convencional.....	79
CAPÍTULO 6 . ADMINISTRACIÓN DE MATERIALES	80
6.1. Uso del <i>Last Planner System</i>	80

6.2. Modificación del <i>layout</i>	86
6.3. Análisis de los cambios originados en el caso de estudio.....	87
CAPÍTULO 7 . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
Bibliografía.....	96



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producción 2019 (T.M.) de principales minerales de la construcción	3
Tabla 2.1 Aspectos de EC a través de las etapas del ciclo de vida de una edificación	15
Tabla 2.2 Principales residuos y sus posibilidades de uso en la producción de materiales de construcción.....	20
Tabla 4.1. Correspondencia entre la relación agua/cemento, en peso (w/c) y la resistencia a la compresión simple del concreto.....	49
Tabla 4.2. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	49
Tabla 4.3. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos del agregado	50
Tabla 4.4. Dosificación de mezcla para concreto convencional con aditivo	51
Tabla 4.5. Dosificación de mezcla para concreto con ACR	51
Tabla 5.1. Características de la excavadora para demolición selectiva	58
Tabla 5.2. Características de la excavadora para extracción en cantera	59
Tabla 5.3. Características de la planta móvil de trituración para grava natural	60
Tabla 5.4. Características de la planta móvil de trituración para ACR.....	61
Tabla 5.5. Características del minicargador	62
Tabla 5.6. Características de la planta dosificadora	63
Tabla 5.7. Características de los agregados grueso y fino de cantera Carapongo.....	65
Tabla 5.8. Extracción de grava en cantera.....	66
Tabla 5.9. Extracción de arena en cantera.....	67
Tabla 5.10. Demolición del casco	68
Tabla 5.11. Trituración en cantera de grava	70
Tabla 5.12. Trituración en obra de ACR.....	71
Tabla 5.13. Dosificación de concreto convencional	72
Tabla 5.14. Dosificación de concreto con ACR	72
Tabla 5.15. Distancias simuladas desde la demolición a la obra	73
Tabla 5.16. Resultados al comparar ACR con grava natural	75
Tabla 5.17. Resultados al comparar concreto reciclado con aquel convencional	76
Tabla 6.1. Volumen de concreto requerido por sector en una planta típica	81
Tabla 6.2. Toneladas de ACR requerido por sector en una planta típica	81
Tabla 6.3. Toneladas de concreto demolido requerido en una planta típica	82
Tabla 6.4. Duraciones de la producción de ACR por sectores para una planta típica.....	82
Tabla 6.5. Duraciones modificadas de la producción de ACR por sectores para una planta típica	85
Tabla 6.6. Programación de llegada de concreto demolido	86
Tabla 6.7. Cuadro comparativo de la implementación de EC en obra con herramientas Lean	87
Tabla 6.8. Estimaciones que pueden emplearse en panoramas de EC.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 PBI de la construcción 1950-2018, valores a precios constantes de 2007	4
Figura 2.1. Representación del flujo de materiales en la economía lineal.	10
Figura 2.2. Representación del flujo de materiales en la EC	11
Figura 2.3. Proceso futuro de la construcción basado en la EC.....	13
Figura 2.4. Esquema de la EC para la construcción	14
Figura 2.5. Marco metodológico general del ACV.	17
Figura 2.6. Modelo de producción tradicional	27
Figura 2.7. Modelo de producción lean o TFV	28
Figura 2.8. Sistema de planificación Lean	31
Figura 2.9. Sistema de planificación Lean.	32
Figura 3.1. Ubicación del proyecto.	38
Figura 3.2. Etapa III del proyecto.	38
Figura 3.3. Planta típica de un departamento	39
Figura 3.4. Esquema de ubicación de la planta dosificadora en el proyecto.....	40
Figura 3.6. Metodología de la presente investigación.	42
Figura 5.1. Ciclo de vida del concreto.	53
Figura 5.2. Sistema del concreto con agregado natural.	54
Figura 5.3. Sistema del concreto con agregado reciclado.....	54
Figura 5.4. Entradas y salidas para el sistema de concreto con agregado natural.....	56
Figura 5.5. Entradas y salidas para el sistema de concreto con agregado reciclado.	57
Figura 5.6. Esquema de planta dosificadora.....	64
Figura 5.7. Análisis de sensibilidad para extracción de minerales, escasez de recursos fósiles y calentamiento global.....	77
Figura 5.8. Análisis de sensibilidad para toxicidad humana carcinógena y no carcinógena.....	78
Figura 5.9. Especificaciones por sustancia para la categoría de impacto de toxicidad humana carcinógena.....	79
Figura 6.1. Tren de actividades incluyendo buffer de tiempo.	83
Figura 6.2. Tren de actividades del primer piso sin retraso.	84
Figura 6.3. Vaciado en dos días del sector 1 del primer piso.	84

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

El desarrollo del ser humano ha priorizado por mucho tiempo la satisfacción de sus necesidades, pensando solo en el presente y sin considerar las consecuencias negativas tanto para el medio donde se desarrolla como para las generaciones que lo suceden. Para el desarrollo del sector industrial en particular, la generación de productos viene enmarcado por un fuerte entorno competitivo en el que, en búsqueda de supremacía, las industrias hacen un uso desmedido de los recursos naturales sin tener en cuenta, en muchos casos, la naturaleza no renovable de los mismos.

Ello pone en evidencia un actual sistema de producción insostenible que impulsa un desarrollo económico y social ligado a un continuo deterioro del medio ambiente, y la industria de la construcción es un claro ejemplo de este desequilibrio entre los aspectos social, económico y ambiental. Por tal motivo, la presente tesis enfoca su estudio en la implementación de los principios manejados por la Economía Circular (EC), a fin de lograr una transición hacia una construcción sostenible que preserve sus recursos y los use de la manera más eficiente posible.

1.1. Introducción

1.1.1. La construcción sostenible

El sector construcción es uno de los principales contribuyentes al desarrollo económico y social de un país, y también uno de los principales responsables del actual deterioro del medio ambiente (Palomino et al., 2017). Ello debido a que el diseño, construcción y operación de las edificaciones involucran la continua explotación de recursos naturales, un gran consumo energético, así como un mayor uso de vertederos por la generación de residuos. En la actualidad, dichas prácticas contribuyen a que las condiciones ecológicas y sociales sean insostenibles y, se agravan conforme avanza el ritmo actual de crecimiento demográfico

(Ahmed et al., 2014). Bajo este panorama, es evidente que la industria de la construcción requiere un cambio.

Para ello es preciso definir, en primer lugar, el concepto de desarrollo sostenible, el cual se introdujo por primera vez en el informe de la Organización de las Naciones Unidas (1987). En dicho informe se definió al Desarrollo Sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones, y de esta forma, se situó a la dimensión ambiental en la perspectiva del desarrollo económico y social.

En base al concepto de Desarrollo Sostenible, se define la construcción sostenible como un “proceso holístico que busca restaurar y mantener la armonía entre el ambiente natural y el sistema construido, y crear asentamientos humanos que afirman la dignidad humana y fortalecen la economía con equidad” (Du Plessis, 2002). De esta forma, la construcción sostenible buscará un equilibrio entre la dimensión social, económica y sobre todo ambiental, al garantizar la conservación del medio ambiente y brindar las mismas oportunidades de desarrollo tanto para la generación actual como para las generaciones futuras.

Es pertinente reconocer la complejidad del proceso de transformación del sistema constructivo tradicional, pero esta transición debe ocurrir más por los beneficios que trae consigo que por el miedo a las consecuencias de no tomar acción (Acosta, 2009). La sostenibilidad en la construcción debe verse como una oportunidad para prevenir posibles problemas a futuro.

1.1.2. La extracción de materia prima en la construcción

Si lo que se busca es cumplir con los criterios de sostenibilidad dentro del sector de la construcción, es preciso analizar las distintas actividades involucradas que requieren de un cambio. Una de ellas es la extracción de materia prima.

Para este sector, el gran consumo de materias primas a nivel mundial, se justifica a causa de la demanda de materiales como las mezclas de concreto, por ser de gran importancia en proyectos

de viviendas e infraestructura. El concreto está compuesto tradicionalmente por agua, agregados gruesos y finos de origen natural, tales como piedra triturada y arena gruesa, y cemento portland (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [MVCS], 2009). La producción de este último componente requiere de calizas, arcillas, sílice y hierro (Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI, 2001).

De acuerdo con el Reporte de producción minera anual del Perú (Ministerio de Energía y Minas, 2019), se puede observar en la Tabla 1.1 las cantidades extraídas de los principales minerales que forman parte de la composición de mezclas de concreto. Cabe resaltar que el hormigón y la piedra extraída deben pasar por un proceso de disminución de tamaño, mediante una máquina chancadora y un conjunto de tamices, hasta convertirse en el agregado grueso requerido en dichas mezclas de concreto.

Tabla 1.1 *Producción 2019 (T.M.) de principales minerales de la construcción*

Naturaleza del mineral	Nombre	Toneladas (T.M.)
No metálico	Caliza / dolomita	16 385 556,23
Metálico	Hierro	10 120 007,40
No metálico	Hormigón	6 262 347,63
No metálico	Arena (gruesa/fina)	1 922 161,81
No metálico	Piedra (construcción)	1 618 663,10
No metálico	Arcillas	1 377 764,98
No metálico	Sílice	401 785,18
No metálico	Yeso	254 381,82

Nota: Basado en “Producción minera anual 2011-2019”, por Ministerio de Energía y Minas, 2020. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12501. T.M. = Toneladas Métricas

Como se ha podido observar, los recursos naturales empleados en la construcción son minerales de naturaleza metálica y no metálica extraídos en grandes cantidades. Sin embargo, su extracción es considerada una actividad poco sostenible, ya que podría generar graves repercusiones en el futuro, debido a nocivos impactos en el medio ambiente y al posible agotamiento de dichos bienes, al poseer una fuente no renovable.

1.1.3 Residuos de Construcción y Demolición

Otra de las actividades con gran carga ambiental es la generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Para ello, se consideran RCD a todos los materiales que se generan durante la ejecución de una obra civil como compuestos de escombros, chatarra, madera, residuos sólidos y residuos peligrosos (Bazán, 2018).

En lo que respecta a la fase de construcción, las grandes cantidades de residuos generados dependen del control y manejo de materiales en obra. Por otro lado, durante la fase de demolición, es preciso aclarar que, en muchos casos, para construir en un terreno es necesario destruir primero obras previas debido a la escasez de terrenos desocupados y el aumento en la demanda de edificaciones. Esto último se ilustra a través de la Figura 1.1, la cual muestra la participación del sector construcción en la economía del Perú.

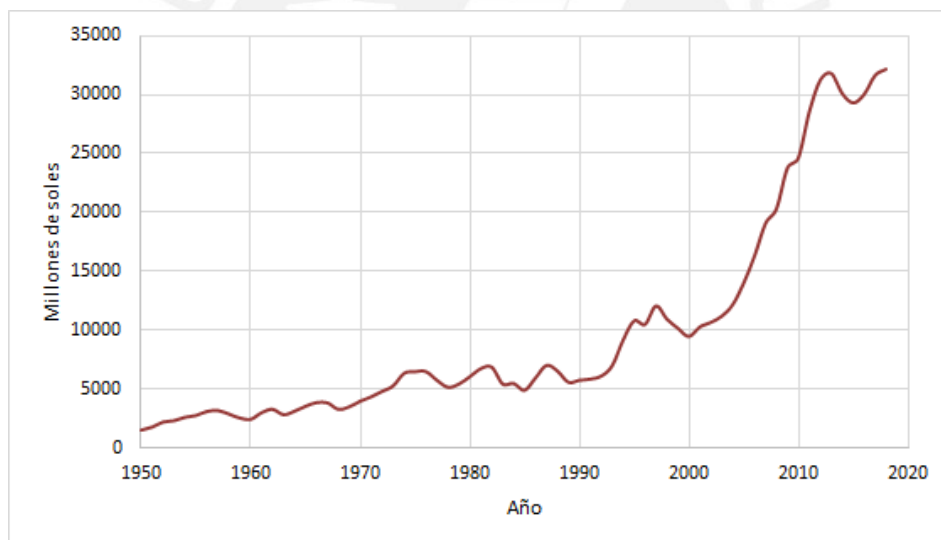


Figura 1.1 PBI de la construcción 1950-2018, valores a precios constantes de 2007. Obtenido de “Panorama de la economía peruana 1950-2019, base 2007” por Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2020.

Como se evidencia, el aporte de la construcción al país ha ido aumentando con los años, lo que se traduce en un aumento en el número de proyectos. Ello significa un aumento en el número de demoliciones que generan grandes cantidades de residuos debido a un inadecuado control.

En la última estimación, se cuantificó, a través de una encuesta a 35 municipios provinciales, un total de 224 748 toneladas de residuos al año (Ministerio del Ambiente, 2013). Asimismo,

tras caracterizar los residuos sólidos municipales en el Cercado de Lima, se calculó que 20 426,35 toneladas correspondían a RCD (Municipalidad de Lima, 2019).

En base a lo explicado líneas arriba, la reducción en el consumo de materia prima y en la generación de RCD se han convertido en objetivos imperantes en la lucha ambiental que involucra al sector de la construcción. Ante ello, modelos como el propuesto por la EC surgen como una solución, ya que permite cerrar el ciclo productivo de la construcción a través de procesos como el reciclaje y reutilización, los cuales posibilitan una segunda vida útil a aquellos productos que se pensaba se encontraban en la etapa final de su ciclo de aprovechamiento.

Es preciso resaltar que optar por mecanismos sostenibles en la construcción significa romper con aquel esquema tradicional adquirido por décadas, cuyo fin productivo está desligado de la preservación del medio ambiente. El sector de la construcción debe apuntar a cambios importantes en los valores que ésta tiene como cultura propia, lo cual llevará a la conservación de los recursos naturales, una maximización en la reutilización de los recursos, una gestión del ciclo de vida y reducciones de la energía utilizada (Alavedra et al., 1997).

1.2. Definición del estudio

1.2.1. Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación posee como alcance una propuesta de implementación de la EC en el sector construcción a través de la inserción de residuos de demolición como reemplazo de los agregados de concreto. Se consideró una obra de edificación *Lean* como base para el análisis.

Se hizo una revisión bibliográfica acerca de los agregados de concretos reciclados (ACR) y su desempeño como componentes en la mezcla de concreto estructural y, a partir de ello, se

propuso una dosificación de concreto con agregado reciclado. Luego, mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se evaluó la sostenibilidad ambiental de dicho concreto con ACR bajo un esquema circular, frente al concreto convencional, cuya producción es de carácter lineal.

A su vez, como parte de la propuesta de implementación de la EC, se desarrolló y evaluó la administración del material concreto reciclado en obra, en base a la información obtenida del caso de estudio y mediante el uso de herramientas *Lean* para una mayor eficiencia.

1.2.2. Justificación

Dos de los grandes problemas identificados en el sector de la construcción son la excesiva extracción de materia prima y las grandes cantidades de RCD producidos anualmente.

Mediante diferentes investigaciones, se sabe que una incorrecta práctica durante la extracción de las materias primas provoca consecuencias perjudiciales en el medio ambiente. Entre estos efectos negativos, da Silva et al. (2020) mencionan la eliminación de la cubierta vegetal en el área de extracción y la posible infiltración en el suelo de productos derivados del petróleo a causa del empleo de maquinarias pesadas. También se hace hincapié en el aumento de la erosión y la capacidad de infiltración del suelo, la contaminación auditiva y del aire, entre otros. Sus impactos no solo son de índole medioambiental, sino también de carácter socioeconómico, tales como riesgos de salud de los pobladores por la generación de polvo y gases, y pérdida de la calidad de vida (Machaca, 2018), lo cual provoca en muchas ocasiones la migración de los habitantes hacia otras zonas. Asimismo, es evidente suponer que se genera una pérdida de la fertilidad del suelo por el ingreso de las distintas sustancias nocivas mencionadas líneas arriba, que provocan una pérdida de sus propiedades naturales, lo cual puede afectar directamente a las actividades agrícola y ganadera.

Por otro lado, las grandes cantidades de RCD son principalmente generadas por un diseño inapropiado, una incorrecta planificación, errores en la obtención de recursos, innecesario manejo de materiales, entre otros (Cheng et al., 2015). Además, en el país, se resalta la pobre gestión de los mismos por parte de las autoridades, lo que conlleva muchas veces al origen de vertederos informales no controlados y, por ende, con altos niveles de toxicidad. Asimismo, la falta de difusión de actividades como el reciclaje y la reutilización, y la propia ausencia del tratamiento de los residuos, imposibilitan su reaprovechamiento (Bazán, 2018).

Estos problemas se evidencian a mayor escala en países cuyo principal material de construcción es el concreto. Ello, debido a que un aumento en la demanda de concreto va de la mano con el aumento en extracción de materia prima y, posteriormente, mayor generación de residuos. A nivel mundial, se estima que el consumo anual aproximado de concreto es de 30 billones de toneladas y se espera un incremento de esta cifra en los próximos años (Monteiro et al., 2017).

En este contexto, lo que se busca es reducir el consumo de materias primas y minimizar la generación de desechos en el sector, como objetivos de la construcción sostenible. Una solución a ambas problemáticas es la aplicación de la EC. En ella, se deberían considerar actividades como el reciclaje y reutilización, cuya implementación genere el menor impacto ambiental posible, además de una administración adecuada de los recursos a emplear.

1.2.3. Objetivos e hipótesis

El objetivo general de la presente investigación es evaluar la implementación de la EC en la construcción mediante el empleo de un concreto con agregado grueso reciclado en una obra *Lean*.

Asimismo, entre los objetivos específicos de la presente tesis se pueden mencionar:

- Proponer una dosificación de mezcla de concreto con ACR adecuada en base a la revisión bibliográfica realizada.
- Evaluar, mediante un ACV, la sostenibilidad ambiental del agregado de concreto reciclado bajo un esquema circular, frente a la grava natural, dentro de la producción de las mezclas de concreto estructural.
- Identificar la contribución de las herramientas *Lean Construction* y evaluar los cambios originados en relación a la administración del material concreto en obra. Ello, bajo el esquema de EC y tras considerar que el caso de estudio cuenta con su propia planta de concreto que posibilita dicha administración.

A su vez, como hipótesis se plantea que, bajo el esquema circular, el agregado reciclado es ambientalmente sostenible acorde al ACV realizado. Asimismo, se plantea que el desarrollo de la administración de materiales, dentro del esquema circular, en una obra de edificación en Lima, es factible y se facilita con el empleo de herramientas *Lean Construction*.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se describen los métodos y herramientas que serán aplicados, según la metodología, para la implementación de la EC en la construcción. En primer lugar, se compilan las fuentes bibliográficas en torno al tema de EC y su inserción en el sector de la construcción. Seguidamente, se aprecia a la herramienta de ACV, la cual se plasma con el fin de ser empleada como un instrumento de análisis de sostenibilidad ambiental. Ello debido a que existe una relación entre la EC y la sostenibilidad, cuyo sustento se desarrolla posteriormente a través de referencias bibliográficas. A continuación, se muestra un conjunto de fuentes literarias acerca del concreto con ACR, a partir de los cuales se extraerá información útil para la metodología. Y, finalmente, se aprecia a la filosofía *Lean Construction*, la cual busca contribuir en la administración de materiales dentro del marco de la EC.

2.1. Marco conceptual de Economía Circular

La concepción original de la EC es debatible. Murray et al. (2017) reunieron diversos artículos e investigaciones que abordaban este tema y sostienen que, mientras algunos autores consideran a los ingleses como los creadores de este término (sea el caso de Kenneth Boulding o Pearce y Turner), otros atribuyen al país asiático de China como el creador de este concepto, a través del artículo escrito por Zhu, quien se inspiró en la teoría alemana y sueca de cierre de bucle. Asimismo, Murray et al. (2017) concluyeron que, a pesar de las discrepancias sobre su origen, la mayoría de autores concordaban que este nuevo modelo económico poseía sus raíces conceptuales en la ecología industrial.

La definición de este concepto de ecología industrial se basa en una relación con los sistemas ecológicos naturales y se caracteriza por maximizar el uso económico de desechos de materiales y de productos al final de su vida útil, así como de minimizar la generación de residuos durante los procesos. De este modo, se consideran a los desechos como elementos participantes del flujo de proceso industrial que se va a diseñar para generar productos

convenientes. Ello podría darse solo si se resuelven potenciales problemas como el diseño simultáneo de desechos, productos y procesos, la internalización de los costos de eliminación de residuos, entre otros (Frosch, 1992).

Es así que el concepto de EC sienta sus bases en la ecología industrial y deja de lado el modelo lineal de flujo de materiales mostrado en la Figura 2.1. Dicho esquema sigue el patrón de tomar-hacer-desechar, en el cual las empresas extraen los materiales, los usan para fabricar un producto, venden el producto a los consumidores y estos lo desechan cuando ya no cumple con su propósito (MacArthur, 2013).

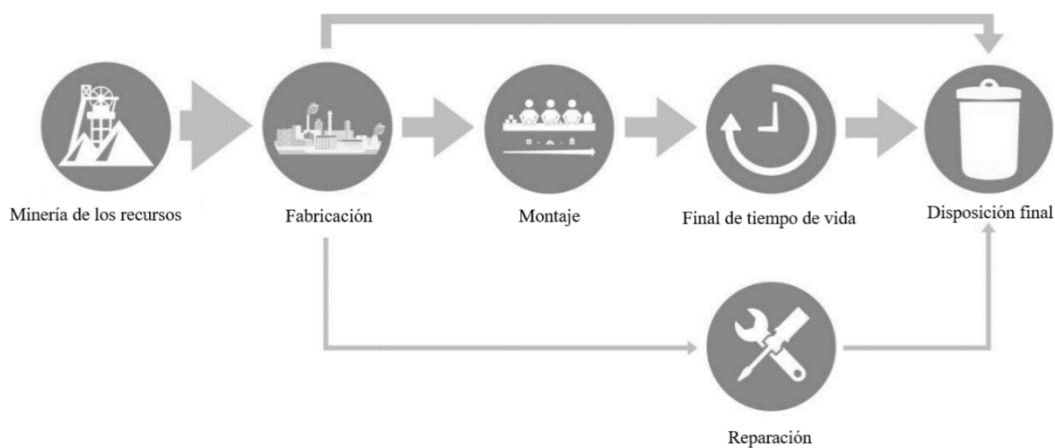


Figura 2.1. Representación del flujo de materiales en la economía lineal. Adaptado de “Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review” por K. Anastasiades, J. Blom, M. Buyle & A. Audenaert, 2020, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 117, 109522.

En su lugar, la EC promueve un modelo basado en un sistema de circuito cerrado representado por la Figura 2.2. La fase inicial es la adquisición de recursos, que pueden ser naturales o reciclados del mismo o de otro proceso. Posteriormente, hay una fase de fabricación y montaje, seguida de la vida útil del producto terminado. El sistema puede reparar y renovar a fin de prolongar el uso del producto y mantener su valor más alto el mayor tiempo posible o disponerlo para su reutilización en una aplicación de menor valor. Ya cuando la utilidad del producto es nula dentro del ciclo, se desmonta y sus componentes básicos se reciclan en el mismo proceso o en otro, con lo cual se cierra el ciclo (Anastasiades et al., 2020).

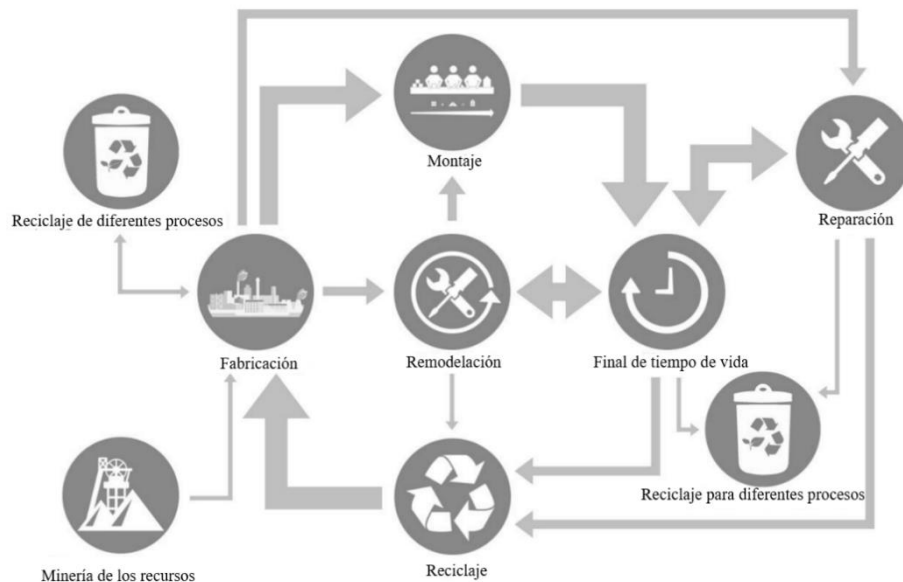


Figura 2.2. Representación del flujo de materiales en la EC. Adaptado de “Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review” por K. Anastasiades, J. Blom, M. Buyle & A. Audenaert, 2020, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 117, 109522.

Asimismo, este modelo involucra una administración cuidadosa de flujos de materiales, los cuales pueden ser de dos tipos. Por un lado, se nombra a los nutrientes técnicos (materiales hechos por el hombre) que son diseñados para ser usados de nuevo, mediante el empleo de una energía mínima y con una alta retención de valor como se explicó líneas arriba. Por el otro lado, también existen nutrientes biológicos (recursos renovables) que son aquellos no tóxicos que pueden reingresar a la biósfera sin algún peligro (MacArthur, 2013).

En tal sentido, la EC se basa en los siguientes principios básicos para poder llevar a cabo el sistema de circuito cerrado planteado (MacArthur, 2013):

- Diseño de residuos: Diseñar para remodelar, desmontar y encajar dentro de los ciclos de materiales biológicos y técnicos.
- Desarrollo de resiliencia a través de la diversidad: Priorizar la modularidad, versatilidad y adaptabilidad.
- Confianza en la energía de fuentes renovables: No hay escasez a largo plazo de mano de obra ni de energías renovables.

- Pensamiento en sistemas: Los elementos se relacionan con el ambiente, la infraestructura y el contexto social; se piensa en un todo más que en las partes.
- El desperdicio es comida: Reintroducir a la biósfera o reciclar los materiales y productos.

Por ello, la EC promueve una economía industrial en la que los productos se diseñen con el propósito de que sean fáciles de reutilizar, desmontar, reacondicionar o reciclar, ya que su fundamento económico se basa en evitar extraer recursos, y en vez de ello, reutilizar grandes cantidades de materiales que se encuentran al final de su vida útil. Se busca una opción restauradora que dependa de la energía renovable, minimice, rastree y elimine productos químicos tóxicos, reduzca las emisiones de carbono y erradique residuos (MacArthur, 2013).

Igualmente, según Preston (2012), la EC transforma la función de los recursos, convierte los desechos en insumos valiosos y es capaz de generar diversos beneficios. En primer lugar, ofrece nuevas formas de crear valor apropiadamente para un mundo cuyos precios de los recursos son altos y volátiles. Asimismo, la innovación en áreas como la tecnología de información y el avance de materiales ha permitido obtener la capacidad de rastrear y optimizar el uso de recursos a lo largo de la cadena de suministro, así como el acceso de otras opciones que antes no eran viables. Por último, varios gobiernos han brindado un mayor apoyo a las industrias manufactureras de alta tecnología y a las políticas del ámbito de eficiencia de recursos. Más aún, el autor manifiesta que este modelo circular podría ayudar a que los países en vías de desarrollo se industrialicen, y que los países ya desarrollados aumenten su bienestar y reduzcan la volatilidad de precios; todo ello sin traspasar los límites ambientales y a través de una preferencia por la sostenibilidad y el pensamiento de ciclos cerrados.

2.2. Economía Circular en la construcción

La transición hacia una EC en la construcción implica un cambio total en la cadena de valor de una edificación, el cual requiere de la intervención de los diseñadores, desarrolladores y, en

general, de todos los profesionales involucrados en las etapas constructivas (Mangialardo & Micelli, 2018). El modelo de construcción circular, representado en la Figura 2.3, muestra estas interacciones entre etapas, como el traspaso de conocimiento y trabajo conjunto entre las fases de producción, planificación y diseño, las cuales definen a su vez lo que se lleva a cabo en la fase de ejecución. Además, gracias al modelo, se puede dar una adecuada transición de la fase de ejecución a la de uso. Ello asegura el traspaso de responsabilidad de los constructores a usuarios, quienes deberán tener un mayor conocimiento de la edificación para asegurar una larga fase de uso, mediante pequeñas o medianas reparaciones. Finalmente, en la fase de gestión de RCD, el modelo circular promueve procesos como la demolición selectiva, con lo cual se asegura el retorno de materiales al proceso y el cierre del ciclo (Fundación Conama, 2018).

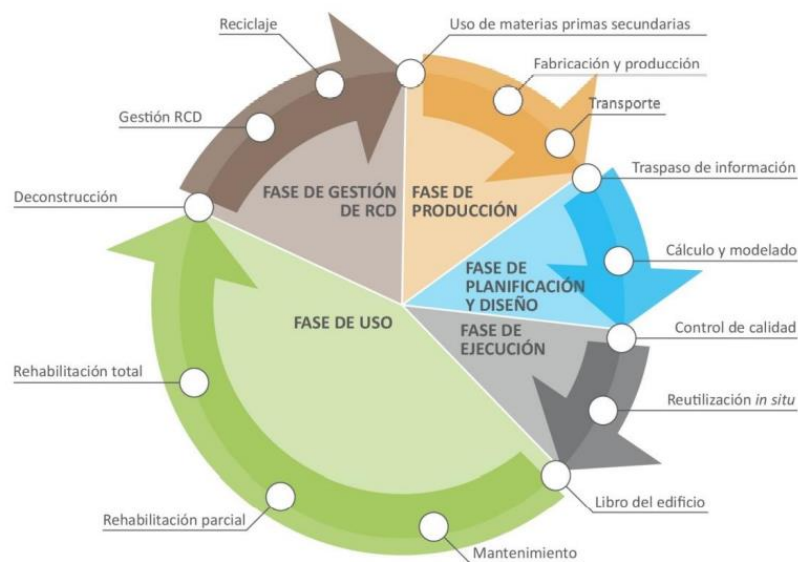


Figura 2.3. Proceso futuro de la construcción basado en la EC. Obtenido de “Economía circular en el sector de la construcción” por Fundación Conama, 2018.

Este proceso de demolición selectiva consiste en la secuencia de actividades de demolición que permiten la separación y clasificación de los materiales de una edificación. Su empleo se recomienda para próximos usos de materiales reciclados en alto grado. Para ello, los principales

flujos de residuos, como concreto, ladrillo y cerámicas, deben tratarse por separado (European Commission, 2016).

La información mencionada en los párrafos anteriores se aprecia en la Figura 2.4. Con ella, se comprende la interacción entre todas las fases de la construcción y, se conocen varios de los elementos y procesos participantes.

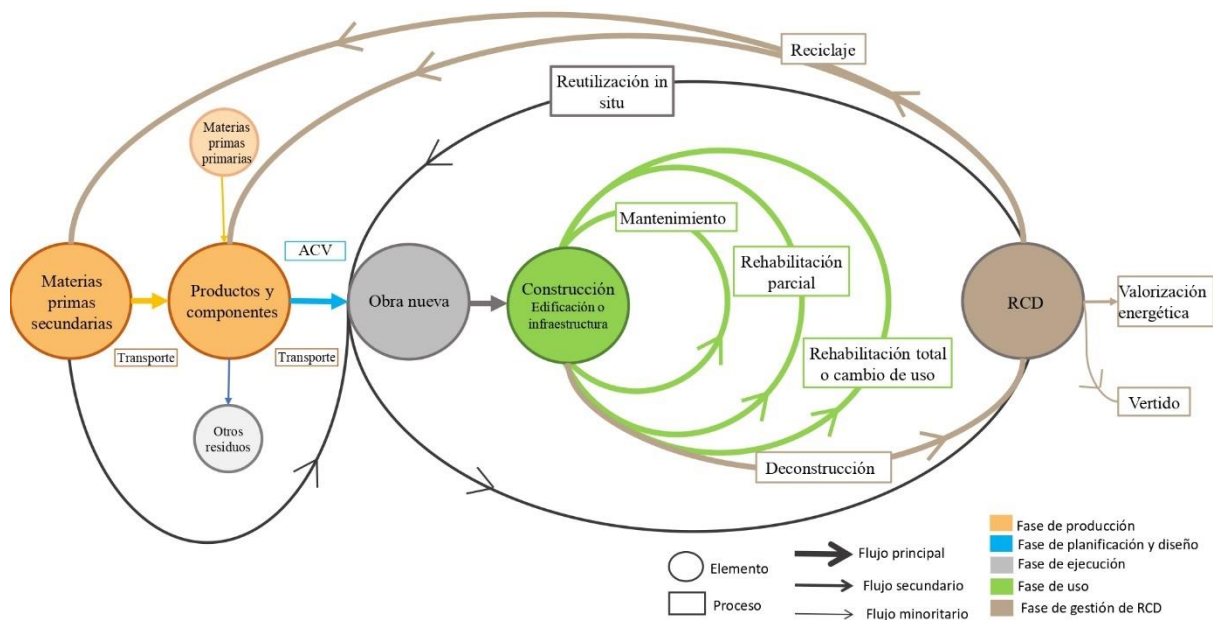


Figura 2.4. Esquema de la EC para la construcción. Adaptado de “Economía circular en el sector de la construcción” por Fundación Conama, 2018.

Cabe resaltar que, como ya se mencionó en el concepto general de EC, durante todo el ciclo se plantea emitir un bajo contenido de carbono. En la construcción, su razón recae en el hecho de que tanto la extracción de materias primas, como su transformación, transporte y participación en esta industria demandan energía que proviene en su mayoría de combustibles fósiles; es decir, impulsan la emisión de gases de efecto invernadero (Pomponi et al., 2020).

A fin de precisar el modelo de EC en la construcción, se presenta la Tabla 2.1, la cual muestra qué aspectos fundamentales se deberían de tener en cuenta en cada fase del ciclo de vida de una edificación para lograr un proceso circular.

Tabla 2.1 Aspectos de EC a través de las etapas del ciclo de vida de una edificación

Etapa del ciclo de vida	Aspecto de EC
Diseño	Diseño de residuos Diseño para la adaptabilidad y flexibilidad Diseño para la estandarización Especificar materiales reciclados
Manufactura y suministro	Principios de ecodiseño Usar menos materiales/optimizar el uso de materiales Usar menos materiales peligrosos Usar materiales secundarios Diseñar para el desmontaje de productos
Construcción	Minimizar el desperdicio Obtener materiales reciclados/reusados
En uso y restauración	Minimizar el desperdicio Minimizar el mantenimiento Fácil de reparar y mejorar
Fin de vida	Demolición selectiva Reuso de productos y componentes Reciclaje

Nota: Adaptado de “Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers”, por K. Adams, M. Osmani, T. Thorpe, J. Thornback, 2017, Institution of Civil Engineers.

De los aspectos mencionados, el diseño de residuos es una de las prácticas más abordadas para materializar los principios de la EC en el sector. Dicho diseño involucra las actividades de evitar, reducir, reusar, reciclar, recuperar energía y eliminar residuos, a fin de prevenir el uso innecesario de materia prima en la construcción (Zero Waste Scotland, 2020). Su implementación ha hecho posible, entre muchas cosas, la creación de nuevos materiales de construcción con contenido de residuos, los cuales serán insertados nuevamente en la cadena productiva de la construcción. Para ello, es pertinente aclarar que dichos residuos han tenido que pasar por un proceso de tratamiento propio en la fase de gestión de RCD, explicada líneas arriba.

2.3. Análisis de ciclo de vida

Una herramienta capaz de evaluar exhaustivamente este impacto ambiental provocado por productos como los originados por la construcción es el ACV. International Organization for Standardization (ISO) (2006) define al ACV como una recopilación y evaluación de entradas y salidas a lo largo del ciclo de vida del sistema de un determinado producto. En él, se analizan los impactos ambientales potenciales como el uso de recursos y las consecuencias de índole ambiental producto de sus emisiones. Asimismo, dicha norma considera que existen cuatro fases durante un estudio que aplica ACV, las cuales son definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación.

Definición de los objetivos y el alcance

En la primera fase se establecen el nivel de detalle que se desea y los límites del sistema. La ISO (2006) señala que la herramienta ACV es iterativa por lo que varios aspectos del modelo pueden sufrir de modificaciones con la finalidad de cumplir con el objetivo original. A su vez dicha norma establece una serie de requerimientos a cumplir como la definición del sistema del producto (conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto), la definición de la unidad funcional (unidad de referencia que estandariza las entradas, las salidas y los impactos ambientales involucrados) así como también definir las categorías ambientales, los requerimientos de datos, las suposiciones y las limitaciones encontradas en el estudio.

Inventario del ciclo de vida (ICV o LCI)

En esta fase se enlistan y cuantifican los datos de entrada y salida del sistema en estudio. La metodología propuesta por la ISO incluye los procesos de preparación, recolección y validación de datos, la relación de los datos con los procesos unitarios y la unidad funcional y su respectiva presentación. Para la definición de los datos se debe analizar las entradas y salidas de cada

proceso unitario y verificar que en cada uno de estos procesos unitarios se cumpla el balance de masas; es decir, que el flujo de entrada debe ser igual al de salida.

Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV o LCIA)

Esta fase se centra en la evaluación de los impactos ambientales y la respectiva cuantificación de los resultados. Para ello, en primer lugar, se definen las categorías de impacto, las cuales se pueden clasificar, acorde a las áreas de impacto, en tres grupos principales: uso de los recursos, la salud humana y el entorno natural. Después, se asocian los datos obtenidos en el ICV a las categorías de impactos definidas. Y finalmente, se transforman los valores inventariados, mediante factores equivalentes o referenciales, en unidades del indicador de la categoría de impacto (ISO, 2000).

Interpretación

En esta fase se resumen y discuten los resultados obtenidos, tanto de la fase ICV, como de la fase EICV para que, de este modo, se pueda tomar decisiones o brindar recomendaciones.

La interacción de estas cuatro fases y sus posibles aplicaciones se pueden observar en la Figura 2.5.

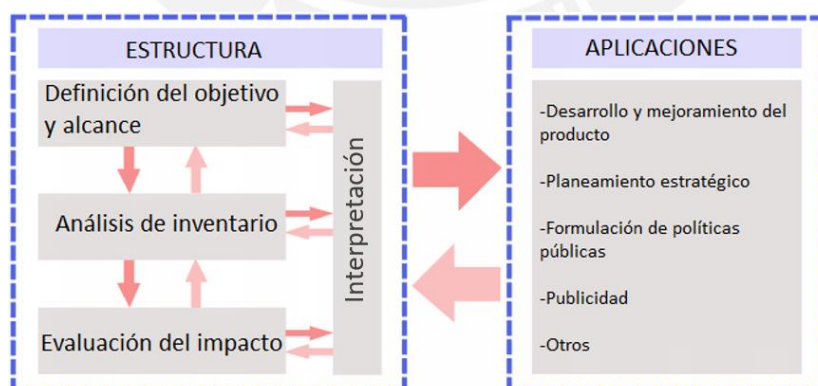


Figura 2.5. Marco metodológico general del ACV. Adaptado de “Life Cycle Assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials” por R. Carabaño, S. Hernando, D. Ruíz, & C. Bedoya, 2015, el cual se basó en la ISO 14040:2006.

De acuerdo con Hellweg y Milá (2014), la herramienta ACV brinda una comprensión integral de los problemas que podrían presentarse y sus posibles soluciones, en vez de otorgar una única respuesta. Se usa típicamente para evaluar y mejorar el sistema de un producto, mediante el apoyo en la toma de decisiones y la influencia que puede ejercer en las fases iniciales y de diseño de dicho producto. Sin embargo, su aplicación abarca una dimensión más amplia.

Este pensamiento de ciclo de vida se ha ido incorporando alrededor del mundo a través de políticas de programas orientados al tema ambiental, tales como las estrategias acerca del uso sostenible de los recursos, la prevención y reciclaje de residuos, y la huella de carbono (Guineé et al., 2011). Entre estas políticas se encuentran aquellas relacionadas al sector construcción, como la Normativa Europea de productos de construcción, en la cual se requiere que dichos materiales cuenten con su propio estudio ambiental. Si los profesionales conocen los impactos ambientales durante el ciclo de vida de los productos antes de ser empleados para construir un edificio, debido a la información comprensible brindada, la evaluación ambiental de la edificación en su totalidad se puede realizar de forma sistemática (Carabaño et al., 2017).

2.4. Relación Economía Circular con sostenibilidad

La relación de EC con sostenibilidad ha sido ampliamente discutida en los últimos años por diversos autores. Schroeder et al. (2019) definen en qué medida la aplicación de los principios de la EC logran alcanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que a su vez comprenden 169 metas establecidas por la Organización de las Naciones Unidas. Su investigación les permitió concluir que 49 de las metas son alcanzadas directa o indirectamente, y las relaciones más sólidas yacen entre las prácticas de EC y las metas del ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y limpia), el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 12 (Consumo y producción responsables) y el ODS 15 (Vida en tierra). A su vez, dichos autores sostienen que siendo la sostenibilidad el objetivo, la EC es un medio para este fin, pero no es suficiente por sí sola.

Tanto la sostenibilidad como la idea de EC nacieron de una conciencia ambiental y consecuentemente de un llamado a preservar el planeta. (Anastasiades et al., 2020). Por ende, aún con la variabilidad en las interpretaciones de la EC, su papel en la lucha contra la crisis ambiental es evidente, ya que surge como una solución al excesivo consumo de materias primas y la generación de desechos, dos actividades que, para la industria de la construcción en particular, son notoriamente perjudiciales. Tal y como sostienen Joensuu et al. (2020), el objetivo de la EC es reemplazar la cultura de tomar-hacer-disponer por un sistema de circuito cerrado donde, utilizando todos los recursos tantas veces como sea posible, se logre una retención del valor que permita tanto una disminución del uso de materias primas, así como la prevención del desperdicio.

La EC apunta también a un desarrollo económico que garantice el cuidado del medio ambiente. Tal y como sostiene Nasir et al. (2017), la idea es transformar los ciclos productivos de tal manera que existan relaciones viables entre los sistemas ecológicos y el crecimiento económico. Ello se evidencia también en la estrecha relación, demostrada líneas arriba, que presenta la EC con el ODS 12, correspondiente al consumo y producción responsables, el cual consiste en desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental. De esta manera, se busca lograr que el consumo y la producción (fuerzas impulsoras de la economía mundial) se desarrollen haciendo un uso eficiente de los recursos y se promuevan estilos de vida sostenibles (Organización de las Naciones Unidas, s.f.)

La sinergia entre sostenibilidad y EC ha sido demostrada por Ness y Xing (2017), los cuales proponen un modelo conceptual destinado a ser utilizado como un mecanismo para extender los principios de la EC al entorno construido, y para resaltar la importancia y los beneficios de este enfoque en el marco de la sostenibilidad. Dicho modelo, aplicado a un recinto urbano como caso de estudio, resalta el trabajo conjunto de los actores involucrados y define sinergias entre sus objetivos, recursos e instrumentos para lograr metas como la eficiencia en el uso de recursos

y la disminución de impactos negativos, como desechos y contaminación. Dichos autores demostraron que los principales beneficios de los enfoques circulares son económicos y medioambientales, mientras que los beneficios sociales han sido más implícitos, traducidos en mayor tasa de empleo y mejor calidad de vida para los habitantes. Ello revela la falta de atención al aspecto social que aún es una línea de investigación prematura, sobre todo en el entorno construido.

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas estrategias circulares que ponen en práctica los principios de la EC en el entorno construido. Muchas de ellas se han centrado en el nivel más bajo de interacción definido por Pomponi y Moncaster (2017) como la micro escala, que hace referencia a la escala de materiales o componentes de construcción. En este sentido, se resalta la importancia de actividades como el reciclaje y la reutilización de residuos en el sector de la construcción, las cuales, de la mano con la innovación tecnológica, impulsan la creación de nuevos materiales que serán incluidos posteriormente en la cadena productiva de la construcción. En la Tabla 2.2 se presenta una recopilación de la gran variedad de residuos con potencial para ser usados como materia prima en el sector.

Tabla 2.2 *Principales residuos y sus posibilidades de uso en la producción de materiales de construcción*

No.	Nombre del residuo	Tipo de residuos	Uso en materiales de construcción
1	Ceniza voladora Cenizas de fondo ceniza de cáscara de arroz ceniza de combustible de aceite de palma fibras orgánicas	Agroindustrial	Agregados Concreto Materiales cementantes suplementarios Cemento mezclado Ladrillos/bloques Losetas
2	Yeso fosforado Desecho de vidrio de Escoria granulada de alto horno Escoria de residuos de acero	Industrial	Agregados fino y grueso Cemento mezclado Concreto Ladrillos/bloques

	Caucho de llantas		Losetas
3	Polvo de cantera	Minería/mineral	Productos de cerámica Agregados fino y grueso Concreto Ladrillos/bloques Losetas
4	Escombros de construcción y demolición (escombros de concreto, losetas, desperdicios de ladrillos, etc.)	Industrial	Agregados fino y grueso Concreto Ladrillos/bloques Materiales para la sub-base de pavimentos

Nota: Adaptado de "Utilization of solid wastes in construction materials", por M. Safiuddin, M. Z. Jumaat, M. A. Salam, M. S. Islam & R. Hashim, 2010, International journal of physical sciences, 5(13), 1952-1963.

Aún con el gran avance en innovación de materiales con contenido de residuos, queda por responder la interrogante de si estas prácticas circulares son sostenibles. La literatura ha demostrado que una de las herramientas más eficientes para demostrar la veracidad o falsedad de esta afirmación es el ACV. Tal y como sostienen Haupt y Zschokke (2017), más allá de los intentos por retener el valor de los productos mediante mayores tasas de reciclaje y reutilización, el desempeño ambiental de los diseños de productos circulares y los cambios que involucran en el sistema deben ser cuidadosamente evaluados, y la herramienta ACV resulta ser un instrumento eficaz para este propósito.

Este análisis del beneficio ambiental que implica aplicar los principios de EC se ha observado en distintas gestiones de materiales como la de residuos de vidrio. Para ello, Deschamp et al. (2018) empleó el software SimaPro 8.2 como herramienta para el ACV, con el fin de analizar dos mezclas de concreto para veredas peatonales: una mezcla convencional y otra que posee polvo de vidrio como reemplazo parcial del cemento. Asimismo, las etapas analizadas del residuo de vidrio fueron la fase de producción, uso y fin de vida útil. Entre los resultados relevantes obtenidos, se puede mencionar la menor carga ambiental potencial que poseyó la mezcla con polvo de vidrio en cada uno de los indicadores ambientales analizados. Ello se demostró con la reducción en un 20% de la emisión de gases de efecto invernadero respecto a

la mezcla tradicional; sin embargo, los autores mencionan que se debe prestar especial atención al sistema de recolección de estos residuos de vidrio, entre ellos, el transporte.

Por otro lado, los análisis no solo conllevan a comparar materiales tradicionales con aquellos de índole circular, sino que también se pueden realizar evaluaciones entre propios productos que poseen insumos reciclados o reutilizados. Este es el caso del artículo propuesto por Colangelo et al. (2018), en el cual se examinaron cuatro mezclas diferentes de concreto con agregados reciclados: mezcla con cenizas de incinerador, mezcla con escoria de alto horno, mezcla con RCD y, mezcla con lodo producto del mármol. A través del software SimaPro y con una unidad funcional de 1m^3 , se consideraron a las etapas de extracción de materia prima, transporte y producción de concreto como los límites del sistema a analizar, y se mostró que el principal daño ambiental generado se relacionaba con la salud humana. Además de demostrar que estas 4 mezclas eran preferibles al concreto tradicional por reducir el calentamiento global, se concluyó que la mezcla con escoria fue la que obtuvo menor impacto ambiental adverso.

Es pertinente mencionar que si los resultados brindados por el ACV, no cumplen con los criterios de sostenibilidad evaluados, no se debería hacer cumplir la circularidad. Bajo estas condiciones, es fundamental analizar los cambios sistémicos o la reestructuración de las propuestas circulares que se tendrían que realizar para futuras evaluaciones del sistema (Haupt & Zschokke, 2017).

2.5. Revisión bibliográfica de sustitución de materias primas del concreto

De acuerdo con los temas tratados hasta el momento, el diseño de residuos permite la creación de un nuevo material dentro del panorama de la EC y, si se desea evaluar sus beneficios ambientales, la mejor opción es realizar un ACV. Por lo tanto, lo primero a determinar es la composición de dicho material circular.

Dada la amplia literatura con respecto al tema de materiales de construcción con contenido de residuos, esta investigación se enfoca en la sustitución de materias primas del concreto, más específicamente, en el reemplazo de agregado grueso natural para la elaboración de concreto estructural. Existe una gran cantidad de residuos con potencial para ser sustitutos del agregado grueso, sin embargo, la investigación se centra en los ACR. El objetivo de esta revisión bibliográfica es brindar la información necesaria para posteriores análisis dentro del marco metodológico de esta investigación.

El ACR está compuesto por agregados originales y mortero antiguo adherido. Sus características y la homogeneidad de sus propiedades están estrechamente ligadas con las propias características del concreto original, por lo que conocer la historia del mismo es de gran envergadura para evaluar el material sustituto de los agregados naturales (Chakradhara et al, 2011; Saldaña y Caballero, 2014). Aunque hay autores que afirman lo contrario, como Pani et al. (2020) y Rahal (2005), quienes sostienen que el comportamiento mecánico del concreto con ACR no se ve influenciado por las propiedades del concreto original.

Como componente de un concreto de calidad satisfactoria, el ACR debe cumplir algunos requisitos mínimos, principalmente en cuanto a estabilidad química y características físico-mecánicas, los cuales pueden ser establecidos en códigos o normas internacionales (Pellegrino & Faleschini, 2016). Por un lado, la estabilidad química hace referencia a propiedades como la reactividad potencial álcali-sílice, contenido de sulfatos y cloruros solubles en agua (Asociación de Productores del Cemento [ASOCEM], 2014). En este aspecto, investigaciones como la realizada por Corinaldesi (2011) demuestran la estabilidad del ACR. Dicha autora determinó que el ACR empleado en su investigación no poseía materiales reactivos álcali-sílice, y que los porcentajes de contenido de sulfatos y cloruros se encontraban por debajo de los valores límite.

Respecto a las propiedades físicas, se resalta el porcentaje de absorción del ACR, ya que se ha evidenciado valores mayores en comparación con el porcentaje de absorción de los agregados naturales. Ello se debe principalmente a la cantidad de mortero de cemento antiguo adherido a la superficie del agregado reciclado (Pani et al., 2020; Chakradhara et al., 2011; Rahal, 2005). Cabe resaltar que la presencia de dicha pasta de cemento también eleva la porosidad en el ACR y, consecuentemente, disminuye su densidad (Wagih et al., 2013; Etxeberria et al., 2007). Por ello, autores como Chakradhara et al. (2011) recomiendan el uso del ACR cuando se necesite un concreto ligero.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la más distinguida es la resistencia a la degradación por abrasión en la máquina de Los Ángeles (ASOCEM, 2014). La literatura demuestra que, a pesar de obtener valores mayores de desgaste por abrasión en los ACR respecto a los naturales, dichos valores se encuentran por debajo del límite máximo (Tarazona, 2019, Chakradhara et al. 2011).

Una vez evaluadas las propiedades del material circular, se procede al análisis de su desempeño como componente de la mezcla de concreto. En primer lugar, el ACR requiere estar en ciertas condiciones previas a su inserción en la mezcla. Un procedimiento común es el de saturar el agregado a fin de obtener la condición saturado superficialmente seco de las partículas (Rahal, 2005). Ello mantiene la trabajabilidad en la mezcla, ya que se crea un suministro adicional de agua que evita la gran reducción de la misma debido a la alta absorción del agregado (Corinaldesi, 2011). Más aún, para contrarrestar dicha falta de trabajabilidad, ciertos autores optan por añadir a las mezclas cantidades de aditivo superplastificante (Chakradhara et al., 2011; Pani et al., 2020; Wagih et al., 2013; Etxeberria et al., 2007; Pavón et al., 2011; Rahal, 2005) o reductores de agua (Corinaldesi, 2011).

El desempeño mecánico de las mezclas de concreto con ACR en estado endurecido ha sido evaluado de distintas formas. Incluso, algunos autores han optado por variar la relación agua/cemento, a fin de analizar su influencia (Deng et al., 2016; Corinaldesi, 2011).

Con base en la recopilación de datos, se ha demostrado que a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución, los esfuerzos de compresión, tracción y corte del concreto con ACR disminuyen en comparación al concreto convencional (Harish, B. et al., 2020; Wagih et al, 2013; Etxeberria et al., 2007; Rahal, 2005; Corinaldesi, 2011). Sin embargo, surgen investigaciones que, contrario a lo expuesto anteriormente, reportan valores mayores de esfuerzo para concreto con ACR en comparación a los valores de concreto convencional, hasta un límite de sustitución del 25% (Lozano y Sagastegui, 2019) y 50% (Deng et al., 2016; Saldaña y Caballero, 2014). Además, el efecto del porcentaje de sustitución también se da en el módulo de elasticidad, el cual disminuye ligeramente conforme va aumentando el porcentaje de ACR en la mezcla de concreto (Wagih et al, 2013; Corinaldesi, 2011; Bazalar y Cardellinas, 2019; Chakradhara et al., 2011; Rahal, 2005; Harish, B. et al., 2020).

Por último, se evidencia la influencia del ACR hasta en la falla de las probetas. Para los análisis de esfuerzo a tracción, la grieta se genera a través del agregado reciclado, en lugar de la zona de transición de interfase (ITZ), que es considerada como el punto más débil para los concretos convencionales (Etxeberria et al., 2007; Chakradhara et al., 2011; Bazalar y Cardellinas, 2019). Asimismo, en el ensayo de flexión se evidencia que el aumento en cantidad de grietas diagonales es directamente proporcional al aumento de ACR en la mezcla (Lozano y Sagastegui, 2019).

Como se ha podido observar, existe un gran número de investigaciones a nivel mundial, incluyendo algunas presentadas por autores nacionales. Las mencionadas en este capítulo son solo algunos ejemplares de la literatura que sirven para una posterior comparación que permita

escoger una dosificación adecuada. Aunque los dos grandes propósitos de la EC, de reducir la cantidad de residuos y el consumo de materias primas, ya se están cumpliendo al optar por este tipo de materiales de construcción, es necesaria una evaluación del impacto ambiental que permita validar su desempeño sostenible, lo cual se logra mediante un ACV.

2.6. Lean Construction como herramienta dentro del marco de EC

2.6.1. El pensamiento *Lean* en la construcción

Lean Production nació como nueva filosofía de producción con una visión dual: consiste en conversiones y flujos. Mientras los procesos de conversión hacen referencia al propio procesamiento de los materiales, los procesos de flujo involucran actividades de inspección, espera y movimiento de los materiales de un lugar a otro (Koskela, 1992). Por tal motivo, si se busca optimizar el sistema de producción, el sistema Lean tendrá dos principales objetivos: Por un lado, reducir o eliminar las actividades de flujo y, por el otro, hacer más eficientes las actividades de conversión.

En el año 1992, Lauri Koskela introduce por primera vez un nuevo enfoque en la construcción, conocido hoy en día como *Lean Construction* o “Construcción sin pérdidas” en su trabajo “Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción”, producido en el grupo de investigación CIFE de la Universidad de Stanford.

Koskela (1992) define a *Lean Construction* como una forma de diseñar el sistema de producción para minimizar las pérdidas de materiales, tiempo y esfuerzo y generar la máxima cantidad posible de valor. Del mismo modo, el *Lean Construction Institute*, fundado en 1997 por Glean Ballard y Greg Howell, define a *Lean Construction* como una filosofía que se orienta hacia la administración de la producción en construcción y, busca reducir o eliminar las actividades que no agregan valor al proyecto y optimizar las actividades que sí lo hacen (Lean Construction Institute, 2015).

La filosofía *Lean*, basada en los principios de *Lean Production*, logra conseguir un flujo de trabajo fiable y predecible, una cadena productiva eficiente y oportuna de tal manera que se logren sus dos principales objetivos: la maximización del valor y la reducción de pérdidas o desperdicios (Brioso, 2015). De esta forma, la gestión *Lean* de proyectos de construcción emerge como alternativa al sistema tradicional gestionado con la guía PMBOK del *Project Management Institute*, el cual mostró ser deficiente por dos motivos: el modelo de conversión que maneja y el enfoque totalmente centrado en la planificación, dejando de lado el control y ejecución (Sánchez, 2012).

En lo que respecta al modelo de conversión manejado por el sistema tradicional, Rojas et al. (2016) definen dicho modelo como una transformación de insumos a productos, donde el cambio de las entradas en salidas es tratado como una caja negra, como se aprecia en la Figura 2.6. Ello significa que el sistema no enfoca el análisis en lo que pasa durante la transformación y pierde de vista la gestión de los procesos de flujo. La falta de control y mejora de los mismos ha conllevado a procesos de flujo complejos, inciertos y confusos, expansión de actividades que no agregan valor y reducción del valor de producción (Koskela, 1992).



Figura 2.6. Modelo de producción tradicional. Obtenido de “Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual” por H. Porras, O. G. Sánchez & J. A. Galvis, 2014, Avances: Investigación en Ingeniería, 11(1), 32-53.

Ante esto, *Lean Construction* introduce un modelo de transformación-flujo-valor (TFV), el cual propone la visión del sistema de producción como una transformación de materiales, un flujo de recursos y una generación de valor (Porras et al., 2014). El modelo TFV rescata la importancia de los procesos intermedios como flujos durante la transformación de los insumos

a productos, ya que después de la entrada hay procesos de transporte, esperas, inspecciones y, en muchas ocasiones, reparación de trabajos, para llegar al producto (Rojas et al., 2016), tal y como se observa en la Figura 2.7. De la misma forma, resalta la búsqueda de todo aquello que agregue valor para así eliminar los desperdicios y hacer más eficiente el proceso productivo. Esta teoría implica que tanto la gestión de tareas (proceso de transformación), la gestión de flujo y la gestión del valor se lleven a cabo de forma sistemática y en equilibrio mutuo (Koskela, 1999).

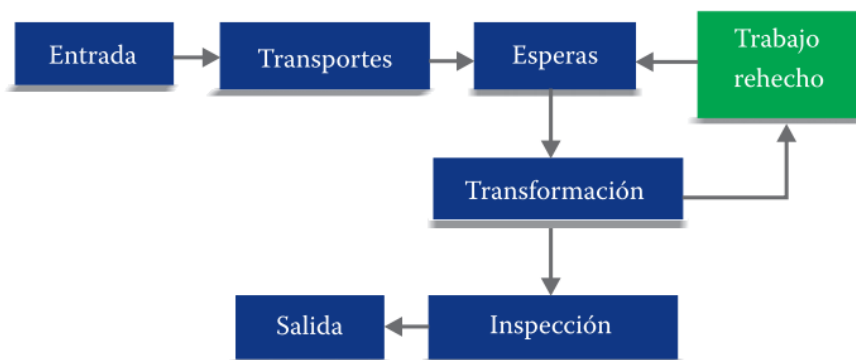


Figura 2.7. Modelo de producción lean o TFV. Obtenido de “Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual” por H. Porras, O. G. Sánchez & J. A. Galvis, 2014, Avances: Investigación en Ingeniería, 11(1), 32-53.

Es importante identificar aquellas actividades que generan desperdicios dentro de la cadena de valor para el debido control, ya sea mediante su eliminación o reducción. Al respecto, Taiichi Ohno definió siete desperdicios y a continuación se presenta cada principio adaptado por Pons (2014) al rubro de la construcción.

1. Sobreproducción: Producción de cantidades más grandes que las requeridas o más pronto de lo necesario.
2. Esperas o tiempo de inactividad: Lapsos de tiempo no productivos dentro de la cadena de valor debido a falta de información, órdenes no designadas correctamente, contradicciones en los documentos de diseño, retrasos en el propio proceso, entre otros.

3. Transporte innecesario: Movimientos internos de recursos innecesarios a causa de una mala distribución y falta de planificación de los flujos de materiales e información. Ello conduce a pérdidas de energía, espacio y daños en el material.
4. Sobre procesamiento: Procesos adicionales en la construcción o instalación de elementos que causan el uso excesivo de materia prima, equipos, energía, etc.
5. Exceso de inventario: Exceso de materia prima pedida con antelación lo cual conduce a pérdidas por deterioro, robo y vandalismo además de la inversión en personal adicional para gestionar ese exceso y costes financieros por la compra anticipada.
6. Movimientos innecesarios: Movimientos innecesarios o ineficientes realizados por el personal durante su trabajo. Ello puede ser causado por la utilización de equipo inadecuado, métodos de trabajo ineficaces, falta de estandarización o mal acondicionamiento del lugar de trabajo.
7. Defectos de calidad: Errores en el diseño, mediciones y planos, métodos de trabajo incorrectos, mano de obra poco cualificada, entre otros. Ello conduce a la obtención de un producto que no satisface las condiciones del cliente.

Finalmente, se hace referencia a las deficiencias del sistema tradicional de gestión causadas por el enfoque totalmente centrado en la planificación. Ante esto, *Lean Construction*, propone un esquema complementario y dinámico de interacción entre la planificación y el control de los procesos. Mientras que en la planificación se definen los criterios y las estrategias necesarias para alcanzar los objetivos del proyecto, en el control se asegura el cumplimiento de la cadena productiva acorde a la secuencia de actividades planificadas (Aziz & Hafez, 2013).

2.6.2. Herramientas Lean Construction

Existen múltiples herramientas que permiten materializar los principios Lean en la construcción. En este acápite se detallan algunas de ellas, las cuales sirven para dar sustento a las secciones posteriores de Estado del Arte y Metodología.

Just In Time (JIT)

Sistema para controlar el inventario y la sobreproducción, el cual entrega lo que se necesita, cuando se necesita y en la cantidad que se requiere (Pons, 2014). Es descrito como una expansión del concepto de administración del flujo de materiales que permite, a su vez, reducir el tiempo de ejecución, distribuir los equipos para disminuir los tiempos de viaje, evitar tiempos prolongados de preparación, reprocesamientos y averías de máquinas, entre otros (Singh & Garg, 2011).

Un componente fundamental del JIT es el sistema *pull*, el cual busca evitar un exceso de inventario y sobreproducción provocados por malas conjeturas. Este sistema de control de producción analiza las actividades aguas abajo para que brinden las respectivas señales a las actividades aguas arriba, según la cadena de valor. El sistema *pull* es opuesto al tradicional *push*, en el cual se producen grandes cantidades de recursos a velocidad máxima y éstos son empujados hacia los procesos siguientes aguas abajo, sin tener en cuenta el real ritmo de trabajo (Pons, 2014). De acuerdo con los principios de Toyota presentados en el libro de Gao y Pheng (2014), el sistema *pull* se encuentra relacionado con el plan *lookahead* del *Last Planner System* (LPS), el cuál es explicado a continuación.

Last planner System o Sistema del Último Planificador

Sistema especialmente diseñado para mejorar el control de la incertidumbre en los proyectos, lo cual se consigue aumentando la confiabilidad de los planes a través de acciones concretas en los diferentes niveles de la planificación (Alarcón & Pellicer, 2009).

Se definen 3 niveles de planificación: el plan maestro o plan general, el plan intermedio o *lookahead*, y el plan semanal o plan a corto plazo, como se muestra en la Figura 2.8. Rodríguez et al. (2011) sostienen que el plan maestro es aquel que define las tareas que “deberían” hacerse con una planificación de todas y cada una de las actividades del proyecto, lo cual incluye la definición de las relaciones en el tiempo y espacio entre las diferentes actividades, así como del alcance y los plazos de entregas. Asimismo, dichos autores afirman que el plan intermedio, como siguiente nivel de planificación, define lo que se “puede” hacer en el periodo de tiempo que abarca. Al respecto Hoyos y Botero (2018) sostienen que el plan intermedio busca reducir la incertidumbre del proceso constructivo, al detectar todas las restricciones que limitan su ejecución, con el fin de eliminarlas y asegurar una vía libre para el inicio oportuno de las tareas. Finalmente, el plan semanal define lo que “se hará” durante la semana entrante en función de los objetivos cumplidos en la planificación semanal finalizada y de lo previsto por la planificación intermedia. (Rodríguez et al., 2011). En la Figura 2.9 se observa cómo la planificación se focaliza a medida que se atraviesan los distintos niveles de planificación.

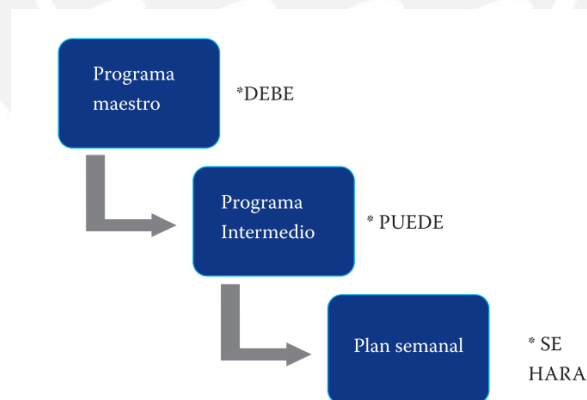


Figura 2.8. Sistema de planificación Lean. Obtenido de “Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual” por H. Porras, O. G. Sánchez & J. A. Galvis, 2014, Avances: Investigación en Ingeniería, 11(1), 32-53.

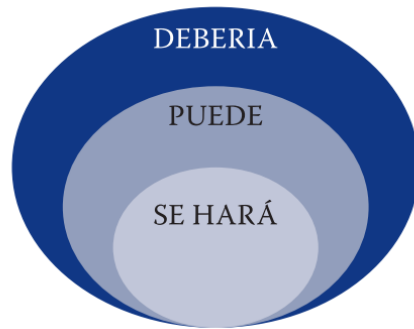


Figura 2.9. Sistema de planificación Lean. Obtenido de “Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual” por H. Porras, O. G. Sánchez & J. A. Galvis, 2014, Avances: Investigación en Ingeniería, 11(1), 32-53.

De esta forma, el LPS controla de una manera más efectiva la ejecución de las actividades necesarias para completar el proyecto, asegurándose de que lo que se planea hacer en la obra realmente será hecho, y así evitar defectos del sistema que posteriormente se traduce en pérdidas en tiempo y dinero. La implementación de esta herramienta logra un mejoramiento en los flujos de trabajo y facilita un mejor control de la variabilidad de los proyectos de construcción (Porras et al., 2014).

5S

Metodología japonesa cuya denominación proviene de la primera letra de cada una de las 5 etapas incluidas en esta técnica (en japonés). La primera etapa es organizar, que implica retirar del campo todos los elementos no necesarios; la segunda es ordenar, ya que prioriza la organización de los elementos que sí son necesarios para su fácil empleo; la tercera es limpiar, la cual hace referencia a las condiciones de seguridad y salud; la cuarta, estandarizar, implica mantener las tres etapas anteriores y; finalmente, la quinta etapa, disciplina, significa convertirlo en un hábito. Su aplicación aumenta la calidad de los productos, disminuye desperdicios, evita obstáculos, aumenta la disponibilidad de equipos, entre otros (Pons, 2014).

Buffers

Los *buffers* surgen como estrategia complementaria para proteger de la variabilidad a los procesos de producción en los proyectos de construcción. (Vicente & Alarcón, 2003). Su implementación busca independizar un proceso de su entorno y, por ende, protegerlo de las condiciones erráticas del ambiente (Koskela, 2000).

Diversos autores han definido los *buffers* en construcción según la función que cumplen. Horman y Thomas (2005) presentan una definición de los tres principales.

- Buffer de contingencia: Son cantidades de tiempo o costo extra agregados a los originales cronograma o presupuesto respectivamente.
- Buffer de inventario: Son cantidades de materiales adquiridos en exceso a fin de proteger los flujos de producción de condiciones inciertas relacionadas con los procesos de adquisición de materiales.
- Buffer de capacidad: Asignación de mano de obra y equipo del proyecto en exceso como protección contra demandas variables del proyecto.

Si bien es cierto, la utilización de *buffers* implica pérdidas o desperdicio según el modelo *Lean*, no utilizarlos volvería frágiles los procesos de producción en la construcción. Ello se debe a que, aunque se apliquen técnicas de control de producción y se estabilicen los procesos, aún existe variabilidad que permanece (Vicente & Alarcón, 2003).

2.6.3. Administración de materiales con *Lean Construction*

Se denomina administración de materiales al proceso mediante el cual una organización recibe los bienes y servicios que necesita para lograr sus objetivos. La efectividad de la administración de materiales resulta ser la clave del éxito de un proyecto de construcción. Ello se debe a que el costo de los materiales puede llegar a abarcar hasta más del 60% del costo total del proyecto (Gulghane & Khandve, 2015).

Existen diversos factores que afectan a la administración de materiales. Jusoh y Kasim (2017) identificaron una gran cantidad de ellos y los agruparon en 8 categorías: planificación y manipulación en el sitio, condiciones del sitio, materiales, defecto en los fabricantes y proveedores, transporte, grupo contractual e interferencia del gobierno. Asimismo, dentro de estos conjuntos, es importante mencionar los problemas de falta de comunicación entre la oficina principal y la ubicada en obra y, la escasez de recursos en almacenamiento. Todos estos factores deberían ser tomados en cuenta por los contratistas para mejorar la eficiencia en su futura gestión de materiales.

Este proceso administrativo puede ser dividido en ocho fases: planeación, negociación, pedido, recepción, almacenamiento, uso, pago y control. Respecto a la primera fase, se identifican y cuantifican cada uno de los materiales, incluida la merma o los desperdicios. Más adelante, durante el pedido, se envía una solicitud de dicha cantidad de materiales al área de producción, para programar la adquisición de estos. Asimismo, es importante destacar que, para el almacenamiento de los recursos, se pueden emplear espacios abiertos o cerrados estratégicamente seleccionados para minimizar los traslados dentro de la obra (Solís et al., 2009).

Para administrar materiales dentro de proyectos complejos, rápidos e inciertos, no se pueden emplear los métodos tradicionales. Por ello, con el objetivo de desarrollar técnicas prácticas y sólidas que ayuden al equipo de proyectos a solucionar estos temas, es que surge el empleo del sistema *Lean Construction*. Además, al emplear esta metodología, se puede garantizar un flujo de producción confiable y predecible, en la que se pueden reducir o eliminar desperdicios que interfieran en la cadena de suministro (Ansah et al., 2016).

La cantidad de fuentes literarias que abarcan el tema de administración de materiales mediante herramientas *Lean* es extensa. Entre ellas se puede mencionar un caso de estudio en China

(Xing et al., 2020), el cual empleó métodos de *Lean Construction Managment* durante la construcción de edificaciones industriales. Por un lado, el LPS permitió planificar y programar. Por otro lado, el JIT destacó la importancia de un flujo de trabajo y logística continuos que propiciaban una optimización en el manejo de materiales. Así, con la ayuda de LPS, el cronograma de construcción fue claramente definido, mientras que la logística del JIT previó que los recursos estén disponibles en el momento adecuado, en la cantidad óptima, con los recursos necesarios, y solo cuando las asignaciones anteriores hayan sido terminadas.

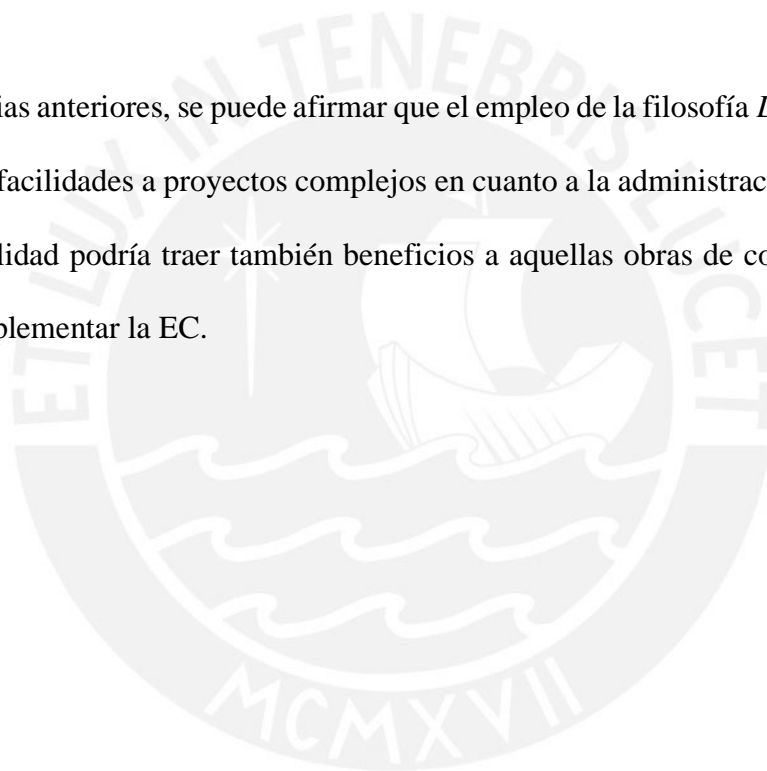
Asimismo, se pueden mencionar a Skjelbred et al. (2015), quienes establecieron esbozos de *layouts* del sitio durante la fase de diseño, con el fin de elegir el más factible y económico. Dichos bosquejos contaban con rutas planeadas para que los camiones depositaran los materiales en el lugar preciso y se evitaran conflictos. Ello permitió observar las rutas críticas y crear un cronograma para los pedidos de materiales, con lo cual se obtuvo información de qué se necesitaba, cuándo y por quién. Finalmente, la aplicación del JIT evitó la ocupación innecesaria de espacio y posible daño de los recursos.

Como se ha podido observar, el gestionar el espacio es también considerado una herramienta importante para organizar los flujos de materiales. Así lo afirman Tsao y Lidelöw (2017), quienes emplearon, en un caso de estudio, herramientas *Lean* como la entrega de materiales basado en el sistema *pull* para limitar el desorden en el sitio por un exceso de recursos. Con dicha información, las investigadoras desarrollaron una hoja de cálculo que examinó el espacio ocupado por un material y el tiempo de uso de dicho espacio. Finalmente, concluyeron que un enfoque sencillo de planificación mejora la proactividad de los trabajadores en la gestión de materiales.

Otra investigación que respalda la estrategia *pull* es la presentada por Kim y Kim (2014), quienes presentaron un sistema de gestión de proyectos aplicado a un proyecto piloto. Este

sistema consistió en un método de cronograma, labor, equipo, control de calidad y administración de materiales, el cual a través del sistema *pull* redujo el inventario en sitio. Entre sus conclusiones, se menciona que los costos de los materiales abarcan aproximadamente el 50% del costo total de la edificación, razón por la cual el planeamiento de la producción del material y el inventario de materiales a nivel bajo son esenciales. Más aún, los autores recomendaron mejorar la calidad del proceso de adquisición de materiales a través de una planificación más confiable de los trabajos diarios y la colaboración de subcontratistas y proveedores.

Tras las evidencias anteriores, se puede afirmar que el empleo de la filosofía *Lean Construction* brinda mayores facilidades a proyectos complejos en cuanto a la administración de materiales. Por ende, su utilidad podría traer también beneficios a aquellas obras de construcción en las que se desea implementar la EC.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En esta sección se detallará la información preliminar obtenida del caso de estudio. Además, se detallarán los pasos a seguir a fin de precisar la metodología de la presente investigación.

3.1. Definición y descripción del caso de estudio

Para la implementación de EC en la construcción, se definió una obra de edificación como caso de estudio. El proyecto Los Parques de Comas, presentado por la empresa VIVA Graña y Montero, es un conjunto de condominios ubicado en el antiguo Aeródromo de Collique. El proyecto posee como límites a la avenida República de Israel, calle 21, avenida Manuel Gonzáles, calle Bernardo Monteagudo y Avenida A, en el distrito de Comas, provincia y departamento de Lima, como se puede observar en la Figura 3.1. Debido a la magnitud del proyecto, la presente tesis se centra en el edificio 12 (ver Figura 3.2) ubicado dentro de la Etapa Laureles, denominada también etapa III o Manzana B, la cual forma parte de las 6 etapas del megaproyecto, consta de 5 edificios y posee áreas de recreación como parques y zona de lectura.

Este edificio se desarrolla en un terreno de 478,77 m² aproximadamente, en gran parte de lo que antiguamente fue el *hangar* del aeródromo, con una duración estimada de 12 meses aproximadamente para su construcción. Posee 16 pisos, 2 ascensores y se encuentra conformado por 128 departamentos tipo flat entre 2 y 3 dormitorios. En la Figura 3.3, se observa un departamento típico de 50,3 m², que cuenta con 01 dormitorio principal, 02 dormitorios secundarios, 01 servicio higiénico, sala – comedor, cocina y lavandería.

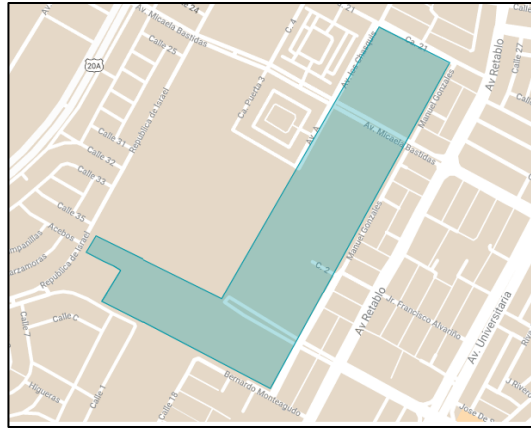


Figura 3.1. Ubicación del proyecto.

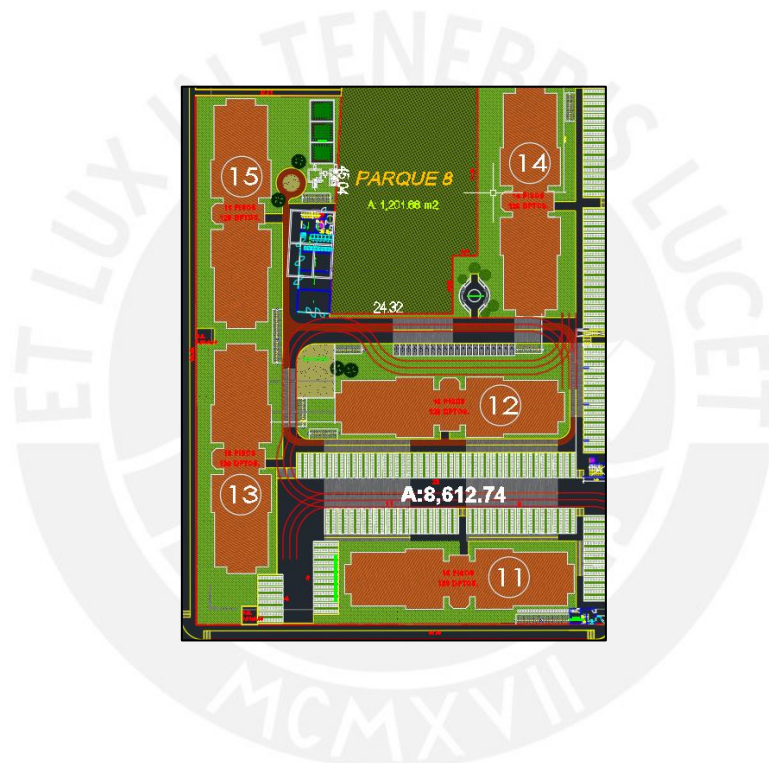


Figura 3.2. Etapa III del proyecto. Obtenido del proyecto “Los Parques de Comas”.

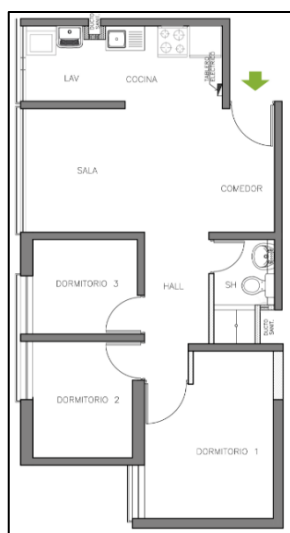


Figura 3.3. Planta típica de un departamento. Obtenido de “Condominio Los Laureles”, por VIVA, s.f. Recuperado de <http://www.viva.com.pe/nuestros-proyectos/proyecto/Condominio-Los-Laureles>

La obra tiene la singularidad de emplear la filosofía *Lean* en los procesos de planificación y construcción, lo cual fue un factor importante tomado en cuenta al momento de la elección del caso de estudio, ya que parte del presente análisis incluye el uso de herramientas *Lean* para la administración de materiales dentro del panorama de EC. Además, al ser una obra de vivienda multifamiliar, facilita el análisis porque el tipo de planta es típica en la mayoría de los casos.

Para poder desarrollar dicha evaluación, por un lado, se identificaron y describieron las diferentes herramientas *Lean* que se emplearon durante el planeamiento de la obra. Dichas herramientas son capaces de efectuar correctamente la administración de materiales dentro de la obra y, por ello, fueron tomadas en consideración para el análisis. Por otro lado, en lo que respecta al material evaluado, definido como las mezclas de concreto, se recolectó información referente al proyecto.

Los Parques de Comas cuentan con una planta dosificadora de concreto que abarca un área de 4 575,11m² y es maniobrada por un operador calificado. La planta se ubica en el sector asignado como la última etapa a entregar, de tal manera que permite abastecer a la serie de condominios que se darán lugar dentro del proyecto. De acuerdo con el ingeniero a cargo de la planta

dosificadora, el posicionamiento de dicha planta dependió, en gran medida, de la ejecución de zonas externas a los edificios. Ello debido a que la Municipalidad de Comas solicitaba el desarrollo de la habilitación urbana (HU) antes de iniciar con la ejecución de los propios condominios y, por ello, primero se tenía que dar inicio a la construcción de pistas y demás trabajos externos. Por esta razón, durante el análisis de la posición más óptima para la planta, se tuvo en cuenta el evitar el cruce con algún parámetro urbanístico y se optó por situarlo en el Parque 16. Lo antes descrito se puede observar en la Figura 3.4. Cabe resaltar que la distribución y arquitectura de la figura no es la actualmente empleada y, por ello, se aprecia una superposición de la planta sobre la huella de los edificios.

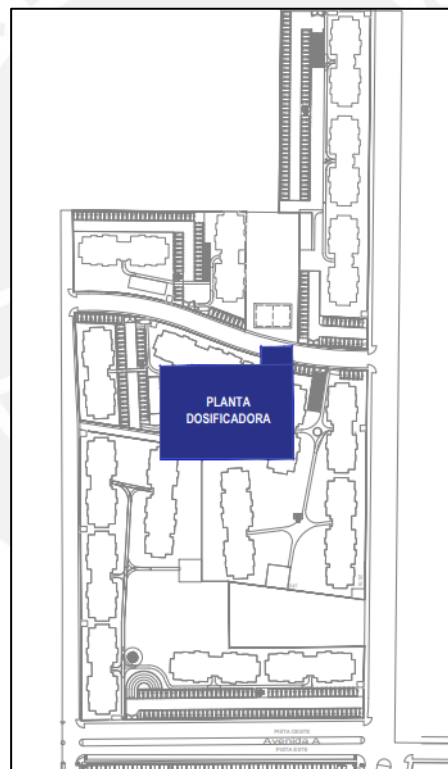


Figura 3.4. Esquema de ubicación de la planta dosificadora en el proyecto.

Herramientas Lean usadas en Obra

Acorde a la información proporcionada por los responsables del proyecto, la principal herramienta usada fue el LPS. Para ello, se ejecutó un cronograma total del proyecto y, se establecieron una sectorización y un tren de actividades.

Respecto a la sectorización, se dispusieron de 04 sectores en cada planta típica, de tal manera que el número de sectores sea igual a la cantidad de días que dure el tren de actividades de vaciado por piso. En cuanto a este último aspecto, las actividades tomadas en cuenta dentro de la partida de estructuras son aquellas que involucran el consumo de concreto como vaciado de muros y losa, colocación de concreto caja de escalera y, colocación de concreto pasos y contrapasos escalera. Estas tres actividades sirven para el análisis de la presente tesis acorde a las delimitaciones de su alcance.

Por otro lado, el proyecto empleó un *layout* para la organización interna de la planta dosificadora de concreto; la cual se considera, para esta investigación, como una herramienta 5S. En dicho bosquejo, se aprecia el esquema de organización de la planta, donde se puede observar que la ruta de circulación de las maquinarias no genera alguna interrupción con otras áreas de trabajo. Asimismo, se sitúan los puntos de acopio de los agregados a una distancia cercana respecto a la tolva donde son introducidos mediante un minicargador. En esta zona, de acuerdo con la información brindada, se construyó una rampa para alimentar los agregados a la tolva, debido a la diferencia de altura entre el borde de este elemento y el suelo y, para que la maquinaria descargue los materiales de manera suave.

3.2 Marco metodológico

La metodología expuesta en la presente investigación consiste en tres grandes bloques. En primer lugar, se presentó el análisis de la revisión bibliográfica, cuyo fin fue respaldar uno de los objetivos secundarios de la tesis mediante una serie de autores que validen el uso de ACR para concreto con fines estructurales. Además, se partió de esta revisión bibliográfica para definir la dosificación de concreto con agregado reciclado. El segundo bloque consistió en un ACV que permita evaluar el desempeño ambiental del material circular y, por ende, su sostenibilidad. Finalmente, en el tercer bloque se analizó la administración de material concreto

reciclado mediante el uso de herramientas *Lean*, a fin de evaluar la contribución de las mismas e identificar los cambios originados en dicha administración bajo el panorama circular. Todo lo mencionado se muestra, de forma esquemática, en la Figura 3.5.

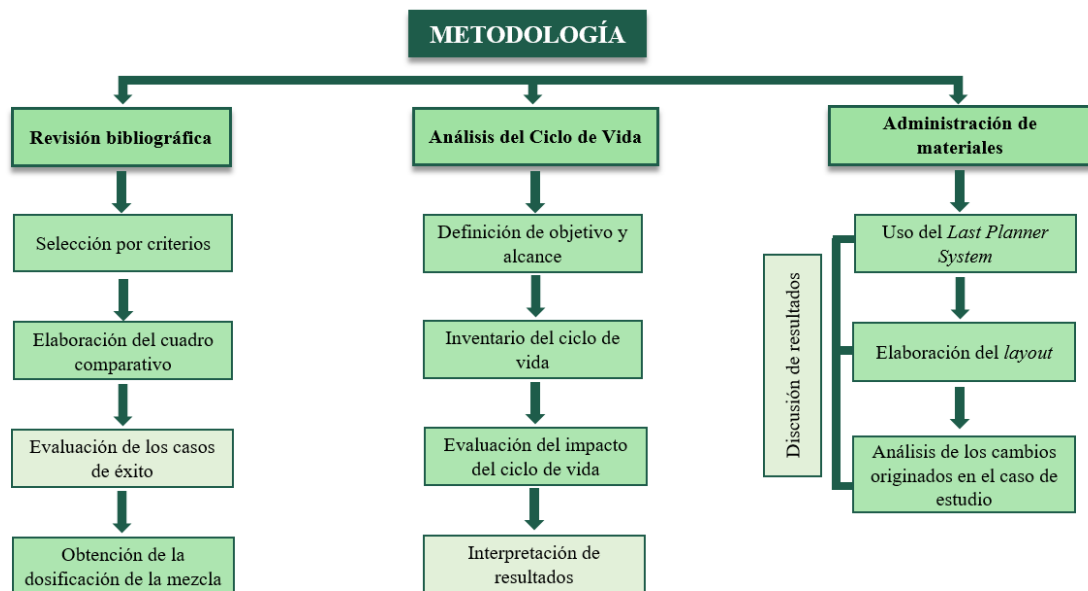


Figura 3.5. Metodología de la presente investigación.

En los siguientes capítulos, se van a presentar los detalles metodológicos de cada bloque, así como sus resultados y, posteriormente, las pertinentes conclusiones acorde a la hipótesis y los objetivos planteados en la presente investigación.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como propuesta de la presente investigación, se optó por la sustitución parcial de agregados naturales por ACR como vía para implementar la EC en la construcción. Para ello, se partió de la recopilación de diversas investigaciones a nivel nacional y mundial en torno al concreto con agregado reciclado, las cuales fueron finalmente escogidas en base a una serie de criterios. A partir de dichas investigaciones, expuestas en el Capítulo de Estado del Arte, se desarrolló un cuadro comparativo que resume las principales características de las mezclas de concreto propuestas por los autores. Ello incluye proporciones y características de los diferentes componentes de las mezclas, uso de aditivos y posteriores resultados de ensayos que dieron a conocer sus propiedades mecánicas.

El cuadro comparativo permitió hacer un análisis de los distintos casos y definir un valor adecuado de sustitución, propiedades específicas del ACR, así como el uso o no de aditivo. Las estimaciones conseguidas sirvieron para modificar una dosificación aproximada del concreto, usada en la obra estudiada, y así obtener una adecuada mezcla de concreto con ACR como componente parcial del agregado grueso. Finalmente, dicha dosificación obtenida sirve para una posterior evaluación de impacto ambiental y su respectiva administración en obra, planteada en la presente investigación. Para facilitar la terminología, se denomina concreto reciclado a aquel cuya mezcla contiene un porcentaje de reemplazo de agregados gruesos naturales por ACR.

4.1. Revisión literaria

Se realizó una revisión bibliográfica de publicaciones en revistas científicas internacionales, así como de tesis en repositorios institucionales. En ambos casos, la búsqueda fue íntegramente de índole digital debido a la actual situación pandémica mundial, la cual impide el acceso a bibliotecas de manera presencial. Por un lado, entre las revistas científicas se pueden mencionar al *Cement and Concrete Research*, *Sustainability*, *Building and Environment*, *HBRC*, entre otros. Las fuentes bibliográficas obtenidas de estas revistas provinieron de países como Cuba,

Italia, Egipto, India, entre otros. Por otro lado, las tesis pertenecieron en su mayoría a instituciones universitarias nacionales de diversas partes del país. Todo ello fue posible gracias al empleo de buscadores como ALICIA, *Google Scholar* y el Sistema de Bibliotecas PUCP, en el cual se utilizaron bases de datos como *Ebsco Research Database* y *Science Direct Elsevier*.

4.2. Selección por criterios

Debido a la gran variedad de bibliografía encontrada, se optó por filtrar estas investigaciones. Cabe resaltar que aquellos autores citados en el Capítulo de Estado del Arte corresponden a las investigaciones escogidas al finalizar este proceso. Los criterios con los que se realizó el descarte se detallan a continuación.

1. Fines estructurales: Lo que se buscó principalmente fueron investigaciones orientadas a la obtención de concreto estructural con contenido de agregado reciclado. Es preciso destacar que se verificaron los criterios en cada investigación para decidir si era estructural o no, ya que cada país maneja una distinta normativa. En el caso de las investigaciones realizadas en el Perú, los valores de f_c como resistencia objetivo estuvieron entre 210 y 280 kg/cm².
2. Origen del ACR: Los agregados reciclados tienen gran variedad de fuentes y es precisamente el origen del concreto uno de los principales influyentes en sus propiedades. Por tal motivo, y para fines de esta tesis, se optó por escoger solo aquellas investigaciones que emplearon ACR obtenido de la trituración de elementos de concreto, clasificados como RCD.
 - Se descartaron aquellas cuyo ACR tenía porcentajes considerables de otros materiales como ladrillos y bloques de arcilla.
 - Se descartaron aquellas cuyo ACR era proveniente de la trituración de probetas de laboratorio, ya que el concreto en este caso difiere respecto al empleado en obra por distintos motivos como su edad y su exposición a cargas.

- Se descartaron aquellas cuyo ACR era proveniente de la trituración de elementos prefabricados, considerados desperdicios del proceso de producción.
- 3. Reemplazo únicamente de agregado grueso por ACR: Se han encontrado varias investigaciones dedicadas a evaluar las propiedades de concretos con porcentajes de agregado grueso y fino reemplazados por ACR. Sin embargo, el agregado reciclado fino tiene ciertas desventajas para llegar a ser buen reemplazo, entre ellas el elevado porcentaje de absorción y la notoria disminución de la resistencia a la compresión del concreto (Hafez et al., 2020). Para este caso, se ha optado por enfocar la presente tesis únicamente en el reemplazo de agregado grueso por ACR cuyas propiedades mecánicas han sido estudiadas a mayor profundidad.
- 4. Cumplimiento de los requisitos mínimos por Normativa: Aún con la variedad de las investigaciones, se escogieron solo aquellas cuyos resultados cumplieron con los fines estructurales con los que se propusieron.

4.3. Elaboración de cuadro comparativo

Al término de este proceso de selección, se contó con un total de 13 investigaciones, de las 63 encontradas inicialmente. Seguidamente, se realizó un cuadro comparativo (ver Anexo A), en el cual se resumen las principales características tanto de la dosificación de la mezcla como de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Cabe resaltar que, para cada investigación, se respetaron los sistemas de unidades de sus resultados. A continuación, se describen algunas de las consideraciones que se tuvieron para introducir dichas propiedades en el cuadro comparativo.

- En la columna Tipo de cemento, se colocaron las clasificaciones de los cementos empleados de acuerdo al American Society for Testing and Materials (ASTM), con el fin de uniformizar y equiparar la información.

- En la columna Resistencia objetivo, se introdujo la resistencia de diseño de la mezcla y/o la resistencia alcanzada por un concreto que no poseía agregados reciclados en su composición (concreto patrón), el cual fue elaborado por los propios autores.
- En la columna Propiedades mecánicas, se puede observar una magnitud porcentual que indica la mayor o menor diferencia en términos de resistencia del concreto con ACR respecto a la resistencia objetivo.

4.4. Evaluación de los casos de éxito

El cuadro comparativo resultó ser la forma más sencilla y efectiva de resumir la información, lo cual permitió hacer equiparaciones y, estimar valores y rangos de aquellas características interesantes para la siguiente etapa de la metodología. En las siguientes líneas, se explica a más detalle el análisis de ellas.

Porcentaje de sustitución

Resulta evidente que la principal información que se necesita es el porcentaje de sustitución de agregado grueso natural por ACR. Por ello, en base a la revisión bibliográfica, fue coherente optar por un valor de 50% de sustitución.

Propiedades mecánicas

La resistencia a la compresión del concreto es usualmente considerada como la propiedad más valiosa dentro de sus propiedades mecánicas, ya que brinda un panorama general de la calidad del concreto y se relaciona directamente con las otras propiedades (Wagih et al., 2012). De acuerdo con el cuadro comparativo, 5 fuentes literarias poseen un f'_c de 210 kg/cm² o similar, con lo que se demuestra que sí es posible obtener mezclas con ACR que alcancen una resistencia concordante con el concreto estructural del caso de estudio. Más aún, el resto de mezclas poseen una resistencia entre 300 y 450 kg/cm², es decir, magnitudes mayores.

Porcentaje de absorción

Una de las conclusiones principales a la que se llegó en esta revisión bibliográfica es que el origen del agregado influye en sus propiedades, entre ellas, y de hecho una muy predominante para las propiedades del concreto en estado fresco, es el porcentaje de absorción.

La revisión bibliográfica permitió estimar un rango entre 3-7% de absorción del ACR, teniendo en cuenta que todos los orígenes de donde provinieron los ACR son RCD.

Uso de aditivos

Con la revisión bibliográfica, se ha podido observar que la presencia de aditivos resulta ser beneficiosa para el diseño de la mezcla, por el aporte de excelentes resultados en más de una ocasión. Por ejemplo, para aquel grupo de investigaciones cuyo $f'c$ de diseño se asemeja al 210 kg/cm^2 , se visualiza un caso de éxito como el de Rahal (2007), quien empleó superplastificante y cuya mezcla llegó a una resistencia de 25,1 MPa.

El uso de aditivos plastificantes implica un aumento del asentamiento o slump requerido por el diseño de mezcla (trabajabilidad) sin modificar las demás proporciones de dosificación, lo cual resulta ser beneficioso sobre todo para un concreto reciclado, cuya disminución de la trabajabilidad es considerable debido a la gran cantidad de agua absorbida por el ACR.

4.5. Dosificación de la mezcla de concreto con ACR

Para efectos de esta investigación, se desarrolló el proceso de dosificación para la mezcla convencional y se dio a conocer las modificaciones necesarias para la dosificación con porcentaje de ACR. En esta sección es importante aclarar que la dosificación de mezcla real no se logró obtener; sin embargo, se proporcionaron ciertos datos específicos del caso de estudio.

La información obtenida se detalla a continuación.

- $F'c$ 210 kg/cm^2
- Huso 67, lo que indica un TMN de $\frac{3}{4}$ "
- Módulo de fineza del agregado fino y del agregado grueso
- Uso de aditivo TM 40 de Sika
- Peso específico del cemento Pórtland Tipo I

Con el fin de complementar la información necesaria para realizar una dosificación propia acorde a la metodología ACI 211, se optó por emplear los datos de laboratorio obtenidos por Saldaña y Caballero (2014) para su investigación. Debido a que se simuló la dosificación de la mezcla en campo, se requirieron también los porcentajes de humedad actual y absorción de los agregados para las debidas correcciones. Cabe resaltar que dicho valor de porcentaje de absorción se ubicó dentro del rango estimado por la revisión bibliográfica. Toda la información conseguida de la fuente citada se describe a continuación.

- Peso específico del agregado fino
- Porcentajes de absorción y humedad del agregado fino
- Peso específico del agregado grueso
- Peso unitario varillado del agregado grueso
- Porcentajes de absorción y humedad del agregado grueso
- Peso específico del agregado reciclado
- Porcentajes de absorción y humedad del agregado reciclado

Para el procedimiento, con el $f'c$ definido se calculó el $f'cr$ igual a 294kg/cm^2 . Además, se definió el revenimiento entre 6 y 8 pulgadas. Con estos valores, se determinó la relación agua/cemento mediante una interpolación de valores acorde a la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Correspondencia entre la relación agua/cemento, en peso (w/c) y la resistencia a la compresión simple del concreto

Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm ²)	Relación agua/cemento, por peso (w/c)	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.54	0.45
250	0.61	0.52
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

Nota: Adaptado de “211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2002)”, por ACI Committee 211, 2002.

Para la dosificación, se requirió determinar el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto acorde a la Tabla 4.2. Además, fue necesario determinar el volumen de agua y contenido de aire ocluido en función del revenimiento y el tamaño máximo nominal del agregado como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.2. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo del agregado grueso		Volumen de agregado grueso varillado en seco, por agregado grueso Tamaño Máximo del volumen unitario de concreto, para diferentes Módulos de Fineza de arena			
(mm)	(Pulg)	2,4	2,6	2,8	3
10	3/8''	0,5	0,48	0,46	0,44
12.5	1/2'	0,59	0,57	0,55	0,53
20	3/4''	0,66	0,64	0,62	0,60
25	1''	0,71	0,69	0,67	0,65
40	1 1/2''	0,77	0,73	0,71	0,69
50	2''	0,78	0,76	0,74	0,72
75	3''	0,81	0,8	0,78	0,76

Nota: Adaptado de “211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2002)”, por ACI Committee 211, 2002.

Tabla 4.3. *Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos del agregado*

Revenimiento (cm)	Agua en kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales en mm						
	10	12.5	20	25	40	50	75
Concreto sin aire ocluido							
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	175	175	170	160
15 a 18	240	230	210	185	185	180	170
	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3
Concreto con aire ocluido							
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135
8 a 10	200	190	180	175	160	155	150
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160
Promedio recomendado de contenido total de aire (%)							
Exposición							
Ligera	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5
Moderada	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5
Severa	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5

Nota: Adaptado de “211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2002)”, por ACI Committee 211, 2002.

A partir de ello, se definió la mezcla para concreto convencional presentada en la Tabla 4.4, la cual muestra a su vez los pesos reales durante la dosificación obtenidos a partir de los porcentajes de humedad y absorción. Cabe resaltar que se decidió añadir un aditivo plastificante con una dosificación igual al 1% del peso del cemento.

Tabla 4.4. *Dosificación de mezcla para concreto convencional con aditivo*

Material	Peso (kg)	Volumen (m3)	Peso real (kg)
Agua	210	0,210	213
Cemento	383	0,122	383
Aire	-	0,020	-
Piedra	1082	0,386	1085
Arena	697	0,262	700
Aditivo (1%)	4	0,003	4

Para la elaboración de la dosificación con ACR, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Se optó por un 50% de reemplazo de grava natural. Este valor coincide con las investigaciones de Deng et al. (2016), Harish et al. (2020), Saldaña y Caballero (2014) y Pani (2020).
- Se mantuvo la relación agua/cemento.
- Se mantuvo la cantidad de aditivo en 1% del peso del cemento. Se optó por este valor en base a las investigaciones de Wagih et al. (2013) y Pavón et al. (2011).

Con dichas consideraciones, se definió la mezcla para concreto con ACR presentada en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. *Dosificación de mezcla para concreto con ACR*

Material	Peso (kg)	Volumen (m3)	Peso real (kg)
Agua	210	0,210	231
Cemento	383	0,122	383
Aire	-	0,020	-
Piedra	541	0,193	542
ACR (50%)	541	0,233	544
Arena	591	0,222	594
Aditivo (1%)	4	0,003	4

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para la presente investigación se hizo uso del software SimaPro en su versión 9.1.1.1, el cual fue desarrollado por la empresa holandesa *Pré Consultants* y está enfocado en el ACV a través del modelamiento de procesos unitarios. El software permite modelar y analizar fácilmente ciclos de vida complejos de forma sistemática y transparente, medir el impacto medioambiental de productos y servicios en todas las etapas del ciclo de vida e identificar los puntos críticos en cada eslabón de su cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, distribución, uso y eliminación (SimaPro, s.f.).

Dicho software incluye un gran número de bases de datos como la base *EcoInvent 3*, la cual sirvió como fuente de información principal para la presente investigación. A su vez, se hizo uso del set de información de carácter *allocation*, debido a que se evalúan los procesos para productos aislados (Cáceres, 2016). Además, se definió el tipo de proceso *Unit*, ya que se optó por crear procesos unitarios.

La creación de procesos unitarios se realizó en cadena, lo que significa que el input de un proceso unitario es otro proceso unitario previamente definido. Ello siguió el proceso secuencial para obtener el material concreto. Para el análisis de los impactos ambientales, se definió una metodología adecuada acorde a los parámetros ambientales que se decidieron evaluar en la presente investigación y, a su vez, se hizo uso de la herramienta “Comparar” proporcionada por el software, la cual provee gráficos y tablas que facilitan la comparación.

5.1. Definición de objetivo y alcance

Acorde al objetivo planteado en la presente investigación, lo primero que se definió fue el nivel de detalle y los límites del sistema. Si bien el objetivo se centra en la comparación de ACR con grava, el análisis de ciclo de vida abarcará hasta la etapa de producción de las mezclas de concreto respectivamente. En base a ello, se consideró un análisis de la cuna a la puerta o “*cradle to gate*” por su denominación en inglés. Ello significa que se abarca las etapas extracción de materias primas, transporte y producción del material concreto para ser

suministrado en obra. Las fases proceso de construcción y uso de la edificación no forman parte del sistema, al asumirse que no existen diferencias significativas entre los dos tipos de concreto para dichas fases (Knoeri et al., 2013; World Business Council for Sustainable Development, 2009). En la Figura 5.1, se muestra un esquema del proceso de generación del concreto a partir del cual se ejecutará el análisis. Cabe mencionar que para el análisis se definió la unidad funcional como 1 m³ de concreto en estado fresco

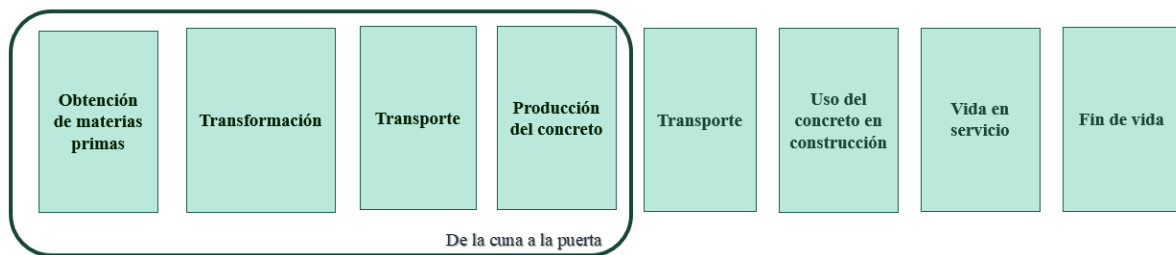


Figura 5.1. Ciclo de vida del concreto.

Como se puede apreciar, para el concreto tradicional, el límite inicial es el proceso de extracción del agregado grueso en la cantera; mientras que, para el concreto reciclado, el límite inicial del ACR es el proceso de la demolición selectiva de una obra previa. Cabe resaltar que el porcentaje de agregado grueso que no será sustituido por ACR tendrá el mismo origen respecto al del concreto tradicional.

Los demás componentes del concreto (arena, agua, cemento y aditivos) serán de origen común para ambos casos, así como el proceso de producción del concreto fresco en una planta dosificadora (límite final del análisis). Para esto, se tomará en cuenta la información brindada por la obra en estudio. Dadas las aclaraciones pertinentes, se presentan los sistemas de producto en la Figura 5.2 para el concreto tradicional, y en la Figura 5.3 para el concreto reciclado. Ambos sistemas hacen énfasis en el agregado grueso como uno de los componentes del concreto. Además, se presentan los límites de cada sistema representados por el cuadro en color plomo que encierra los procesos a considerar para el análisis en la presente investigación.

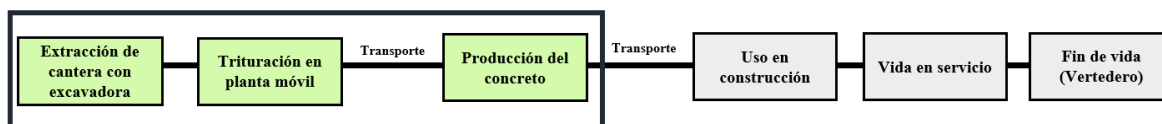


Figura 5.2. Sistema del concreto con agregado natural.

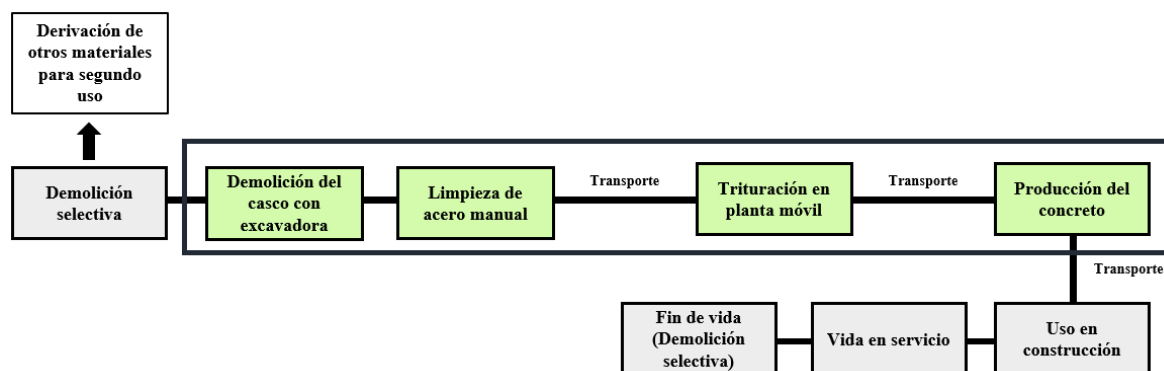


Figura 5.3. Sistema del concreto con agregado reciclado.

Como se puede observar, existen diferencias puntuales entre ambos sistemas. Una de ellas es el proceso de obtención de las materias primas. Algunas consideraciones y asunciones que se tuvo en la presente investigación, se detallan a continuación.

1. Se consideraron plantas móviles de trituración para la obtención de agregado natural y reciclado. Ambas contienen las principales maquinarias necesarias para la trituración del material hasta obtener la granulometría deseada. Además, se asume que los agregados naturales son triturados cerca de la misma cantera donde se extrajeron. Mientras, los ACR están propuestos para ser triturados en la misma obra, por lo que el material concreto demolido debe ser transportado hasta una zona de acopio designada para la producción de ACR.
2. Para la demolición selectiva, propuesta en el caso de concreto reciclado, solo se consideraron dos etapas, la demolición final del casco de concreto armado y la posterior limpieza de acero del concreto.

3. Hay diferencia entre las dosificaciones empleadas en cada caso. Las proporciones de cada uno de los componentes de las mezclas se detallaron líneas arriba.
4. Finalmente, se presentó un sistema concreto reciclado acorde al modelo propuesto por la EC, ya que el proceso final consiste nuevamente en la demolición selectiva de la obra, pasado su tiempo de vida. Por el contrario, el modelo lineal del concreto convencional posee como último proceso a la disposición final de los residuos de demolición en un vertedero.

Ahora bien, al definir los límites del sistema de ACR presentado en la Figura 5.3, pudo obviarse la etapa de demolición, ya que se podría considerar que dicha fase tiene como objetivo el fin de vida de la estructura anterior y no la generación de nuevos agregados. Sin embargo, al ser el presente estudio un análisis de la circularidad, la demolición debería estar incluida al inicio o al final del sistema. En este caso, según la Figura 2.3, el sistema circular inicia con la demolición como parte de la fase de gestión RCD y concluye en la fase de planificación y diseño, con la consideración que posteriormente sigue una fase de ejecución y uso, los cuales no son abarcados por el presente análisis según lo mencionado líneas arriba.

5.2. Inventario del ciclo de vida

Para plantear el ICV de ambos sistemas, se realizó una recopilación de información a través de las siguientes fuentes.

- Se mantuvo una comunicación constante con tres representantes de la obra en estudio, los cuales brindaron información de relevancia para enriquecer el inventario.
- Se contactó con representantes de la empresa proveedora de las maquinarias necesarias para los procesos de trituración.
- Se hizo uso de la base *EcoInvent* para situaciones en las que faltaban datos y, por ende, se necesitaba recurrir a información preestablecida.

- Se hizo una revisión bibliográfica para complementar datos y procesos definidos en el ACV.

El punto de partida para generar el inventario fue identificar las entradas y salidas necesarias en el sistema. Estas se pueden observar en la Figura 5.4 y Figura 5.5.

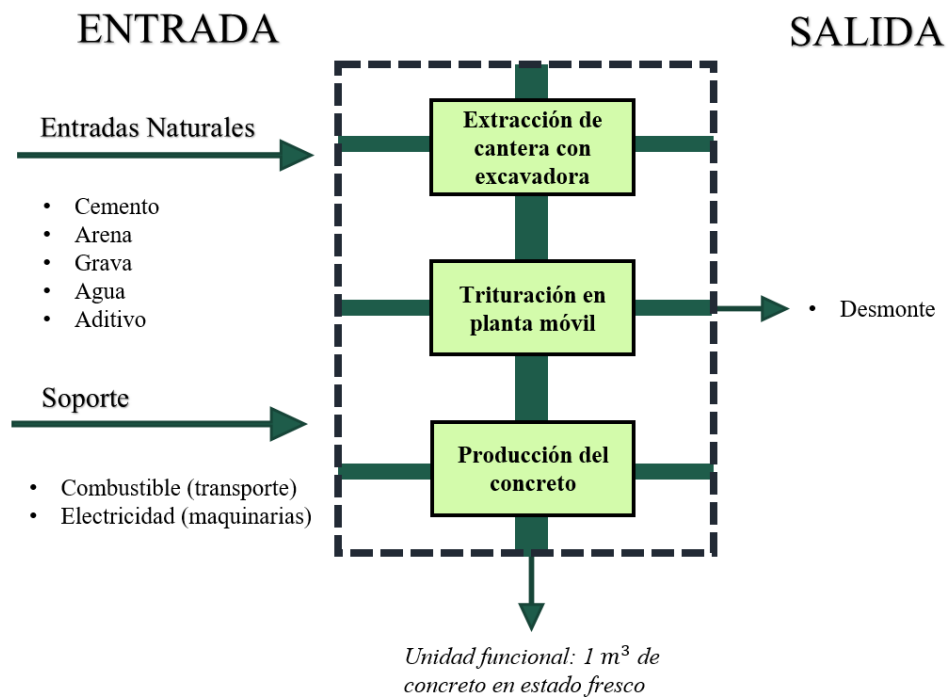


Figura 5.4. Entradas y salidas para el sistema de concreto con agregado natural.

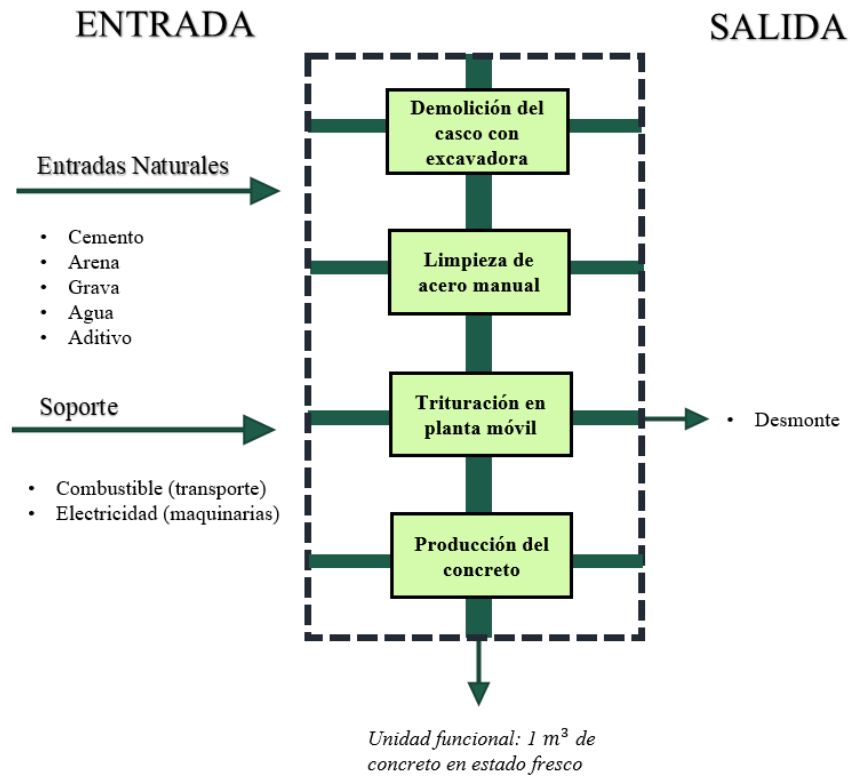


Figura 5.5. Entradas y salidas para el sistema de concreto con agregado reciclado.

Respecto a las entradas, se detallan a continuación los datos de las maquinarias utilizadas en cada proceso, sean del tipo transporte o aquellas que generaron transformaciones a los recursos de entrada. Cabe resaltar que, para las maquinarias creadas, se consideró dentro de sus composiciones únicamente al hierro fundido; es decir, otro tipo de materiales, como caucho o cuero, no fueron modelados (Tocto, 2020).

Excavadoras

Para la modelación de las excavadoras dedicadas al proceso de obtención de los agregados, se optó por definir dos modelos distintos. Ello se debe a que las fuentes de los recursos fueron distintas.

En lo que respecta a la demolición selectiva para la obtención de los ACR, se escogió la excavadora hidráulica 320. Mientras, la excavadora hidráulica modelo 330DL fue seleccionada para simular la extracción de los recursos naturales en canteras. Ambas maquinarias pertenecieron a la marca Caterpillar y emplearon al diésel como fuente de energía. Además,

los datos respecto al tiempo de vida útil para las excavadoras fueron encontrados en el documento de Ramos (2011).

La razón por la cual se decidió modelar dos excavadoras diferentes recae en el distinto campo de acción en el que trabajaban. En la demolición selectiva, se escogió el modelo de maquinaria recomendado por Aguilar y Loo (2017), debido a su mayor estabilidad en trabajos de demolición. Asimismo, teniendo en cuenta dicha investigación, se asumió que se demolió en el casco de una vivienda con un rendimiento estimado de 15 m³/hora. Esta información, así como las demás propiedades de la excavadora 320 se aprecian en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. *Características de la excavadora para demolición selectiva*

Característica	Información
Tipo	Excavadora hidráulica sobre orugas
Modelo	320
Fuente de energía	Diésel
Capacidad cuchara (m ³)	1,19
Peso (ton)	22
Dimensiones (m)	2,98x9,53x2,96
Potencia (HP)	157
Rendimiento (m ³ /h)*	15
Horas de vida útil*	10 000

Nota: Basado en "320 Excavadora hidráulica", por Caterpillar, s.f. Recuperado de https://static.unimaq.com.pe/fcsaprdunimaq01/2019/03/320_SPA1.pdf. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

Por su parte, la maquinaria asignada para la extracción en cantera poseyó un tamaño de cucharón similar, pero su potencia fue de mayor magnitud, ya que este trabajo usualmente es continuo y requiere de un mayor rendimiento. Para el cálculo de este parámetro, se tuvo en cuenta la siguiente expresión brindada por Fernández et al. (2014) para equipos pesados:

$$R = \frac{V_C * 3600 * F_e * F_e' * C_t}{T_C} \quad (1)$$

Donde:

V_C es la capacidad del cucharón, igual a 1,19 m³.

F_e es la eficacia de la máquina, cuyo valor estimado fue del 70%.

Fe es la eficacia del cucharón, asumida como 0,8 para suelo duro y 1 para suelo flojo.

Ct es el coeficiente de transformación, con un valor igual a la unidad.

Tc es el tiempo de duración del ciclo. Para roca, su valor fue 30; para arena, 20.

Finalmente, se estimó una productividad de extracción de 79,97 m³/hora para roca y 149,94 m³/hora para arena. Al igual que la maquinaria anterior, las características de la excavadora 330D2 se observan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. *Características de la excavadora para extracción en cantera*

Característica	Información
Tipo	Excavadora hidráulica sobre orugas
Modelo	330DL
Fuente de energía	Diésel
Capacidad cuchara (m ³)	1,19
Peso (ton)	36,15
Dimensiones (m)	3,39x11,20x3,63
Potencia (HP)	268
Rendimiento (m ³ /h)*	79,97 / 149,94
Horas de vida útil*	10 000

Nota: Basado en "Excavadoras medianas 330", por Caterpillar, s.f. Recuperado de https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/15969759.html. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

Camiones de transporte

Se modeló el empleo de camiones para transportar los agregados a la obra seleccionada como caso de estudio. Debido a que en la base de datos *EcoInvent* existía información respecto a este tipo de maquinarias, se decidió utilizarla, con la correcta elección del peso de carguío. Para la presente tesis, se optó por camiones que fueran capaces de transportar entre 16 a 32 toneladas métricas.

Plantas de trituración

Se emplearon dos plantas móviles de trituración, una para los agregados naturales y otra para los reciclados. La razón de elegir una planta móvil en lugar de una fija recayó en la necesidad de una menor área para su instalación (Estanqueiro, 2012), aspecto importante para la trituración de ACR en la misma obra. Se buscó escoger una planta móvil que combinara

trituradora primaria y secundaria, ya que ambas eran necesarias para obtener los agregados del concreto. Además, era necesario la presencia de una zaranda o tamiz para que las dimensiones de los agregados cumplieran con la granulometría solicitada por el caso de estudio. La diferencia entre las dos plantas recayó en la disminución de la potencia y rendimiento para aquella empleada en la obtención de ACR, respecto a la de grava natural. Ello por las condiciones de producción de agregados naturales y por la menor cantidad de ACR necesitado. La información técnica de las plantas fue brindada por la empresa Athegsur Perú. Además, debido a la ubicación de la cantera, se consideró que únicamente los agregados gruesos serían previamente triturados, ya que la arena fue directamente extraída de la ladera del río. La Tabla 5.3 y Tabla 5.4 muestran un resumen de dichas plantas móviles, con un valor de 20 000 horas de vida útil (Ramos, 2011).

Tabla 5.3. *Características de la planta móvil de trituración para grava natural*

Característica	Información
Tipo	Trituradora de mandíbula y de cono combinado
Modelo	APCPE1630-PGY900CCS
Fuente de energía	Eléctrica
Componentes principales	Alimentador vibratorio
	Trituradora de mandíbula
	Trituradora de cono
	Cinta transportadora principal
	Zaranda vibratoria
	Cinta transportadora de descarga
N° de ejes	3
Peso (ton)	45
Dimensiones (m)	2,95x13,4x4,75
Potencia (HP)	380
Rendimiento (ton/h)	45
Horas de vida útil*	20 000

Nota: Basado en información proporcionada por Athegsur Perú. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

Tabla 5.4. *Características de la planta móvil de trituración para ACR*

Característica	Información
Tipo	Trituradora de mandíbula y de cono combinado
Modelo	APCPE1224-CS525
Fuente de energía	Eléctrica
Componentes principales	Alimentador vibratorio Trituradora de mandíbula Trituradora de cono Cinta transportadora principal Zaranda vibratoria Cinta transportadora de descarga
N° de ejes	3
Peso (ton)	18
Dimensiones (m)	2,6x11,8x4,5
Potencia (HP)	96
Rendimiento (ton/h)	30
Horas de vida útil*	20 000

Nota: Basado en información proporcionada por Athegsur Perú. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

El funcionamiento de las plantas móviles elegidas se describe a continuación. En primer lugar, el material ingresa por la tolva de alimentación para seguidamente caer en el alimentador vibratorio. Posteriormente, el material es trasladado a la trituradora de mandíbula para su primera trituración y, luego, es llevado a la zaranda vibratoria, la cual posee 3 capas de tamices para conseguir agregados entre $\frac{3}{4}$ " y 4.75mm (correspondiente al Huso 67). Si el material requiere una mayor trituración para alcanzar una dimensión más pequeña, se transporta hacia la trituradora de cono y, posterior a ello, regresa a la zaranda vibratoria. Este último proceso se repite hasta obtener las granulometrías deseadas y se concluye con el transporte del agregado, ya triturado, desde la zaranda hacia las zonas de acopio. Todos los transportes entre maquinarias y las descargas finales se realizan a través de cintas transportadoras.

Minicargador

El emplear un minicargador en un área de trabajo permite trasladar cierta cantidad de materiales en distancias cortas y es por esta razón que se incluyó en el ICV. La información relacionada

a sus características fue brindada por un representante del caso de estudio, ya que dentro del área de la planta dosificadora se utilizan minicargadores.

En esta oportunidad, se escogió el modelo 260 ofrecido por la empresa JCB, cuyo rendimiento aproximado fue de 24 m³/hora. Este valor se estimó de tal manera que no genere retrasos tanto para la planta dosificadora, como para la planta móvil de trituración. Si bien el rendimiento pudo ser mayor, el asumir una cantidad inferior permite mantenerse del lado conservador. Asimismo, para la estimación de horas de vida útil, en el documento de Ramos (2011), se clasificó al minicargador como una maquinaria de obra pesada. A continuación, en la Tabla 5.5, se especifican sus principales propiedades.

Tabla 5.5. *Características del minicargador*

Característica	Información
Tipo	Minicargador
Modelo	260
Fuente de energía	Diésel
Capacidad cuchara (ton)	0,44
Peso (ton)	3,615
Altura de carga (m)	2,46
Potencia (HP)	84,5
Rendimiento (m ³ /h)	24
Horas de vida útil*	10 000

Nota: Basado en “Mini cargadores 260”, por JCB, s.f. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

Planta dosificadora

El caso de estudio seleccionado emplea una planta dosificadora remolcable-semi automática, la cual fue abastecida por la empresa Auto Hormigoneras del Perú S.A.C, debido a la gran cantidad de concreto necesitado por el megaproyecto. El funcionamiento de la planta consiste en dosificar los componentes, ya presentes en la obra, a través de un sistema de pesaje electrónico, para luego ser enviados directamente a un camión mixer. A su vez, para su buena articulación, se requiere una corriente de 20Kw. Entre sus principales componentes se encuentran una tolva báscula de 7m³ conectada a un sistema de pesaje y un sistema neumático que regula el cierre de su compuerta, una cinta transportadora de caucho para los agregados,

un transportador sin fin para el cemento y un sistema de dosificación de agua, compuesto por una bomba.

Si bien cada componente tiene su propio peso y, en algunos casos su propia potencia, se empleó el peso y potencia nominal de la planta en su totalidad para los cálculos respectivos del ACV. Estas características, así como otras más, se pueden observar en la Tabla 5.6. Del mismo modo respecto a las maquinarias previas, sus horas de vida útil fueron obtenidas por la estimación de Ramos (2011).

Tabla 5.6. *Características de la planta dosificadora*

Característica	Información
Modelo	PD/24
Fuente de energía	Eléctrica
Componentes principales	Tolva báscula Faja transportadora Transportador sin fin Chasis portante Línea neumática Dosificación de agua Sistema de control y distrib.
Peso (ton)	2,3
Dimensiones (m)	2,5x12x4,3
Potencia (kW)	20
Rendimiento (m ³ /h)	24
Horas de vida útil*	20 000

Nota: Basado en “Manual de mantenimiento”, por Auto Hormigoneras del Perú SAC., 2016. Las características acompañadas de un asterisco (*) no fueron extraídas de la mencionada empresa.

Para un mayor entendimiento sobre el funcionamiento y el ensamblaje de la planta dosificadora, se muestra la Figura 5.6. Se puede apreciar que la planta recibe por un lado al cemento y por el otro a los agregados, con lo cual se genera que ambos caigan a través del *shute* hacia el camión mixer.

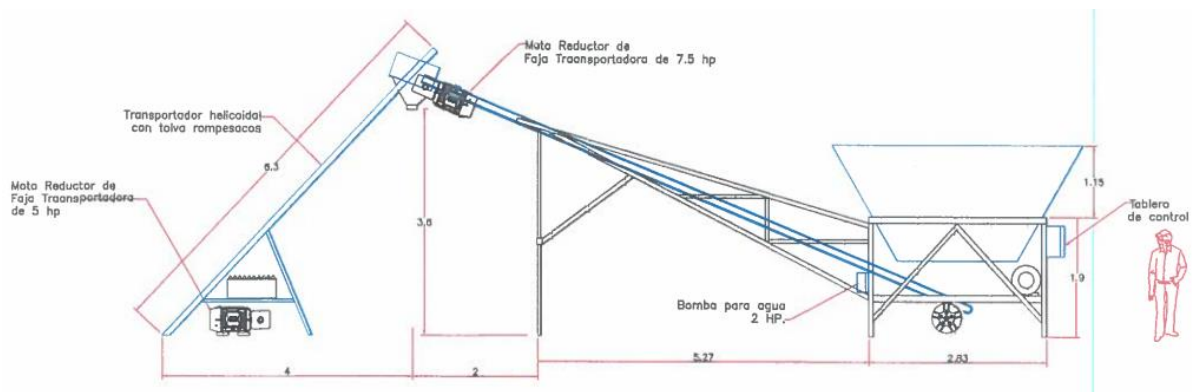


Figura 5.6. Esquema de planta dosificadora. Tomado de “Planta dosificadora de 24m3/hora”, por Auto Hormigoneras del Perú SAC., 2016.

Una vez obtenidos los datos necesarios de las distintas maquinarias, se procedió a calcular el aporte de cada una de ellas en los procesos unitarios, los cuales se detallan más adelante. Para el caso de las maquinarias, su impacto ambiental resulta ser la contribución de su energía total y su peso en el respectivo proceso unitario en el que influye. Dicha energía, denominada incorporada, es la suma de la energía consumida durante la producción de la maquinaria y la energía gastada en su funcionamiento para la obtención de recursos necesarios (Praseeda et al., 2017). Asimismo, la energía total puede ser traducida como diésel quemado o electricidad, dependiendo del tipo de funcionamiento de cada maquinaria

Además, como ya se mencionó líneas arriba, todas las maquinarias creadas han sido modeladas como si su peso solo estuviera influenciado por el hierro fundido. Para obtener el valor energético de este material, se empleó el proceso *Cast iron {GLO} production* de la base de datos *EcoInvent3-allocation at unit*, así como el método *Cumulative Energy Demand V1.11*. Tras el análisis, se consiguió un valor de 18.9 MJ/kg.

Respecto a las fórmulas empleadas, se detallan a continuación cada una de ellas, con el fin de calcular los aportes de las maquinarias (Tocto, 2020).

$$E_f \text{ (MJ)} = \text{Potencia del motor} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{h}} \right) \times t_f \quad (2)$$

$$E_c \text{ (MJ)} = 18.9 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \times \text{peso de maquinaria (kg)} \times \frac{t_f}{t_s} \quad (3)$$

$$E_{total}(MJ) = E_f + E_c \quad (4)$$

$$Pieza = 1/(t_s * producción (ton/h)) \quad (5)$$

Donde:

E_f es la energía de funcionamiento o producción

E_c es la energía consumida o gastada

t_f es el tiempo de funcionamiento de la maquinaria en el proceso unitario (horas)

t_s es el tiempo de servicio total de la maquinaria (horas)

Además de las maquinarias, los agregados también fueron considerados como entradas en el ICV. Para el caso de los agregados de origen natural, se dispuso de la información brindada por el caso de estudio, el cual utilizó agregados gruesos y finos extraídos de la cantera Agregados Carapongo. Esta cantera se ubica en el margen izquierdo del río Chillón, en el distrito de Carabayllo, a 9km aproximadamente de la obra. Para el proyecto del caso de estudio, se solicitó a dicha cantera agregado grueso que cumpla con el Huso 67 y arena gruesa como parte del agregado fino. Algunas características obtenidas mediante los ensayos de ambos agregados se detallan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. *Características de los agregados grueso y fino de cantera Carapongo*

Propiedad	Agregado grueso	Agregado fino
Tamaño máximo	1"	-
Tamaño máximo nominal	3/4"	-
Módulo de fineza	6,51	3,09
% menor a malla N°200	-	7,95

Procesos Unitarios

Con los datos de entrada recolectados en los párrafos anteriores, se procedió a establecer los procesos unitarios de la presente tesis. Cada uno de estos procesos, detallados a continuación, describen cuáles fueron los datos de entrada, su interacción entre ellos y, los datos de salida.

Asimismo, se pueden distinguir tablas resumen de cada proceso unitario. En materiales/combustibles, se aprecian los datos de entrada; mientras que, en producto y

coproducto, el producto final del proceso unitario. Cabe resaltar que la columna Tipo indica si el dato de entrada fue creado, adaptado de la base de datos *EcoInvent* o simplemente se usó la información brindada por defecto de dicha base.

Obtención de materias primas

Este proceso unitario involucró las entradas y salidas relacionadas con la adquisición de los materiales que posteriormente se convirtieron en agregados. Cabe resaltar que no se están considerando al cemento, agua y aditivos, ya que para ellos se utilizó la base de datos *EcoInvent*.

En lo que respecta al concreto convencional, los datos sobre la grava (originaria de rocas) y arena provienen de la misma base *EcoInvent*, los cuales fueron elegidos de tal manera que involucraran únicamente los procesos propios de la cantera, sin incluir la extracción con maquinaria. Ello, debido a que la introducción de una excavadora al proceso se realizó de forma manual en el software. Otra entrada considerada fue el diésel (obtenido mediante las ecuaciones 2, 3 y 4), el cual se separó de la maquinaria para que ésta solo incluyese como aporte a su propio peso. Asimismo, en el proceso de extracción de la arena, se consideró el transporte a obra porque este insumo no requirió una posterior trituración y se asumió un desperdicio del 5% para dicha actividad. El producto final fue 1 tonelada de grava o arena extraída de cantera, como se observa en la Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

Tabla 5.8. *Extracción de grava en cantera*

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Grava extraída de cantera	1	ton	
Materiales/combustibles			
Gravel, round {RoW} gravel and sand quarry operation APOS, U	1000	kg	Por defecto
Excavadora{RoW} proceso demolición APOS, U	4.060E-07	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	3.198	MJ	Por defecto

Tabla 5.9. *Extracción de arena en cantera*

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Arena extraída de cantera	1	ton	
Materiales/combustibles			
Sand {RoW} extracción APOS, U	1050	kg	Adaptado
Excavadora{RoW} proceso extracción APOS, U	3.970E-07	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	3.127	MJ	Adaptado
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U	9.45	tkm	Por defecto

Para el concreto reciclado, el origen del sustituto parcial del agregado grueso no radicó en una explotación de materias naturales. Por el contrario, el agregado grueso se obtuvo de la demolición selectiva de una obra cuyo tiempo de vida había llegado a su fin, es decir, 50 años. Por ende, la carga ambiental de esta entrada se simuló con un valor igual cero.

Para efectos de la presente tesis y, teniendo en cuenta la administración de materiales, la cual se explica más adelante, se realizaron ciertas simplificaciones para las características de la vivienda a demoler. Entre ellas se puede mencionar que se necesitó un área total aproximada de 1980 m² para obtener la cantidad requerida de ACR, de acuerdo con un ratio que vincula la cantidad de concreto existente por m² (Zapata, 2020). Por ende, en la presente investigación se simuló la demolición de viviendas de 2 niveles de 165m² cada uno, un valor de área situado dentro del rango usual visto en *Google Earth*. El distrito en el cual se ubican dichos domicilios es variable, siempre y cuando se encuentre dentro de la distancia a analizar, la cual se explica a detalle más adelante.

El proceso de demolición selectiva considerado fue el derribo del casco de concreto armado mediante una excavadora. Para ello, previamente se separaron las instalaciones, mueblería, vidrios y muros de albañilería, es decir, estos componentes no fueron tomados en cuenta en el presente análisis. Del mismo modo, la actividad de corte de estructuras mediante herramientas

manuales no fue tomada en consideración. Al igual que la extracción de cantera, el diésel fue un dato de entrada separado de la maquinaria.

Cabe resaltar que, para poder obtener únicamente concreto demolido, se tiene que realizar una limpieza del acero estructural embebido en él. Por consiguiente, se asumió que la excavadora empleada en la demolición fue la encargada de realizar una trituración preliminar del concreto armado mediante su cucharón, para que posterior a ello, los trabajadores pudieran retirar el acero. Debido a que este último procedimiento fue manual, su impacto ambiental se estimó nulo y, por ende, no fue necesario considerarlo en el modelamiento del SimaPro.

Al finalizar este proceso, el concreto demolido fue introducido a los camiones de carga, a través de la misma excavadora, para que fuese trasladado al caso de estudio, teniendo en cuenta un desperdicio del 5%. Si bien la actividad de llenado de volquete genera un rendimiento distinto para la maquinaria, se decidió realizar el ACV con el rendimiento de la propia actividad de demolición, pues su valor numérico es menor y, por ende, más conservador.

El producto final fue 1 tonelada de escombros de demolición seleccionados para ser convertidos en ACR. La Tabla 5.10 muestra un resumen de lo planteado para este tipo de concreto, con la asunción de una distancia inicial de transporte de 2km desde la obra demolida hasta el caso de estudio. La variación de dicho recorrido se explica en párrafos posteriores.

Tabla 5.10. *Demolición del casco*

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Escombros de demolición seleccionados para ACR	1	ton	
Materiales/combustibles			
Estructura de concreto por demoler fin de vida útil	1.05	ton	Creado
Excavadora proceso demolición APOS, U	2.778E-06	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	12.860	MJ	Adaptado
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U	2.100	tkm	Por defecto

Transformación

Se empleó una planta móvil de trituración para los agregados gruesos naturales. Se asumió que dichos agregados provinieron de un mineral no metálico de mayores dimensiones, el cual necesitó de un proceso mecánico para disminuir el tamaño de sus partículas. De acuerdo con información brindada por Athesur Perú, dicho tipo de maquinaria posee un residuo de 15% aproximadamente para la obtención de la granulometría deseada del agregado. Asimismo, se asumió que esta planta trituradora se ubicaba en la misma cantera, en una zona aledaña a los puntos de acopio y, posterior a la trituración, se simuló que el material fue introducido a los volquetes a través de una excavadora. Para esta actividad de transporte también se consideró un porcentaje de desperdicio, cuyo valor fue de 5%. Con ambos sobrantes de material, se calculó que para obtener 1 ton de grava lista para ser empleada en obra se necesitaría 1.238 ton de grava extraídas de la cantera.

En este proceso unitario, la grava extraída en cantera y la planta móvil, previamente modelada, fueron los datos de entrada, así como la electricidad, obtenida mediante las ecuaciones 2, 3 y 4. También fueron datos de entrada la excavadora, para el llenado de los camiones de carga, y el transporte del material. Además, el producto de salida fue el desmonte propio del desperdicio generado por la planta trituradora. El producto final fue 1 tonelada de grava obtenida por trituración y posterior transporte, como se observa en la Tabla 5.11. Como ya se mencionó líneas arriba, la arena no requirió ningún tipo de proceso mecánico y por ende no fue incluida en este proceso unitario.

Tabla 5.11. Trituración en cantera de grava

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Grava obtenida por trituración y posterior transporte	1	ton	
Materiales/combustibles			
Excavadora{RoW} proceso extracción APOS, U	1.353E-07	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	1.066	MJ	Adaptado
Planta móvil Trituración primaria y secundaria, cinta transportadora, zarandeo	4.444E-07	pieza	Creado
Grava extraída de cantera	1.238	ton	Creado
Electricity, low voltage {PE} electricity voltage transformation from medium to low voltage APOS, U	9.445	MJ	Por defecto
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U	9.450	tkm	Por defecto
Salidas			
Desmante	0.176	ton	Creado

Por otro lado, los escombros de demolición se trituraron también en una planta móvil situada en obra. El inicio de este proceso se dio con el traslado del material en un minicargador. Como la misma obra utiliza una maquinaria de esta índole para el transporte de los agregados naturales dentro de su planta, se decidió seguir empleándola para el traslado del concreto demolido apilado hacia la tolva ingresante de la planta trituradora. Ello debido a que no se requería la participación exclusiva y continua de una nueva maquinaria por la poca cantidad de ACR requerido.

Por consiguiente, los datos de entrada fueron el minicargador, los escombros de demolición, la planta móvil de trituración y su respectiva electricidad. Al igual que el proceso de la grava natural, la planta de trituración poseyó un 15% de desperdicio. Por lo tanto, se necesitó 1,176 ton de escombros de demolición seleccionados para ACR, con el fin de obtener 1 tonelada del producto final y, se obtuvo 0.176 ton de desmante. El producto final fue 1 tonelada ACR obtenido por trituración, transporte en cinta y zarandeo. La Tabla 5.12 muestra lo planteado.

Tabla 5.12. Trituración en obra de ACR

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
ACR obtenido por trituración y posterior transporte	1	ton	
Materiales/combustibles			
Minicargador procesos de transportes internos APOS, U	2.480E-06	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	5.795	MJ	Adaptado
Planta móvil para ACR Trituración primaria y secundaria, cinta transportadora, zarandeo	1.667E-06	pieza	Creado
Escombros de demolición seleccionados para ACR	1.176	ton	Creado
Electricity, low voltage {PE} electricity voltage transformation from medium to low voltage APOS, U	9.156	MJ	Por defecto
Salidas			
Desmante	0.176		Creado

Producción del concreto

Antes de iniciar con la producción del concreto, los agregados fueron trasladados, mediante el minicargador, desde sus respectivos puntos de acopio hacia la tolva báscula. Luego, para el mezclado de los dos tipos de concreto, se asumió la dosificación de la Tabla 4.4 y Tabla 4.5.

En los datos de entrada, además de los agregados que provenían de una secuencia de procesos unitarios previos, se incluyó al cemento, agua y aditivo que, como ya se mencionó, fueron datos por defecto del *EcoInvent*. Asimismo, se introdujo como dato de entrada a la planta dosificadora en el sitio, la cual fue creada en el software SimaPro, y a la electricidad como combustible. El producto final fue 1 m³ de concreto, sea del tipo convencional o con ACR como sustituto parcial del agregado grueso. La Tabla 5.13 y Tabla 5.14 muestran el caso de dosificación con el empleo de aditivos.

Tabla 5.13. *Dosificación de concreto convencional*

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Concreto convencional premezclado en planta dosificadora	1	m ³	
Materiales/combustibles			
Minicargador procesos de transportes internos APOS, U	2.480E-06	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	5.795	MJ	Por defecto
Grava obtenida por trituración y posterior transporte	1082	kg	Creado
Arena extraída de cantera	697	kg	Creado
Cement, Portland {PE} market for cement, Portland APOS, U	383	kg	Por defecto
Chemical, organic {GLO} market for APOS, U	4.00	kg	Por defecto
Tap water {PE} market for tap water APOS, U	210	lt	Por defecto
Planta dosificadora en el sitio	1.240E-06	pieza	Creado
Electricity, low voltage {PE} electricity voltage transformation fro	1.840	MJ	Por defecto

Tabla 5.14. *Dosificación de concreto con ACR*

Información	Cantidad	Unidad	Tipo
Producto y coproducto			
Concreto con ACR premezclado en planta dosificadora	1	m ³	
Materiales/combustibles			
Minicargador procesos de transportes internos APOS, U	2.480E-06	pieza	Creado
Diesel, burned in building machine {GLO} processing adaptado APOS, U	5.795	MJ	Por defecto
Grava obtenida por trituración y posterior transporte	542	kg	Creado
ACR obtenido por trituración y posterior transporte	544	kg	Creado
Arena extraída de cantera	594	kg	Creado
Cement, Portland {PE} market for cement, Portland APOS, U	383	kg	Por defecto
Chemical, organic {GLO} market for APOS, U	4	kg	Por defecto
Tap water {PE} market for tap water APOS, U	213	kg	Por defecto
Planta dosificadora en el sitio	1.24E-06	pieza	Creado
Electricity, low voltage {PE} electricity voltage transformation from medium to low voltage APOS, U	1.840	MJ	Por defecto

Transporte

El tipo de transporte a detallarse a continuación abarca únicamente a los transportes externos, es decir, a aquellos que implican el traslado de materiales entre dos ubicaciones distantes. Los transportes internos, como el empleo de minicargadores y excavadoras, ya se detallaron en los párrafos anteriores.

Como se ha podido observar, el transporte de los materiales al proyecto ocurrió en distintos instantes para el agregado natural y para el ACR. En cuanto a los agregados reciclados, estos fueron trasladados en su estado primario, es decir, concreto simple demolido, desde la

demolición hasta la planta dosificadora del caso de estudio. De acuerdo con el metrado de concreto proyectado y, teniendo en cuenta las características de la vivienda demolida (descritas líneas arriba), se consideró la participación de 6 demoliciones.

Debido a que la ejecución de una demolición a una distancia próxima al caso de estudio es una variable aleatoria, se decidió realizar diversos ACV, modificando dichas distancias en función al recorrido total de la cantera al caso de estudio. En la Tabla 5.15, se contemplan las diferentes distancias empleadas en el ACV del agregado reciclado, con valores redondeados al entero próximo. Cabe resaltar que el transporte se simuló mediante un camión de carga de 16 a 32 toneladas.

Tabla 5.15. *Distancias simuladas desde la demolición a la obra*

Porcentaje (%)	Operación	Distancia (km)
25	0,25*9	2
50	0,50*9	5
75	0,75*9	7
100	1,00*9	9

Por su parte, los agregados naturales fueron transportados a la obra ya listos para ser apilados y empleados. En este sentido, se estimó un recorrido de 9km aproximadamente desde la ubicación de la cantera Agregados Carapongo al proyecto y, al igual que el caso anterior, se simuló el transporte a través de un camión con capacidad de carga de 16 a 32 toneladas.

5.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para obtener los resultados de la EICV, se emplearon dos distintos métodos. En primer lugar, se utilizó el método *ReCipe 2016 Mindpoint*, versión 1.04 jerárquica, para analizar tres categorías de impacto relacionadas con los pilares de la sostenibilidad, planteados al inicio de la presente tesis. Se emplearon las categorías escasez de recursos minerales, vinculado a la extracción de materias primas; escasez de recursos fósiles, relacionado con el consumo de combustibles y; toxicidad humana carcinógena y no carcinógena, asociado con la salud humana.

La metodología Recipe se escogió principalmente por la división entre las categorías de impacto generadas por fósiles y las provocadas por la extracción de minerales. Asimismo, se eligió el tipo *midpoint* porque brinda un análisis confiable para un conjunto de categorías de impacto, pese a la dificultad de interpretación de sus resultados. Mientras que, para un método *endpoint*, se introduce mayor incertidumbre en los resultados y, por ende, no es la opción preferible (Dong & Ng, 2014). Además, se hizo la elección de la perspectiva jerárquica por ser la usualmente empleada (PRé Sustainability, 2020).

Luego, se empleó el método IPCC 2013 GWP 100a v.1.03 para evaluar el calentamiento global provocado por los procesos unitarios. El IPCC fue desarrollado por el Panel Internacional sobre Cambio Climático (PRé Sustainability, 2020) y, es la categoría usualmente empleada para la evaluación del calentamiento global, por ende, resulta ser el método más adecuado para dicho análisis. Cabe resaltar que el método IPCC 2013 posee dos marcos de tiempo de análisis, 20 y 100 años. Se eligió este último porque dicho periodo es mayor al tiempo estimado de duración de las edificaciones; es decir, 50 años.

A partir de ello, se evaluaron los impactos del ciclo de vida y se comparó la grava natural con el ACR, acorde al objetivo de la presente tesis. Se tuvo en cuenta, para el caso del ACR, la comparación con cuatro distancias recorridas diferentes por parte de los volquetes, como se mencionó en la Tabla 5.15. Los resultados entre estas comparaciones se observan en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Resultados al comparar ACR con grava natural

		Kilómetros (Km)			
		2	5	7	9
Extracción de minerales (kg Cu eq)	ACR	9.06E-06	1.13E-05	1.28E-05	1.43E-05
	Grava	9.49E-06	9.49E-06	9.49E-06	9.49E-06
	Variación %	-5%	19%	35%	51%
Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)	ACR	1.02E-03	1.24E-03	1.39E-03	1.53E-03
	Grava	1.11E-03	1.11E-03	1.11E-03	1.11E-03
	Variación %	-8%	12%	25%	38%
IPCC 2013 GWP 100a (kg CO ₂ eq)	ACR	3.13E-03	3.77E-03	4.20E-03	4.63E-03
	Grava	3.55E-03	3.55E-03	3.55E-03	3.55E-03
	Variación %	-12%	6%	18%	30%
Toxicidad humana carcinógena (kg 1,4-DCB)	ACR	2.39E-04	2.54E-04	2.64E-04	2.74E-04
	Grava	1.53E-04	1.53E-04	1.53E-04	1.53E-04
	Variación %	56%	66%	73%	79%
Toxicidad humana no carcinógena (kg 1,4-DCB)	ACR	8.74E-04	1.36E-03	1.69E-03	2.02E-03
	Grava	2.21E-03	2.21E-03	2.21E-03	2.21E-03
	Variación %	-60%	-38%	-24%	-9%

Como adicional, se realizó la comparación entre el concreto convencional y aquel que poseía un reemplazo del 50% de grava natural por ACR. Los resultados se aprecian en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Resultados al comparar concreto reciclado con aquel convencional

		Kilómetros (Km)			
		2	5	7	9
Extracción de minerales (kg Cu eq)	Concreto reciclado	1.79	1.79	1.79	1.79
	Concreto convencional	1.79	1.79	1.79	1.79
	Variación %	0%	0%	0%	0%
Escasez de recursos fósiles (kg oil eq)	Concreto reciclado	47.10	47.10	47.20	47.30
	Concreto convencional	47.10	47.10	47.10	47.10
	Variación %	0%	0%	0.21%	0.42%
IPCC 2013 GWP 100a (kg CO2 eq)	Concreto reciclado	361.00	361.00	361.00	362.00
	Concreto convencional	361.00	361.00	361.00	361.00
	Variación %	0%	0%	0%	0.28%
Toxicidad humana carcinógena (kg 1,4-DCB)	Concreto reciclado	4.67	4.68	4.69	4.69
	Concreto convencional	4.63	4.63	4.63	4.63
	Variación %	0.86%	1.08%	1.30%	1.20%
Toxicidad humana no carcinógena (kg 1,4-DCB)	Concreto reciclado	108.0	108.0	108.0	109.0
	Concreto convencional	109.0	109.0	109.0	109.0
	Variación %	-0.92%	-0.92%	-0.92%	-0.92%

5.4. Interpretación

5.4.1. Análisis de sensibilidad entre el ACR y la grava

Con los resultados obtenidos en la comparación entre el ACR y la grava, para las diferentes categorías de impacto, se realizó un análisis de sensibilidad. Dicho análisis consiste en técnicas estadísticas que permiten determinar cómo la modificación de un conjunto de variables inciertas influencia en el resultado y así, mejorar la predicción del modelo (Pichery, 2014). En la presente tesis, se empleó el análisis de sensibilidad para evaluar cómo el modificar la variable de distancia recorrida, en kms, impactaba en el modelamiento del ACR, y así, compararlo con la grava natural. Cabe resaltar que no se varió la distancia recorrida por la grava natural, debido a que, según lo explicado en párrafos anteriores, se extrae de una cantera permanente ubicada en Carapongo. Las Figura 5.7 y Figura 5.8 son una representación gráfica de lo explicado.

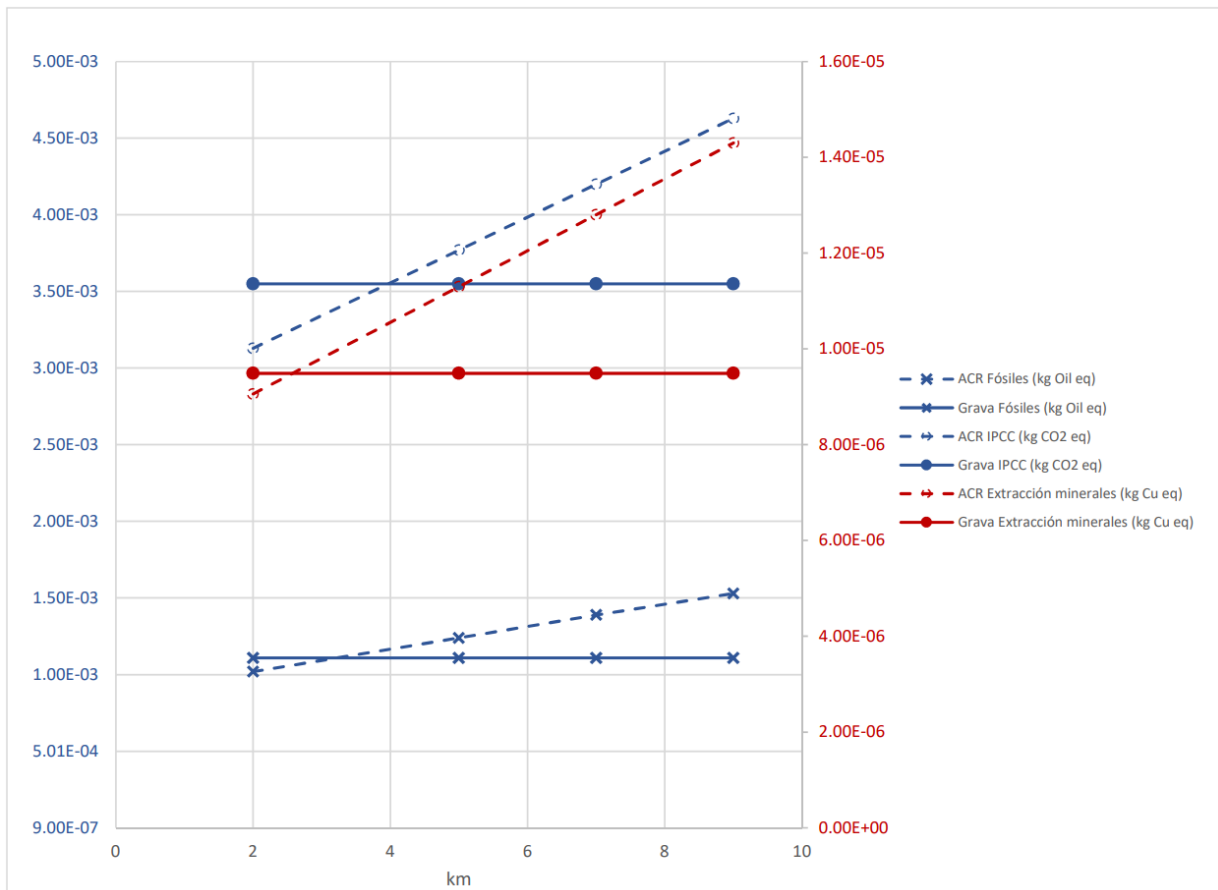


Figura 5.7. Análisis de sensibilidad para extracción de minerales, escasez de recursos fósiles y calentamiento global

Para estas tres primeras categorías, extracción de minerales, calentamiento global y escasez de recursos fósiles, a una distancia recorrida de 2km, el ACR posee siempre menos impacto respecto a la grava natural. Sin embargo, a partir de una distancia entre 3-4km (35-45% de la distancia a la cantera), el ACR genera más impactos ambientales frente a la grava natural.

Con ello, se observa que el rango que asegura el buen desempeño ambiental del material circular es limitado y susceptible a cambios por la propia ubicación de la cantera. Además, si un considerable número de demoliciones están ubicadas en sectores lejanos de la zona de construcción, incluso a distancias mayores respecto a las medidas desde la cantera, el impacto ambiental correspondiente al ACR sería más perjudicial en estos casos.

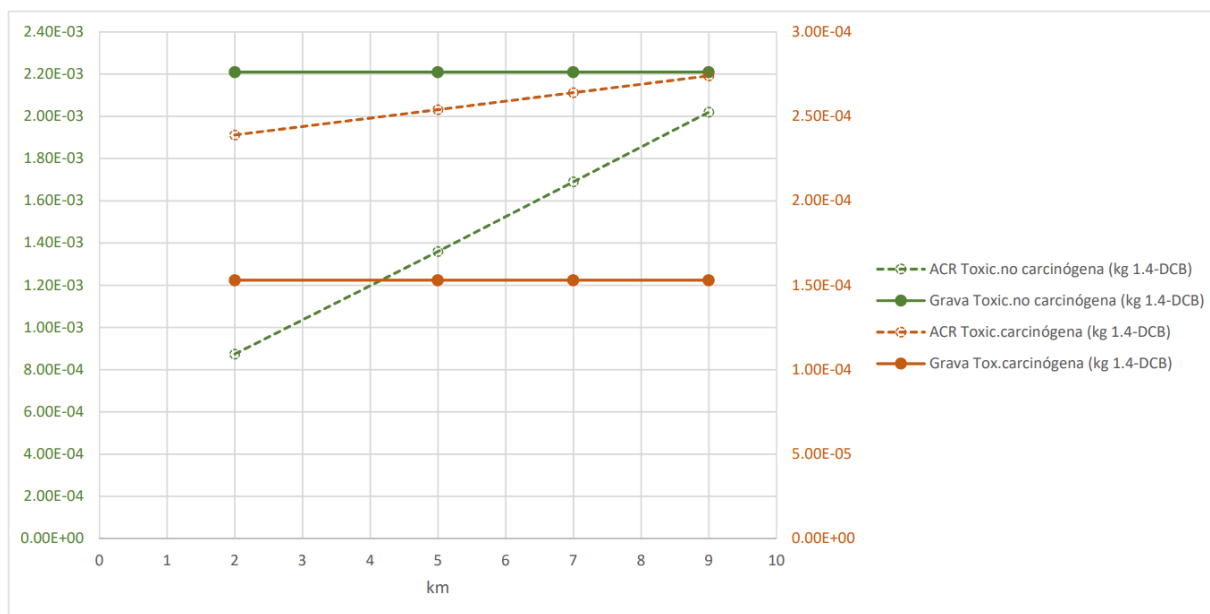


Figura 5.8. Análisis de sensibilidad para toxicidad humana carcinógena y no carcinógena

Por otro lado, en el aspecto de salud humana, el ACR resulta ser la opción más sostenible ambientalmente en términos de toxicidad no carcinógena hasta la distancia analizada. Sin embargo, es preciso observar que para un recorrido mayor al 100% del realizado por la grava, el ACR deja de ser la opción preferente. Acorde a ello, se estima que la intersección ocurre cuando la distancia desde la obra de demolición a la obra en estudio es aproximadamente 10,2km, es decir, cerca de un 15% más en comparación a la distancia desde la cantera a la obra en estudio de 9km.

En lo que respecta a la evaluación en la categoría de toxicidad carcinógena, los resultados indican que, desde un inicio, el impacto del ACR es superior respecto a la grava natural, y se mantiene así a lo largo del análisis de sensibilidad. Ello significa que existe otro componente dentro del modelamiento del ACR capaz de generar mayores impactos en esta categoría. Mediante una evaluación de las especificaciones de sustancias del SimaPro, se identificó que el componente que genera mayores impactos es el cromo hexavalente (Figura 5.9). Este elemento es la forma tóxica del metal cromo y, se produce en la fabricación y soldadura de acero inoxidable (Oficina de Evaluación de Peligros de Salud Ambientales, 2016), principal material de las maquinarias en los procesos unitarios de la presente tesis. En base a ello, se

evaluaron los valores resultantes de pieza de las maquinarias en cada proceso unitario (Tabla 5.8, Tabla 5.9, Tabla 5.10, Tabla 5.11, Tabla 5.12, Tabla 5.13 y Tabla 5.14), los cuales están asociados al *cast iron*, y por ende al material acero inoxidable. El análisis demostró, finalmente, que valores mayores de pieza en las maquinarias usadas para la producción de ACR conlleva a la generación de un impacto más elevado en la categoría de toxicidad carcinógena, en comparación con la grava.

No	Sustancia	Compartim	Unidad	ACR obtenido por	Grava obtenida por trituración y
	El total de todos los compartimentos		kg 1,4-DCB	0.000274	0.000153
1	Chromium VI	Agua	kg 1,4-DCB	0.000265	0.000145
2	Formaldehyde	Aire	kg 1,4-DCB	2.3E-6	1.99E-6
3	Chromium VI	Suelo	kg 1,4-DCB	1.85E-6	1.85E-6
4	Nickel	Aire	kg 1,4-DCB	1.31E-6	1.02E-6
5	Arsenic	Agua	kg 1,4-DCB	1.06E-6	1.18E-6
6	Nickel	Agua	kg 1,4-DCB	8.43E-7	1.03E-6
7	Chromium VI	Aire	kg 1,4-DCB	7.51E-7	6.67E-7
8	Arsenic	Aire	kg 1,4-DCB	2.19E-7	3.37E-7
9	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Aire	kg 1,4-DCB	1.59E-7	1.56E-7
10	Lead	Aire	kg 1,4-DCB	8.3E-8	8.04E-8
11	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Aire	kg 1,4-DCB	7.52E-8	3.26E-8
12	Benzo(a)pyrene	Aire	kg 1,4-DCB	2.51E-8	1.71E-8
13	Cadmium	Aire	kg 1,4-DCB	2.21E-8	1.84E-8
14	Mercury	Aire	kg 1,4-DCB	2.12E-8	1.08E-8
15	Benzene	Aire	kg 1,4-DCB	1.91E-8	2.42E-8

Figura 5.9. Especificaciones por sustancia para la categoría de impacto de toxicidad humana carcinógena. Extraído del *SimaPro*.

5.4.2. Comparación entre el concreto reciclado y convencional

Tras los resultados obtenidos en la Tabla 5.17, se aprecia que el concreto reciclado y convencional poseen igual magnitud de impacto para las categorías de extracción de minerales, calentamiento global y fósiles, aun cuando se aumenta el recorrido del ACR. Para las categorías de salud, la variación entre los dos concretos es mínima.

En base a ello, resulta evidente que el cemento, como componente de la mezcla de concreto, es el mayor contribuidor de impactos ambientales y, por ende, vuelve imperceptible la reducción del impacto ambiental al emplear ACR en vez de grava. Ello se menciona en investigaciones como la realizada por Pavlu et al. (2019) y De Schepper et al. (2014).

CAPÍTULO 6. ADMINISTRACIÓN DE MATERIALES

Para administrar materiales dentro del panorama de EC, se tuvo como base a las herramientas *Lean* que verdaderamente emplea el proyecto en estudio. Ello debido a que se desea demostrar que el empleo de dichas herramientas genera mayor simplicidad y eficiencia en un entorno circular, respecto a una planificación tradicional. Cabe resaltar que la administración del agregado reciclado se hizo posible debido a que el caso de estudio cuenta con su propia planta de concreto.

6.1. Uso del *Last Planner System*

Los responsables del proyecto brindaron el cronograma detallado del Edificio 12, el cual contenía la sectorización, el tren de actividades y los metrados por sectores de las partidas relacionadas a los vaciados de concreto. Acorde a dicha información, la sectorización consistió en 4 sectores y cada sector tuvo una duración de 1 día, por lo que se infiere que una partida se ejecutó en un periodo de 4 días por nivel. Cabe resaltar que las partidas relacionadas con la colocación de concreto en la escalera no formaban parte de un sector en específico; sin embargo, por simplificaciones de la presente tesis, se incluyeron en los sectores 1 y 2. Además, es preciso aclarar que el metrado proporcionado para cada sector no sufrió modificaciones a lo largo de las 16 plantas. Lo antes mencionado se puede observar en el Anexo B, donde se detallan los metrados para las partidas de vaciado de concreto por sector en el tren de actividades.

Es necesario tener una guía de los pasos a seguir para una correcta administración de los materiales. El proceso inicia con la identificación de cada uno de los materiales que son necesarios para la construcción del proyecto, así como la cuantificación de la cantidad necesaria de cada uno, incluyendo las mermas o desperdicios (Solís et al, 2009). Para efectos de esta investigación, el análisis se centró en la administración del agregado reciclado. Su relevancia recae en ser uno de los componentes del concreto estructural con 23.3% de participación en el total de volumen de la mezcla.

El proceso de cuantificación usó la herramienta *pull planning*. Se partió del metrado por sectores brindado por la empresa para especificar cuánto concreto se requería por sector, tal y como se muestra en el Anexo B. Además, como la planta es típica, el metrado correspondiente a los sectores 1, 2, 3 y 4 formó un patrón para el resto de las plantas. En la Tabla 6.1 se muestra un resumen de la proyección total de concreto por sector en una planta típica.

Tabla 6.1. *Volumen de concreto requerido por sector en una planta típica*

Sector	Metrado total de concreto (m ³)
1	43,14
2	35,05
3	40,68
4	33,19
Total	152,05

Para esta investigación, se consideró el uso de *buffers* como herramienta para contrarrestar la variabilidad en la cadena productiva de la construcción. En este caso, se optó por un valor de 5% de buffer de materiales acorde a las recomendaciones de especialistas. En base a ello, y teniendo en cuenta la dosificación planteada con inclusión del porcentaje de ACR, se hallaron las cantidades de ACR requerido para cada sector, como lo presenta la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. *Toneladas de ACR requerido por sector en una planta típica*

Sector	ACR requerido (ton)
1	24,51
2	19,91
3	23,04
4	18,85
Total	86,31

Cabe resaltar que, para obtener los valores de concreto demolido requerido, se tomó en cuenta un 15% adicional, ya que la planta de trituración consideró dicho porcentaje de desperdicio por cada tonelada de concreto triturado, de acuerdo con la empresa Athegsur Perú. Dichas cantidades se aprecian en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. *Toneladas de concreto demolido requerido en una planta típica*

Sector	Concreto demolido requerido (ton)
1	28,83
2	23,42
3	27,10
4	22,18
Total	101,53

En base a esta información, se elaboró la programación de funcionamiento de la planta móvil de trituración. Según los lineamientos definidos por la filosofía JIT, se buscó minimizar el inventario, mediante la determinación de las cantidades necesarias de material en el momento en el que las necesitan y, por ende, producir el agregado por sector. Por consiguiente, se optó por estimar un tiempo lo más próximo al exacto requerido para la producción diaria de la planta, en base a su rendimiento de 30 ton/h (Tabla 6.4). Ello va de la mano con uno de los objetivos de la EC, que busca minimizar el desperdicio en obra. Además, se definió el horario de funcionamiento en la mañana, a partir de las 8 a.m.

Tabla 6.4. *Duraciones de la producción de ACR por sectores para una planta típica*

Sector	Tiempo de producción diaria de la planta	
	(h)	(min)
1	1,0	60
2	0,8	48
3	0,95	57
4	0,75	45

Para la correcta administración de materiales, es necesario el control de calidad. Entre los posibles ensayos necesarios para asegurar dicha condición se encuentran la identificación y prevención de reacciones álcali de agregados, la solvencia en sulfatos y, la degradación por abrasión e impacto (ASTM, 2018). Los tiempos estimados de ejecución de los ensayos genera que, por lo menos dos días antes del inicio de producción de ACR por sector, el material tenga que ser enviado a laboratorio. Dichas tareas pueden generar una ruta crítica por ser antecesoras muy próximas al inicio de producción de ACR, razón por la cual, es necesario generar un cronograma que deba ser cumplido. Cabe mencionar que para que el ACR sea ensayado, se tuvo que triturar una pequeña muestra al día siguiente de la llegada del material concreto

	X 17/03/21	J 18/03/21	V 19/03/21	S 20/03/21	D 21/03/21
Vaciado de concreto(m ³)	39.06	34.52	40.56	33.19	
Sector	1	2	3	4	
Producción de la planta (h)	1.1	0.9	1	0.85	

Figura 6.2. Tren de actividades del primer piso sin retraso.

El segundo caso se presenta cuando, debido a diversas interrupciones en el flujo programado, se generan retrasos. Ello ocasiona una programación ajustada que termina consumiendo los 7 días de *buffers*, como caso más desfavorable. Una justificación sería el caso en el que, de los 64 sectores programados para vaciar concreto, 7 tengan una interrupción en el cronograma de vaciado y sea necesario continuar al día siguiente. En base a ello, cada sector de los 7 terminaría de vaciarse en dos días y la planta de ACR se paralizaría un día en cada caso, como se ejemplifica en la Figura 6.3 para un retraso en el sector 1 del primer piso.

	X 17/03/21	J 18/03/21	V 19/03/21	S 20/03/21	D 21/03/21	L 22/03/21
Vaciado de concreto(m ³)	39.06		34.52	40.56		33.19
Sector	1		2	3		4
Producción de la planta (h)	1.1	-	0.9	1		0.85

Figura 6.3. Vaciado en dos días del sector 1 del primer piso.

Cabe resaltar que, acorde a la información brindada por Athegsur Perú, las máquinas que componen la planta móvil no requieren mantenimiento hasta cumplir los 3 años de funcionamiento. Por tal motivo, se descarta la posibilidad de retrasos por fallas mecánicas de la planta.

Existe también la posibilidad de que se presenten trabajos adicionales que necesiten desarrollarse paralelamente a la ejecución de un edificio. Un ejemplo de ello es la realización de la HU interna, específicamente, de aquellas partidas que requieren concreto. Según el caso de estudio, esta habilitación se puede ejecutar simultáneamente a las partidas de concreto armado de un edificio y corresponde a un metrado aproximado de 30m³

El introducir dicha labor adicional puede darse de diversas maneras. La que se aborda en la presente investigación consiste en realizar los vaciados de concreto por un mes, durante el

vaciado de los sectores S4, ya que son aquellos que poseen menor metrado. De esta manera, cada cuatro días se vaciarían 5 m³ de concreto, lo que implica 2.84m³ adicionales de ACR.

Si se asume un escenario favorable en el que no se consume el *buffer* de ACR de los 3 sectores previos al S4, se podría utilizar ese material sobrante para la ejecución de la HU. Sin embargo, por efectos de la variabilidad de la obra, es muy probable que dicho *buffer* se emplee. Por ende, lo recomendable sería prolongar el tiempo de producción de la planta de ACR para el sector S4 y, así, respetar el *buffer* de material. En la Tabla 6.5 se aprecia el nuevo cronograma de producción de la planta de ACR, el cual tuvo en cuenta los principios de la filosofía JIT. Es preciso destacar que, por simplificación de la presente tesis, se asume que el tipo de concreto empleado en la HU es el mismo al de las partidas de estructuras del edificio.

Tabla 6.5. Duraciones modificadas de la producción de ACR por sectores para una planta típica

Sector	Tiempo de producción diaria de la planta	
	(h)	(min)
1	1,0	60
2	0,8	48
3	0,95	57
4	0,90	54

Como siguiente paso se define el programa de suministro de materiales donde se muestra las fechas en que se deben recibir los materiales en el sitio de construcción para su utilización o transformación. Como no es posible recibir algunos materiales todos los días, se consideran solicitudes por lotes, los cuales deben estar en la obra al inicio de un período específico (Solís et al, 2009).

En esta sección, se planifica la llegada del material concreto demolido. Dicha planificación se basó en una estimación de la cantidad de demoliciones necesarias. Como se menciona en el apartado de ACV, se estimó un total de 6 demoliciones para abastecer el total de ACR requerido en el proyecto. Este número de obras demolidas fue obtenido, por la cantidad planificada de material necesitado, teniendo en cuenta los *buffers* ya mencionados. Además, por la

simplificación hecha líneas arriba, se conoce que la demolición de una vivienda de dos pisos aproximadamente abastece el total de ACR necesario para 10 sectores (dos plantas y media del caso de estudio). En base a ello, se desarrolló la programación de los días que llega el concreto demolido a obra, como se aprecia en la Tabla 6.6, y la hora respectiva de ingreso a la zona de acopio, establecida a las 4 p.m. Cabe resaltar que se tuvo en cuenta un horario que no interfiera con la entrada de otros vehículos. Asimismo, debido a la magnitud de una obra demolida, el horario y la necesidad de 10 volquetes transportadores de material, se decidió que la llegada de dichos camiones se repartiera equitativamente en 2 días. Todo ello se observa también en el Anexo C.

Tabla 6.6. *Programación de llegada de concreto demolido*

Fechas de llegada de concreto demolido	
12/03/2021	19/04/2021
13/03/2021	20/04/2021
24/04/2021	30/04/2021
25/04/2021	3/05/2021
7/05/2021	13/05/2021
8/05/2021	14/05/2021

6.2. Modificación del *layout*

Debido a que el *layout* está siendo considerado como una herramienta 5S, la modificación sigue los lineamientos de dicha metodología japonesa. Para esta sección, se diseña la logística para la distribución de materiales en el sitio de construcción, en función de las características físicas del terreno y la forma de ejecución de los trabajos. En base a ello, se define la ubicación, el número y la capacidad de los almacenes de la obra o puntos de acopio (Solís et al, 2009). Cabe resaltar que, si bien el espacio no fue un limitante para el presente caso de estudio, se optó por administrarlo de la manera más eficiente posible.

Como el concreto demolido es acopiado cada cierto tiempo, se designó un punto de acopio cuya ubicación minimice el transporte del material a la planta de trituración y esté lo suficientemente apartado para no mezclarse con otros materiales. A su vez, se definió la ubicación de la planta móvil de trituración de la cual se extienden tres fajas transportadoras que

dirigen el material triturado y clasificado en tamaños desde ¾”, ½” hasta finos. La ubicación de los puntos de acopio fue lo más cerca posible de la ubicación de los agregados naturales para evitar modificaciones notorias en los tiempos de traslado de material a la planta dosificadora.

Adicional a ello, se optó por implementar una rampa de la misma pendiente de la rampa de la planta dosificadora (13%) para que el minicargador designado transporte y deposite el material ACR en la tolva de gruesos de la planta móvil. Las descripciones mencionadas del *layout* modificado se observan en el Anexo D.

Entre los puntos de acopio establecidos para los agregados ya triturados, un 15% de material es considerado como desperdicio, como ya se ha mencionado. Para evitar que el agregado llegué a una disposición final y, por ende, se genere un modelo lineal, se buscaron posibles situaciones en las cuales el ACR residual reingrese al flujo de materiales, tal y como se aprecia en el flujo de reciclaje de la Figura 2.4. Entre ellas se puede mencionar su uso como agregado de mezclas de concreto no estructural para las diferentes disposiciones de HU requeridas por la obra. Veredas, losas de parques y áreas de lectura son algunos de los ejemplos en los cuales se puede emplear mezclas de concreto con este agregado reciclado residual.

6.3. Análisis de los cambios originados en el caso de estudio

A partir de las descripciones de los párrafos anteriores, se presenta la Tabla 6.7, con el objetivo de comparar la introducción de la EC a una obra de construcción con herramientas *Lean*, respecto a una obra sin su inclusión.

Tabla 6.7. Cuadro comparativo de la implementación de EC en obra con herramientas *Lean*

	Caso de estudio existente	Caso de estudio bajo esquema circular
Factibilidad en obra	No requiere ningún espacio adicional para plantas trituradoras, pues todos los materiales son comprados ya listos para ser empleados.	Se debe evaluar la factibilidad de poseer un espacio extenso para la implementación de una planta trituradora de ACR.

Personal	No se poseen cambios en la cantidad de personal.	Se necesita personal adicional que vele por el funcionamiento de la planta trituradora.
Ensayos de calidad	Los ensayos de calidad son gestionados por los proveedores. Los tiempos de duración de los ensayos no afectan en la ejecución de la obra, pues son externos a ella.	Los ensayos de calidad son gestionados por el personal de la obra. Los tiempos de duración de los ensayos de calidad pueden generar rutas críticas en la ejecución de la obra.
Transporte externo	Se acuerda un horario con los proveedores para la llegada de los camiones con grava natural.	Se debe gestionar la llegada de los volquetes provenientes de la demolición.
Transportes en la planta dosificadora	No se originan modificaciones de rutas en el área de la planta dosificadora.	Debido a la implementación de una planta trituradora en obra, se debe evaluar y, de ser el caso, replantear las rutas de transporte en la planta.
Abastecimiento	Los agregados naturales llegan a obra diariamente. Si un abastecedor de grava natural falla, por cualquier causa, se contrata otro, pues existen varias canteras en Lima.	El material de una demolición llega a obra aproximadamente cada 7-8 días. Un incorrecto mantenimiento o fortuitos inconvenientes pueden provocar fallas. Ante ello, se debe tener un abastecedor de material reciclado, por ejemplo, la empresa CICLO.
Desperdicios	Los desperdicios son llevados a un vertedero.	Se busca emplear los desperdicios de la planta trituradora en elementos de concreto no estructural.

Finalmente, con los valores especificados en este capítulo, es posible establecer ciertos ratios entorno al panorama circular, como se aprecia en la Tabla 6.8. Ello con el objetivo de que puedan ser usados para tener una mejor visión del proyecto o para elaborar cálculos rápidos aproximados.

Tabla 6.8. *Estimaciones que pueden emplearse en panoramas de EC*

Tipo de ratio	Valor
Cantidad de ACR requerido por m ² de construcción (*)	0,20 ton/m ²
Cantidad de concreto demolido por m ² de construcción	0,23 ton/m ²
Cantidad de ACR requerido por m ³ de concreto (*)	0,62 ton/m ³
Horas de producción por cantidad de ACR requerido	0,04 h/ton

Nota: Los presentes ratios incluyen buffer de materiales

(*) Las cantidades de ACR corresponden a una sustitución al 50% de grava natural.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La EC se ha presentado como una solución al excesivo consumo de materias primas y la generación de desechos, dos actividades que, para la industria de la construcción en especial, son notoriamente perjudiciales. Sin embargo, materializar sus principios en el sector es un proceso bastante complejo, ya que conlleva a la reestructuración de todo un sistema ineficiente adquirido por décadas. En particular, para que la circularidad pueda desarrollar su máximo potencial, el sistema de la construcción debería alcanzar un equilibrio entre la demanda de recursos y la generación de RCD (Fellner et al., 2017). Ello con el fin de tener suficiente cantidad de materiales secundarios que satisfagan la demanda sin recurrir a las materias primas. Bajo este panorama, fijar las primeras prácticas circulares a través del reciclaje y la reutilización ha logrado sentar las bases de la construcción circular en micro escala.

La elección del reemplazo de agregado natural por ACR trajo consigo un análisis minucioso de viabilidad debido a su papel como uno de los componentes de las mezclas de concreto estructural. Ello se consiguió a través de una exhaustiva revisión bibliográfica hecha en el Capítulo 2 de la presente investigación. El cuadro comparativo que resultó como producto final sirvió para definir valores, rangos y tomar como referencia datos encontrados.

En primer lugar, se llegó a la conclusión de optar por la sustitución de 50% de ACR por ser un valor recurrente de reemplazo en las investigaciones y se comprobó la viabilidad de la mezcla de concreto con un correcto desempeño mecánico demostrado por diversos autores. Ello permitió obtener la dosificación de concreto con ACR necesaria para el desarrollo de los siguientes capítulos. Además, se reconoce el papel fundamental del agua extra o la adición de un aditivo en la mezcla. Ello, debido al superior porcentaje de absorción del ACR encontrado (3-7%) frente a la grava natural, el cual genera una disminución en la trabajabilidad el concreto

en estado fresco. Cabe resaltar que las propiedades del ACR dependen mucho del origen del concreto que lo compone, por lo que se tuvo especial cuidado en la elección de cada una de las investigaciones para reducir la variabilidad en los resultados obtenidos.

Al asegurar la viabilidad de la mezcla de concreto con 50% de porcentaje de agregado reciclado, el siguiente paso fue evaluar la sostenibilidad de dicho material circular y, para ello, el ACV resultó ser una herramienta eficaz. Las principales conclusiones de esta sección se centran en la comparación del ACR con la grava.

Como aspecto a resaltar, para evaluar los impactos ambientales, se optó por realizar un análisis de sensibilidad. Ello, debido a que el transporte resultó ser un factor muy influyente por el consumo de diésel. Los resultados permitieron concluir en que el impacto del ACR es menor al del agregado natural hasta una distancia recorrida desde la vivienda demolida igual al 35 a 45% de la distancia recorrida desde la cantera a la obra y ello se cumple para las tres categorías de impacto directamente relacionadas con el aspecto ambiental de la sostenibilidad: IPCC, extracción de minerales y escasez de recursos fósiles.

Aún con lo limitado que resulte ser este panorama inicial, el material circular propuesto es sostenible ambientalmente y la difusión de su uso en obras de construcción promete beneficios ambientales a mayor escala tangibles en el futuro. Para ello, es preciso evaluar minuciosamente aspectos como el transporte de materiales, así como tratar de minimizar sus efectos adversos en la salud humana. Es pertinente mencionar que se debería buscar siempre la sostenibilidad en la mejora continua de los procesos involucrados en la obtención del material circular, ya que, tal y como lo afirman Haupt & Zschokke (2017), la circularidad no se debería cumplir hasta que se satisfagan los criterios de sostenibilidad.

Por último, la presente investigación evaluó la administración de materiales en obra; un tema que muchas veces no es considerado con el nivel de importancia que merece, aunque su

descuido trajera consigo consecuencias graves para el proyecto en cuestión. Las deficiencias en la administración se traducen en gastos en tiempo y costo y, además, se vuelven más críticas mientras más actividades se encuentren al alcance de la empresa. La presente investigación expuso la necesidad de una adecuada gestión del tiempo y el espacio a fin de mantener controlados todos los procesos involucrados hasta la producción de las mezclas de concreto reciclado estructural.

Con base en ello, se demostraron los múltiples beneficios del uso de las herramientas *Lean Construction* en el entorno circular. Los principios propuestos por la herramienta 5S sirvieron como guía para modificar de *layout* y administrar el espacio lo más eficientemente posible debido a la inclusión de una planta trituradora. El uso del LPS, conjuntamente con el *pull planning*, permitieron estimar las cantidades necesarias de concreto y, en consecuencia, las proporciones de ACR requeridas. Y colectivamente, la filosofía JIT permitió cuantificar el número de horas que necesitaba funcionar la planta trituradora para producir el agregado reciclado, así como la cantidad de demoliciones necesarias.

Además de ello, se ha podido identificar, para el caso de estudio, una compatibilidad entre el empleo de las herramientas *Lean Construction* y la EC. Tras analizar la información recaudada en el Capítulo del Estado del Arte, en especial en la Tabla 2.1, se concluye que herramientas *Lean* como la filosofía JIT contribuyen al logro de objetivos definidos por la EC como la optimización del uso de materiales y la minimización del desperdicio.

Finalmente, se observó que la administración de materiales sufrió diversos cambios por la inclusión de la EC. Dichos cambios se agruparon en siete aspectos evaluados en la Tabla 6.7: factibilidad en obra, personal, ensayos de calidad, transporte externo, transportes en la planta dosificadora, abastecimiento de agregado grueso y desperdicios. Del análisis, se destaca el abastecimiento del agregado grueso, al necesitar una fuente distinta respecto al agregado

natural. Ante ello, se debe tener en cuenta que el plan de contingencia para la obtención del ACR es más limitado respecto al natural, ya que las empresas abastecedoras del agregado reciclado son escasas en Lima. Otro aspecto a resaltar es la calidad de los materiales, debido a que, en el caso del agregado natural, los ensayos son responsabilidad del proveedor. Mientras que, al producir el ACR, la calidad es un proceso gestionado por la misma obra y cuyos resultados determinan la factibilidad de su uso. Finalmente, se señala el uso de los desperdicios del ACR dentro de la misma obra como una práctica circular. En el caso de estudio, se consideró viable emplear dichos residuos para concretos no estructurales pertenecientes a la HU interna.

A simple vista, la EC resulta ser una vía atractiva de transición hacia la sostenibilidad ambiental en la construcción. Sin embargo, ello no se podrá concretizar hasta que se asegure el buen desempeño ambiental de los materiales circulares y su implementación permita el cambio progresivo en el proceso productivo de la construcción, mediante prácticas como la correcta administración de los materiales.

Recomendaciones

En base al desarrollo de la metodología en la presente investigación, se recomienda sustituir un porcentaje de grava natural tal que la cantidad de ACR necesario sea coherente con la producción requerida de concreto estructural. Además, que su inclusión satisfaga los requerimientos de desempeño mecánico de la mezcla y, a la vez, sea lo suficiente como para asegurar la viabilidad de la instalación de una planta móvil. Para la presente investigación, el valor fue de 50%.

En lo que respecta al ACV, se recomienda evaluar cada etapa de forma minuciosa, incluidos aspectos como las maquinarias empleadas para la producción y el transporte. Además, se debería tener especial cuidado al momento de definir los límites del sistema, más aún si el uso de la herramienta ACV es con fines comparativos.

Si bien el alcance de la presente investigación abarcó desde la fase de gestión RCD hasta la planificación y diseño, es posible mencionar ciertas acciones que se darían en obra, dentro del panorama circular, para las fases siguientes. En la fase de ejecución, se recomienda aplicar usos alternativos al concreto residual. Cabe resaltar que, debido a la magnitud de la obra como caso de estudio, es altamente probable encontrar una manera de reusar dicho concreto. Respecto a la fase uso, puede depender de un correcto proceso constructivo para reducir el mantenimiento futuro del edificio, así como de la entrega de manuales para los usuarios, que permitan conocer las especificaciones de materiales y cuidados preventivos.

Además, bajo este panorama circular, es incluso factible evaluar la posibilidad de reinsertar nuevamente los residuos de concreto producto de la demolición del edificio estudiado en la presente tesis al final de su vida útil. Con ello, el concreto demolido inicial estaría pasando por un segundo proceso de transformación para convertirse en agregado, lo cual se conoce como doble ciclo o doble *loop*. Se recomienda evaluar el desempeño del ACR resultante de esta doble transformación y contrastar los resultados con investigaciones como la realizada por Marie y Quiasrawi (2012), quienes aseguran la viabilidad de su uso.

Para finalizar, si se desea tener una mejor visualización de la distribución espacial de las demoliciones, ya que son las fuentes de origen del ACR, se recomienda coordinar con empresas dedicadas a la demolición de viviendas. Ello debido a que este tipo de empresas posee mayor conocimiento sobre las fechas de demoliciones y las cantidades aproximadas de concreto demolido a eliminar.

Se espera que la presente tesis sirva de referente para futuros investigadores que decidan profundizar en el tema de EC en la construcción y contribuir a la literatura escasa del país. Por tal motivo, se presenta las futuras líneas de investigación.

En primer lugar, se recomienda extender la evaluación de concretos reciclados al considerar otros posibles sustitutos de agregados naturales u otros componentes a sustituir como el

cemento, con mayor carga ambiental. Ello, dada la amplia gama de potenciales sustitutos expuestos en la Tabla 2.2.

En lo que respecta a ACV, a pesar de que en la presente investigación los límites del sistema se han definido desde la cuna a la puerta, resulta interesante plantear la extensión de dichos límites y evaluar el impacto ambiental. Un ejemplo de ello sería un análisis comparativo de la cuna a la tumba. Además, debido a que los procesos del ACV de la presente tesis han sido de carácter unitarios, se recomienda evaluar el impacto ambiental con la consideración de las cantidades reales de las variables involucradas en dichos procesos. Y también, se propone realizar investigaciones enfocadas a optimizar del uso de las maquinarias participantes en la generación de ACR, con el fin de reducir el impacto del hierro fundido en la salud humana.

Respecto a la administración del material, el tema de costos es un aspecto importante; sin embargo, para efectos del alcance de esta tesis, no se aborda. Dicho análisis sería una interesante línea de investigación futura, por el efecto monetario que posee la implementación y gestión de la EC en la construcción. Finalmente, si bien se demuestra en la presente tesis la compatibilidad entre la EC y la filosofía *Lean*, se recomienda evaluar dicha relación en distintos casos de estudio. Ello con el fin de obtener un mayor número de investigaciones que respalden lo mencionado.

Bibliografía

- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: conceptos, problemas y estrategias. *Dearq. Revista de Arquitectura*, (4), 14-23. doi: [10.18389/dearq4.2009.02](https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02)
- Aguilar, D. & Loo, F. (2017). *Análisis de eco-eficiencia de la demolición de una edificación en Lima*. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9994>
- Ahmed, K., Hatira, L., & Valva, P. (2014). *The Construction Industry in Ghana, West Africa*. (Tesis de maestría). School of Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden. Recuperado de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829734/FULLTEXT01.pdf>
- Alarcón, L. F., & Pellicer, E. (2009). Un nuevo enfoque en la gestión: la construcción sin pérdidas. *Revista de Obras Públicas*, 3496, 45-52. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/28249238_Un_nuevo_enfoque_en_la_gestion_n_la_construccion_sin_perdidas
- Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451), 41-47. Recuperado de <http://polired.upm.es/index.php/boletincfs/article/viewFile/2527/2604>
- American Society of Testing and Materials (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, Pensilvania. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C33>
- Anastasiades, K., Blom, J., Buyle, M., & Audenaert, A. (2020). Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109522. Doi: [10.1016/j.rser.2019.109522](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522)
- Ansah, R. H., Sorooshian, S., & Mustafa, S. Bin. (2016). Lean construction: An effective approach for project management. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), 1607-1612. Cit z http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0216_3541.pdf
- Asociación de Productores de Cemento (2014). *Catálogo de Normas Técnicas Peruanas de Concreto* (3era ed.). Recuperado de https://issuu.com/trialh/docs/cat_logo_de_normas_de_t_cnicas_pe
- Aziz, R. F., & Hafez, S. M. (2013). Applying lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679-695. doi: [10.1016/j.aej.2013.04.008](https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008)
- Bazalar, L. R., & Cardenillas, M. A. J. (2019). *Propuesta de agregado reciclado para la elaboración de concreto estructural con $f'c=280$ kg/cm² en estructuras aperticadas en la ciudad de Lima para reducir la contaminación ambiental*. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10757/628103>
- Bazán Garay, I. O. (2018). *Caracterización de residuos de construcción de Lima y Callao (estudio de caso)* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/10189>

- Brioso, X. M. (2015). *El análisis de la construcción sin pérdidas (Lean Construction) y su relación con el Project Construction & Managment: Propuesta de regulación en España y su inclusión en la ley de la ordenación de la edificación* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Recuperado de <http://oa.upm.es/40250/>
- Cáceres, A. (2016) *Análisis comparativo de Edificaciones multifamiliares en lima* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6682>
- Carabaño, R., Hernando, S. M., Ruiz, D., & Bedoya, C. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: The case of thermal insulation materials. *Revista de la Construcción*, 16(1), 22–32. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.1.22>
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44(1), 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>
- Cheng, J. C. P., Won, J., & Das, M. (2015). Construction and demolition waste management using bim technology. Proceedings of IGLC 23 - 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Global Knowledge - Global Solutions, 2015-Janua, 381–390. <https://iglc.net/Papers/Details/1184>
- Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I., & Petrillo, A. (2018). Life Cycle Assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. *Buildings*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/buildings8050070>
- Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI (2001) *Norma Técnica Peruana NTP 334.001:2001 Cementos. Definiciones y nomenclatura*. Lima, Perú.
- Corinaldesi, V. (2011). Structural concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate: From investigation to design. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/283984>
- da Silva, E. F., Bento, D.F., Mendes, A.C., da Mota, F.G., Mota, L. C., Tavares, Fonseca, A. I., Maduro, R., & de Oliveira, L. (2020). Environmental impacts of sand mining in the city of Santarém, Amazon region, Northern Brazil. *Environ Dev Sustain*, 22, 47–60. doi: [10.1007/s10668-018-0183-2](https://doi.org/10.1007/s10668-018-0183-2)
- De Schepper, M., Van den Heede, P., Van Driessche, I., & De Belie, N. (2014). *Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete*. *Materials*, 7(8), 6010–6027. <https://doi.org/10.3390/ma7086010>
- Deng, X. H., Lu, Z. L., Li, P., & Xu, T. (2016). An Investigation of Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete. *Archives of Civil Engineering*, 62(4), 19–34. <https://doi.org/10.1515/ace-2015-0107>
- Desai, A., & Shelat, M (2014). Value Stream Mapping as a Lean Construction Tool – a Case Study. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(12), 354-358. Recuperado de <https://www.ijert.org/research/value-stream-mapping-as-a-lean-construction-tool-a-case-study-IJERTV3IS120412.pdf>
- Deschamps, J., Simon, B., Tagnit-Hamou, A., & Amor, B. (2018). Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in

- concrete. *Journal of Cleaner Production*, 185, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.021>
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2014). Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe - A study of commercial buildings in Hong Kong. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(7), 1409–1423. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0743-0>
- Du Plessis, C. (2002). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries*. Recuperado de https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/3511/Du%20Plessis_d_2_2002.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Cowes, UK. Recuperado de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- Estanqueiro, B. (2012). Life cycle assessment of the use of recycled aggregates in the production of concrete (Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144980011/Artigo_tese_Bruno66650.pdf
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- European Commission (2016). *EU Construction & Demolition Waste Management Protocol*. Recuperado de https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en
- Fellner, J., Lederer, J., Scharff, C., & Laner, D. (2017). Present Potentials and Limitations of a Circular Economy with Respect to Primary Raw Material Demand. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 494–496. <https://doi.org/10.1111/jiec.12582>
- Frosch, R. A. (1992). Industrial ecology: A philosophical introduction. N. Kumar & C. Patel (Ed.), *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (89, 800–803). Washington DC. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>
- Fundación Conama (noviembre, 2018) Economía circular en el sector de la construcción. Presentado en el Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018, Madrid, MAD. Recuperado de http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/6_final.pdf
- Gao, S., & Pheng Low, S. (2014). *Lean Construction Management: The Toyota Way*. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-014-8>
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>

- Gulghane, A. A., & Khandve, P. V. (2015). Management for Construction Materials and Control of Construction Waste in Construction Industry: A Review. *Journal of Engineering Research and Applications*, 5(41), 59–64. www.ijera.com
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- Harish, B. A., Venkata N., & Gnaneswar, K. (2020). A Study on Properties of Recycled Coarse Aggregate and It's Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 998 (1), 1-10. Recuperado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/998/1/012025/meta>
- Haupt, M., & Zschokke, M. (2017). How can LCA support the circular economy?—63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(5), 832–837. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1267-1>
- Hellweg, S., & Canals, L. M. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>
- Horman, M. J., & Thomas, H. R. (2005). Role of Inventory Buffers in Construction Labor Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 834–843. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:7\(834\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:7(834))
- Hoyos, M. F., & Botero, L. F. (2018). Evolución e impacto mundial del Last Planner System: una revisión de la literatura. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 187-214. doi: <http://dx.doi.org/10.14482/inde.36.1.10946>
- Huatay, M. (2014). *Rendimiento de la maquinaria pesada en el proyecto cierre de mina Pachacutec, La Quinua-Yanacocha-Cajamarca*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/550>
- International Organization for Standardization (2000). *Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Evaluación de impacto del ciclo de vida*. Ginebra: Norma Internacional 14042
- International Organization for Standardization (2006). *Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia*. Ginebra: Norma Internacional 14040
- Joensuu, T., Edelman, H., & Saari, A. (2020). Circular Economy practices in the Built Environment. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124215. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124215>
- Jusoh, Z. M., & Kasim, N. (2017). Influential Factors Affecting Materials Management in Construction Projects. *Management and Production Engineering Review*, 8(4), 82–90. <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0039>
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., & Althaus, H. J. (2013). Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 909–918. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>

- Kim, S. C., & Kim, Y. W. (2014). Computerized integrated project management system for a material pull strategy. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(6), 849–863. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802743>
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Informe No. 72). Stanford: Stanford University. Recuperado de <http://www.leanconstruction.org.uk/media/docs/Koskela-TR72.pdf>
- Koskela, L. J. (1999). Management of production in construction: a theoretical view. In *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 241-252. Recuperado de <http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/9429/>
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Finlandia: VTT Technical Research Centre of Finland. Recuperado de <http://urn.fi/urn:nbn:fi:tkk-001187>
- La República (2019, setiembre 23). Fondo Mivivienda: Conozca los distritos con mayor oferta inmobiliaria. La República. Recuperado de <https://larepublica.pe/economia/2019/09/23/fondo-mivivienda-conozca-los-distritos-con-mayor-oferta-inmobiliaria/?ref=lre>
- Lean Construction Institute (2015). Lean Construction defined. En: Seed W. (Ed.), *Transforming design and construction: A framework for change* (pp.27-31). Recuperado de <https://www.leanconstruction.org/wp-content/uploads/2016/02/TDC-CH04.pdf>
- Lledó, P., Rivarola, G., Mercáu, R., Cucchi, D.H., & Esquembre, J. F. (2006). *Administración Lean de proyectos: Eficiencia en la gestión de múltiples proyectos*. Argentina: Pearson Educación. Recuperado de https://salvadoralejandro.files.wordpress.com/2016/05/administracion3b3n_lean_de_proyectos.pdf
- Lozano, F. & Sagastegui, W. (2019). Influencia del reemplazo de agregado natural por agregado de concreto reciclado, sobre las propiedades mecánicas del concreto, para el diseño de edificaciones (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, Perú. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/16070>
- Machaca, L. J. (2018). *Determinación de los impactos ambientales producidos por las actividades extractivas de materiales no metálicos para la construcción en el río Socabaya, distrito de Socabaya, Arequipa, 2017* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4794>
- Mangialardo, A., & Micelli, E. (2018). Rethinking the construction industry under the circular economy: Principles and case studies. *Green Energy and Technology*. Springer International Publishing, 333-344. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_23
- Marie, I., & Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 37, 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>
- Ministerio de Energía y Minas (2019) *Producción Minera / Producción minera anual 2011-2019*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/estadisticaSector.php?idSector=1&idCategoria=10>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2009) *Norma Técnica de Edificaciones NTE E.060 concreto armado*. Lima, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2010) *Norma Técnica Elementos para la determinación del costo horario de los equipos y la maquinaria del sector construcción*. Lima, Perú: Resolución Directoral N°0.35-2010.
- Ministerio del Ambiente (2013) *Cuarto informe nacional de residuos sólidos municipales y no municipales gestión 2010-2011*. Recuperado de <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20140129092851.pdf>
- Monteiro, P., Millier, S., & Horvath, A. (2017) Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16, 698-699. Recuperado de <https://www.nature.com/articles/nmat4930>
- Municipalidad de Lima (2019) *Estudio de caracterización de residuos sólidos municipales en el Cercado de Lima*. Recuperado de <http://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/6fd6b385066005dc.pdf>
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nasir, M. H. A., Genovese, A., Acquaye, A. A., Koh, S. C. L., & Yamoah, F. (2017). Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. *International Journal of Production Economics*, 183, 443-457. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008>
- Ness, D. A., & Xing, K. (2017). Toward a Resource-Efficient Built Environment: A Literature Review and Conceptual Model. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 572-592. Doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.12586>
- Oficina de Evaluación de Peligros de Salud Ambientales (2016). *Efectos del cromo hexavalente sobre la salud*. California, Estados Unidos: OEHHA. Recuperado de http://www.aqmd.gov/docs/default-source/compliance/Paramount/hexavalent-chromium-air-fact-sheet_11-09-2016_in-spanish.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común*. Recuperado de <https://undocs.org/es/A/42/427>
- Organización de las Naciones Unidas (s.f.). *Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. Estados Unidos: Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- Pani, L., Francesconi, L., Rombi, J., Mistretta, F., Sassu, M., & Stochino, F. (2020). *Effect of parent concrete on the performance of recycled aggregate concrete*. *Sustainability (Switzerland)*, 12(22), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12229399>
- Palomino, J., Hennings, J., & Echevarría, V. (2017). Análisis Macroeconómico Del Sector Construcción En El Perú. *Quipukamayoc*, 25(47), 95–101. <https://core.ac.uk/download/pdf/304895543.pdf>
- Pavlu, T., Kocí, V., & Hájek, P. (2019). Environmental assessment of two use cycles of recycled aggregate concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11216185>

- Pavón, E., Etxeberria, M., & Martínez, I. (2011). Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte. *Revista de la Construcción*, 10(3), 4–15. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2011000300002>
- Pellegrino, C., & Faleschini, F. (2016). *Sustainability improvements in the concrete industry: Use of recycled materials for structural concrete production*. Cham, Suiza: Springer. Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-28540-5>
- Pichery, C. (2014). *Sensitivity Analysis* (P. B. T.-E. of T. (Third E. Wexler, ed.)). Oxford: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00431-0>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of cleaner production*, 143, 710-718. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Pomponi, F., Giesekam, J., Hart, J., & D'Amico, B. (2020). *Embodied Carbon: Status quo and suggested roadmap*. Recuperado de https://zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Embodied_carbon_spreads%20final.pdf
- Pons, J. F. (2014). *Introducción a Lean Construction*. Madrid: Fundación Laboral de la Construcción. Recuperado de <http://www.juanfelipepons.com/wp-content/uploads/2017/02/Introduccion-al-Lean-Construction.pdf>
- Porras, H., Sánchez O. G., & Galvis, J. A. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 11(1), 32-53. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6684752>
- Praseeda, K. I., Venkatarama Reddy, B. V., & Mani, M. (2017). Life-Cycle Energy Assessment in Buildings: Framework, Approaches, and Case Studies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 113–136. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.10188-5
- Preston, F (2012). *A Global Redesign? Shaping the Circular Economy*. Energy, Environment and Resource Governance. Londres: Chatham House. http://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy_Environment_and_Development/bp0312_preston.pdf
- PRé Sustainability. (2020). *Simapro Database Manual*. Recuperado de <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>
- Ramos, J. (2011) *El equipo y sus costos de operación* (5ta ed.). Lima: Fondo Editorial CAPECO. Recuperado de https://www.academia.edu/14348419/SENCICO_EL_EQUIPO_Y_SUS_COSTOS_DE_OPERACION
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*, 42(1), 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>
- Rodríguez, A. D., Alarcón L. F., & Pellicer, E. (2011). La gestión de la obra desde la perspectiva del último planificador. *Revista de obras públicas*, 3518, 1-9. Recuperado de <https://docplayer.es/1471046-La-gestion-de-la-obra-desde-la-perspectiva-del-ultimo-planificador.html>

- Rojas, M. D., Henao, M., & Valencia, M. E. (2016). Lean construction–LC bajo pensamiento Lean. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(30), 115-128. doi: 10.22395/rium.v16n30a6
- Saldaña, J. & Caballero, V. (2014). Estudio de la resistencia del concreto, utilizando como agregado el concreto reciclado de obra (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Santa, Áncash, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2084>
- Sánchez, J. (2012). Project management models: Lean thought project management, *Dyna*, 87, 214-221. doi: 10.6036/4367
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77-95. Doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- SimaPro (s.f.). *About SimaPro*. Países Bajos: SimaPro. Recuperado de <https://simapro.com/about/>
- Singh, S., & Garg, D. (2011). JIT System: Concepts, Benefits and Motivation in Indian Industries. *International Journal of Management & Business Studies*, 1(1), 26-30. Recuperado de <http://www.ijcst.com/ijmbs/research1/sultan.pdf>
- Skjelbred, S., Fossheim, M. E., & Drevland, F. (2015). Comparing different approaches to site organization and logistics: Multiple case studies. *Proceedings of IGLC 23 - 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Global Knowledge - Global Solutions*, 13–22. Perth, Australia. <https://www.iglc.net/papers/details/1178>
- Solís, R., Zaragoza, N., & González, A. (2009). La administración de los materiales en la construcción. *Ingeniería*, 13(3), 61–71. Recuperado de https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen13/administracion_materiales.pdf
- Tarazona, K. (2019). *Aprovechamiento del concreto reciclado proveniente de los residuos de demolición de pavimento rígido en la producción de concreto nuevo en la ciudad de Huánuco - 2018* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unheval.edu.pe/handle/UNHEVAL/4561>
- Tocto, N. G. (2020). *Análisis de ciclo de vida comparativo del adoquín para pavimento peatonal reciclado versus el convencional*. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17418>
- Tsao, C.C.Y. and Lidelöw, H. (2017). Development of a Materials Management Strategy to Enable Continuous Work Flow On-Site. *LC3 2017 Volume II – Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*, Walsh, K., Sacks, R., Brilakis, I. (eds.), Heraklion, Greece, pp. 853–860. <https://doi.org/10.24928/2017/0331>
- Vicente, G. & Alarcón, L. (2003). Buffers de Programación: una estrategia complementaria para reducir la variabilidad en los procesos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 18(2), 109-119. Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10103>
- Wagih, A., El-Karmoty, H., Ebid, M., & Okba, S. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC journal*, 9(3), 193-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.08.007>

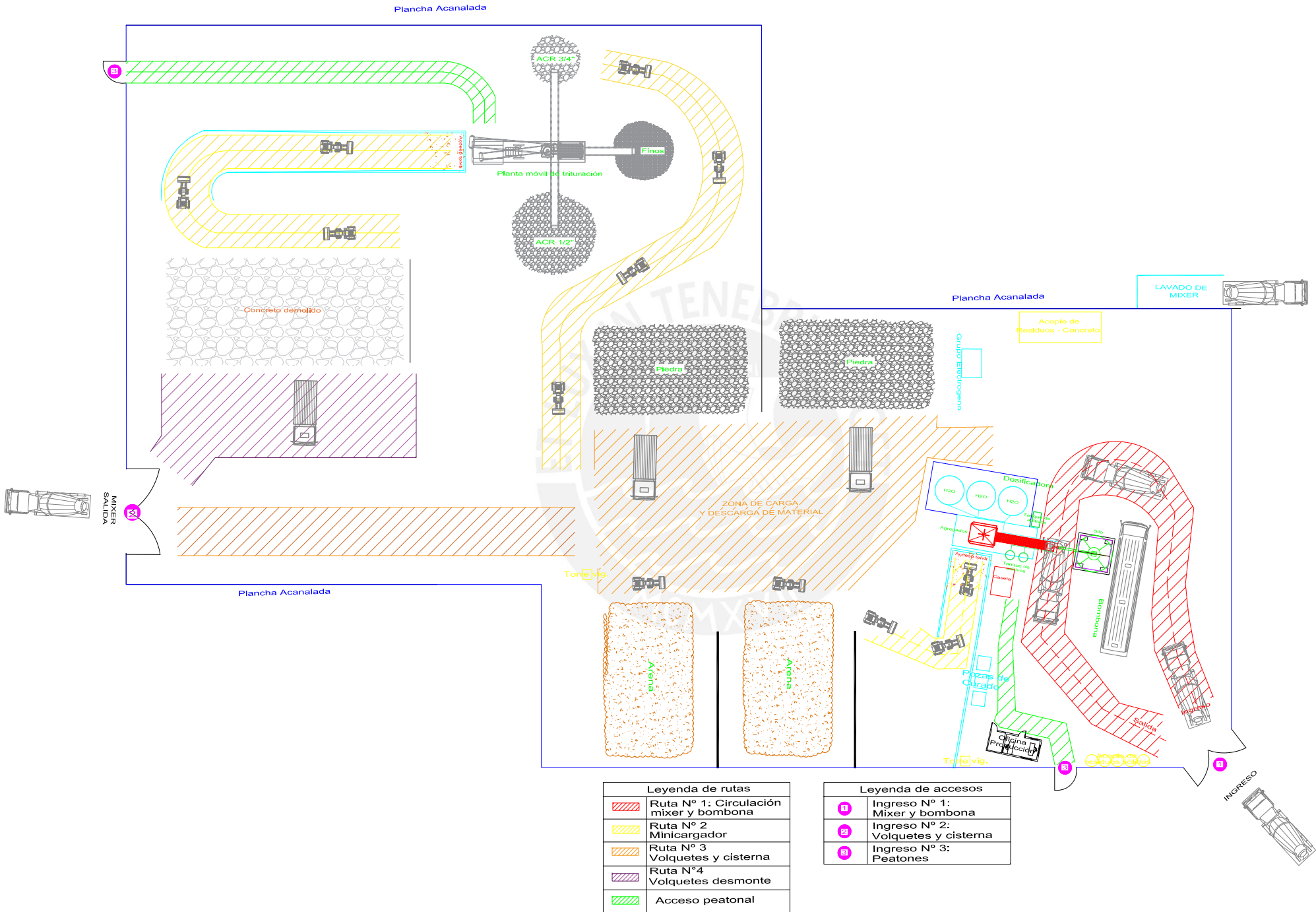
- World Business Council for Sustainable Development. (2009). *The Cement Sustainability Initiative: executive brief*. Recuperado de <http://ficem.org/CIC-descargas/Suiza/CSI/Recycling-Concrete-full-report-2009.pdf>
- Xing, W., Hao, J. L., Qian, L., Tam, V. W. Y., & Sikora, K. S. (2020). Implementing lean construction techniques and management methods in Chinese projects: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 124944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124944>
- Zapata, J. (2020) *Material del curso Planificación en edificaciones*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Zero Waste Scotland (2020) *Construction Resources for a Circular Economy*. Stirling, UK. Recuperado de <https://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Construction%20Circular%20Economy%20Resources%200920.pdf>



Anexos

Anexo A

Autor	Granulometría	% Sustituido elegido	Relación w/c	Tipo de cemento	% absorción del ACR	Slump de diseño	Resistencia objetivo	Propiedades mecánicas	Uso de aditivos	Fuente del ACR	Comentarios
Bazalar & Cardenillas	Huso 67	40	0,466	Tipo IPM	No específica	4 pulg	$f'c(\text{diseño})=280 \text{ kg/cm}^2$ $f'c(\text{patrón})=343,31 \text{ kg/cm}^2$	R.compr.prom.28 días= 349,96kg/cm ² (+1,94%) MR.prom.28 días= 40,1 kg/cm ² E.prom.28días=27,803,547 Mpa	No emplea	Trituración de elementos estructurales(vigas y columnas)	-
Chakradhara et al.	TMN 20mm	25	0,43	Tipo I	4	5-6 cm	$f'c(\text{patrón})=49 \text{ MPa}$	R.compr.28 días =45MPa (-13%) R.trac.28 días=2,33 MPa E= 2,357x10 ⁴ MPa	Superplastificante Sika Viscocrete R-550	Demolición de una alcantarilla antigua	-
Corinaldesi	11-22 mm	30	0,5	Tipo II	6,8	19-20 cm	$f'c(\text{patrón})=43,3 \text{ MPa}$ $f'c(\text{diseño})=32-40 \text{ MPa}$	R.compr.28 días=35,1MPa (-18,94%) E 28 días= 27,5 GPa	Aditivo reductor de agua	Área de reciclaje	-
Deng et al.	5-25 mm	50	0,55	Tipo I	5,3	No específica	$f'c(\text{patrón})=30 \text{ MPa}$	R.compr.28 días =33MPa (+10%) R. trac.28 días=3 MPa	No emplea	Demolición de un pavimento rígido	-
Etxeberria et al.	4-25 mm	25	0,55	Tipo I	4,4	8-10 cm	$f'c(\text{patrón})=35,53 \text{ MPa}$	R. compr. 28 días=38,79MPa (+9,18%) R. trac.28 días=3,88 MPa E 28 días= 31,427x10 ³ MPa	Superplastificante Glenium C313	Área de reciclaje	-
Harish et al.	12,5 y 20mm	50	0,5	Tipo I	4,4	20mm	$f'c(\text{diseño})= 20\text{Mpa}$ $f'c(\text{patrón})= 39,7 \text{ MPa}$	R. compr.prom.28 días= 36MPa (-9,32%) R.trac.=2,56MPa E= 3x10 ⁴ Mpa	No emplea	Bloques de concreto de una edificación demolida	Los módulos de elasticidad salieron de fórmulas empíricas, se tomó el valor de uno de los resultados.
Lozano & Sagastegui	1/2"	25	0,56	Tipo MS	No específica	3-4 pulg	$f'c(\text{diseño})=210 \text{ kg/cm}^2$ $f'c(\text{patrón})=246 \text{ kg/cm}^2$	R.compr.prom.28 días= 248 kg/cm ² (+0,81%)	No emplea	Reciclaje de elementos de una edificación	-
Pani et al.	4-16 mm	50	0,463	Tipo II	6,7-7	15-20 cm	$f'c(\text{patrón})=42,8 \text{ MPa}$	R.compr.prom.28 días=46,15 MPa (+7,83%) R.trac.prom=3,79MPa E prom= 24,26 x10 ³ MPa	Superplastificante policarboxilato	Demolición de vigas y cimentaciones de un estadio antiguo	-
Pavón et al.	TMN 19 mm	25	0,45	Tipo I	6,8	12+-2 cm	$f'c(\text{diseño})=35 \text{ MPa}$	R.compr.28 días=35MPa (0%)	Superfluidificante (N100 RC)	Escombros de elementos prefabricados	Se realizaron varias mezclas con superplastificante (SP) y otras con SP y, microsílíce o filler de escoria. Para esta investigación, se escogió los valores correspondientes a la mezcla solo con superplastificante.
Rahal	9, 12 y 19 mm	100	0,5	Tipo I	3,47	50-60mm	$f'c(\text{diseño})=25\text{Mpa}$ $f'c(\text{patrón})=26,7\text{mpa}$	R.compr.28 días=25,1MPa (-5,99%) R.corte 28 días= 3,3Mpa E= 11,3 Gpa	Superplastificante	Demolición de dos edificios en la zona de Hawally en Kuwait	Se evaluaron mezclas para 5 resistencias a la compresión (200, 250, 300, 400 y 500 kg/cm ²). Para fines de esta investigación se escogieron los valores correspondientes a la 250 kg/cm ² .
Saldaña & Caballero	3/4"	50	0,55	Tipo MS	3,78	1 -4 pulg	$f'c(\text{diseño})=210\text{kg/cm}^2$ $f'c(\text{patrón})=282,7\text{kg/cm}^2$	R.compr.prom.28 días= 261,57kg/cm ² (-7,47%)	No emplea	Demolición del concreto de obras	-
Tarazona	3/4"	40	0,555	Tipo I (PM)	3,51	3-4 pulg	$f'c(\text{patrón})=225,2 \text{ kg/cm}^2$ $f'c(\text{diseño})=210 \text{ kg/cm}^2$	R.compr.28 días=207,50 kg/cm ² (-7,86%)	No emplea	Demolición de un pavimento rígido	-
Wagih et al.	4,75-20 mm	25	0,42- 0,55	Tipo I	2,15 -7,15	10 ± 2 cm	$f'c(\text{diseño})=33\text{Mpa}$ $f'c(\text{patrón})=45,4\text{Mpa}$	R.compr.prom.28 días= 44Mpa (-3,08%) R.trac.=4,49MPa E 28 días= 30,04 GPa	Superplastificante	Quince fuentes diferentes de edificios demolidos y ubicación del relleno sanitario	Se hicieron varias mezclas con superplastificante (SP) y otras con SP y humo de sílice sílice. Para fines de esta investigación, se escogieron los valores correspondientes a las mezcla solo con superplastificante.



Leyenda de rutas	
	Ruta N° 1: Circulación mixer y bombona
	Ruta N° 2: Minicargador
	Ruta N° 3: Volquetes y cisterna
	Ruta N° 4: Volquetes desmonte
	Acceso peatonal

Leyenda de accesos	
	Ingreso N° 1: Mixer y bombona
	Ingreso N° 2: Volquetes y cisterna
	Ingreso N° 3: Peatones