



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR EN EL
SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN, ENFOCADO EN LOS IMPACTOS QUE
GENERAN LOS PROCESOS DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL
ACERO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN MAURICIO CALFULEO PICHINCURA

PROFESORA GUÍA:
MARLENA MURILLO SEGURA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN GUTIERREZ PINTO
JOSÉ SALVATIERRA GARRIDO

SANTIAGO DE CHILE
2023

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN, ENFOCADO EN LOS IMPACTOS QUE GENERAN LOS PROCESOS DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL ACERO

El trabajo de título presente tiene como finalidad estudiar la aplicación de la economía circular en el área de la construcción, enfocándose en los beneficios y desafíos que trae consigo su implementación, con el propósito de poner en práctica los conceptos que plantea la economía circular en el análisis de los procesos de reciclaje y reutilización del acero.

Se explora el concepto de economía circular en el contexto de la crisis ambiental que actualmente afecta al planeta, entendiéndolo como una solución para prevenir que se siga acrecentando el problema. Del mismo modo, se estudia la normativa que tenga relación con este concepto, notando que esta corresponde a una de las trabas para su diversificación y al mismo tiempo presentando una serie de oportunidades para lograr el fomento de su utilización.

Además, se describen los principales compromisos que se han tomado a nivel país para lograr la implementación de la economía circular, los que corresponden a la *Hoja de ruta RCD, economía circular en construcción 2035* y *Estrategia nacional de huella de carbono en el sector de la construcción*.

Siguiendo la misma línea se estudian los procesos de reciclaje y reutilización del acero, culminando en el estudio de la huella de carbono, la cual representa una herramienta útil para medir los beneficios que ambos procesos generan sobre el medio ambiente. Finalmente se plantea teóricamente una metodología a seguir para poder cuantificar esta huella de carbono en un proyecto enmarcado dentro del área de la construcción.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Economía circular en el área de la construcción	2
2.1. Desechos en la industria de la construcción	2
2.2. Modelo de producción actual	3
2.3. El concepto de economía circular	4
2.4. Aplicaciones de la economía circular en el sector de la construcción	6
3. Normativa relacionada a economía circular en el sector de la construcción	7
3.1. Situación Nacional	7
3.2. Situación Internacional	8
3.3. Compromisos nacionales en materia de sustentabilidad	10
3.4. Anteproyectos de norma	11
3.5. Certificaciones de sustentabilidad	12
3.5.1. Pasaporte de materiales	12
3.5.2. Certificación CES	12
3.5.3. BREEAM	16
3.5.4. DGNB System	18
3.5.5. LEED	21
3.5.6. Comparación de certificaciones	24
4. Reciclaje y Reutilización del acero	27
5. Huella de Carbono	32
5.1. Análisis de ciclo de vida (ACV)	33
5.2. Declaración ambiental de productos (DAP)	34
5.3. Estrategia nacional de Huella de carbono	36
6. Metodología para la cuantificación de la huella de carbono	38
6.1. Metodologías de referencia	38
6.1.1. Calculadora de CO_2 para hormigones - FICEM	38
6.1.2. ABACO Chile	39
6.1.3. Herramienta de cálculo y evaluación (CAT) de Level(s)	39
6.1.4. Desempeño ambiental de edificios, MPG	40
6.2. Bases de la metodología	45
6.3. Identificación de GEI a tomar en cuenta	46
6.4. Identificación de fuentes de emisión	46
6.5. Obtención de la información	47

6.6. Obtención de resultados	48
7. Impacto del acero en Economía Circular en la Construcción	49
8. Conclusiones	55
Bibliografía	58

Índice de Tablas

3.1.	Resumen de parámetros medidos en las certificaciones	24
7.1.	Acero producido por AZA y CAP y consumo aparente durante 2021 y 2022 (miles de toneladas)	53
7.2.	Impactos porcentuales de acero reciclado en el total de acero consumido y en los aceros largos (barras y perfiles)	54

Índice de Ilustraciones

2.1.	Contribución de emisiones de carbono de cada etapa del ciclo de vida de un edificio. Fuente: Stiebert S. et al 2019 ^[47]	4
2.2.	Diagrama “mariposa” que ilustra el concepto de economía circular. Fuente: Ellen MacArthur Foundation ^[21]	5
3.1.	Requerimientos obligatorios y voluntarios relacionados al aspecto: Materiales y residuos. Fuente: Manual de Evaluación y Calificación ^[12]	14
4.1.	Producción de aceros según procesos productivos. Fuente: WorldSteel.org	27
4.2.	Proceso productivo de acero en base a Altos Hornos y Hornos Eléctricos. Fuente WorldSteel.org	28
4.3.	Impactos ambientales de la producción de acero por Altos Hornos y Hornos Eléctricos. Fuente: WorldSteel.org	29
4.4.	Producción de acero en Chile según el tipo de proceso productivo. Fuente: ALACERO e información propia de ICHA	30
4.5.	Producción de acero total y a través de chatarra a nivel mundial. Fuente: WorldSteel.org	30
4.6.	Emisiones de CO2 producidas por importaciones de barras de acero. Fuente: ICHA	31
5.1.	Ciclo de vida en edificación. Extraído de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en los Edificios. GBCe ^[2]	34
5.2.	Ejes estratégicos y transversales de ENHCSC. Fuente: Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector de la Construcción ^[46]	37
7.1.	Consumo Aparente Nacional durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]	51
7.2.	Consumo Aparente Nacional de Aceros Largos durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]	52
7.3.	Consumo Aparente Nacional de Barras de Acero durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]	52
7.4.	Consumo Aparente Nacional de Perfiles de Acero durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]	53

Capítulo 1

Introducción

La industria de la construcción corresponde a uno de los principales motores en la economía de un país, debido a que afecta directamente a diversas áreas tales como ámbito laboral, energía, infraestructura, etc. Sin embargo, el área de la construcción corresponde también a uno de los sectores que más desechos genera, con alrededor de 1.700.000 Toneladas de residuos tan solo durante el año 2018^[36].

Considerando lo anterior, y la creciente crisis medioambiental que sufre actualmente el planeta, es que surge la necesidad de buscar soluciones sustentables, que contribuyan a disminuir el impacto negativo que la industria de la construcción tiene sobre el medioambiente.

Debido a esto, se plantea estudiar el uso de la economía circular dentro del sector de la construcción. Por sus características, la economía circular plantea no solo interferir en el proceso constructivo como puede ser mediante el uso de materiales reciclados o el uso de metodologías que disminuyan los desechos generados, sino que va más allá y busca generar cambios desde el diseño de una infraestructura, hasta que esta cumple con su vida útil.

Tomando en cuenta que el acero constituye a una de las principales soluciones constructivas en la fabricación de estructuras, y que es ampliamente utilizada en Chile, es que surge la necesidad de estudiar y valorizar los procesos de reciclaje y reutilización que se realizan sobre este, a modo de entender sus beneficios y generar valor agregado.

El objetivo principal del trabajo de título es estudiar la aplicación de la economía circular en la industria de la construcción, con el propósito de identificar las principales oportunidades que genera, así como las dificultades que supone su implementación. Además, se busca estudiar la forma de abordar el análisis de la huella de carbono, planteando de forma teórica una metodología que se pueda utilizar para la cuantificación de la huella de carbono, dentro del sector de la construcción.

Para lograr lo anterior, se utilizará una metodología centrada principalmente en recopilación bibliográfica acerca de economía circular y sus aplicaciones en la industria de la construcción. Además, se busca realizar un levantamiento de normativa que presenten enfoques de economía circular tanto a nivel nacional como a nivel internacional. Finalmente, se busca establecer una metodología que permita cuantificar indicadores ambientales, principalmente centrado en la huella de carbono.

Capítulo 2

Economía circular en el área de la construcción

El sector de la construcción corresponde a uno de los sectores más importante para el desarrollo de un país, debido a las altas tasas de empleabilidad que genera y el importante rol que juega ante el constante aumento poblacional, y la necesidad cada vez mayor de soluciones habitacionales.

Sin embargo, en el contexto de la crisis medioambiental que actualmente afecta al planeta, el sector de la construcción no tiene a su disposición un gran número de estrategias y/o modelos que permitan aminorar o anular los efectos negativos que este genera en el medio ambiente.

2.1. Desechos en la industria de la construcción

El sector de la construcción corresponde a una de las industrias que genera la mayor cantidad de residuos industriales no peligrosos a nivel nacional, superada únicamente por las Industrias manufactureras y los servicios de suministro de electricidad, gas y agua. Al mismo tiempo cuenta con una de las tasas más altas de consumo de materiales a nivel mundial ^[36]. Esto, debido a la gran cantidad y variedad de materiales que se necesitan al momento de construir una obra de infraestructura.

Los desechos generados en construcción son denominados comúnmente como Desechos de la Construcción y Demolición (RCD), y se refieren no solo a los desechos sólidos, sino a cualquier residuo que se puede generar producto de las actividades relacionadas directa o indirectamente con la construcción, como puede ser la extracción de materias primas y fabricación de materiales, los procesos de reconstrucción de infraestructura dañada y la demolición o deconstrucción.

Dentro de los problemas que existen con respecto a los RCD se encuentran principalmente la escasa información que existe alrededor de las cantidades de residuos que se generan, el escaso reciclaje o reutilización de residuos, la falta de normativa que regule su generación y tratamiento.

De acuerdo con el “*Informe del estado del medio ambiente*”, realizado por el Ministerio

del Medio Ambiente (MMA) en el año 2021 ^[36], existen datos oficiales que indican que se generan alrededor de 371.461 toneladas de residuos anualmente por efecto de la construcción, sin embargo, estimaciones realizadas por el MMA señalan que se generan aproximadamente 7 millones de residuos sólo por la construcción de casas y edificios, sin incluir otro tipo de infraestructura, o considerar los desechos provocados por concepto de reparación y/o demolición.

A lo anterior se le debe sumar el hecho de que una parte de los RCD son manipulados sin el tratamiento correspondiente y terminan siendo depositados en vertederos ilegales, sin la debida regulación. Actualmente existen alrededor de 3.735 sitios de disposición final ilegal a lo largo de Chile y aproximadamente un 20 % de los RCD no cuentan con un sitio legal para su disposición final, pues existen 7 regiones que no cuentan con sitios destinados a la disposición de RCD. ^[42]

Debido a esto, es que surge la necesidad de contar con planes de acción que regulen la generación de RCD y reduzcan o anulen los efectos negativos que estos tienen sobre el medio ambiente.

2.2. Modelo de producción actual

La principal razón por la cual se generan cifras tan elevadas de RCD es el modelo de producción en el cual actualmente se basa la industria de la construcción, el cual consiste en un modelo de producción lineal, centrado en extraer, producir, consumir y desechar.

En el caso de la construcción, incluso en la etapa de extracción de recursos, se producen grandes cantidades de residuos, debido a que una parte considerable de materiales son descartados del proceso de producción.

Sumado a lo anterior, se encuentran los desechos producidos por la construcción de la infraestructura, aquellos generados por el mantenimiento y reparación de esta y finalmente los desechos generados por la demolición. Todos estos residuos, bajo la lógica de producción lineal son destinados a sitios cuyo propósito es tener el menor impacto posible para el medio ambiente y la salud humanas.

Los residuos sólidos no son los únicos agentes contaminantes producidos por la construcción de un edificio, se debe tener en cuenta además la emisión de carbono que las distintas etapas del ciclo de vida de una infraestructura generan, los efectos negativos que estos tienen sobre el medio ambiente, y que estas no son consideradas por un modelo de producción lineal.

Dentro del ciclo de vida de un edificio, la etapa que más contribuye en emisiones de carbono es la fase de uso, que puede alcanzar cerca del 80 % de emisiones, tal como se puede apreciar en la Figura 2.1. Por otro lado, la fabricación de los materiales puede alcanzar cerca del 40 % de las emisiones totales y depende exclusivamente del tipo de material y del transporte utilizado para su distribución. Finalmente, las etapas de construcción y demolición son las que menor impacto tienen, en términos de emisiones de carbono.

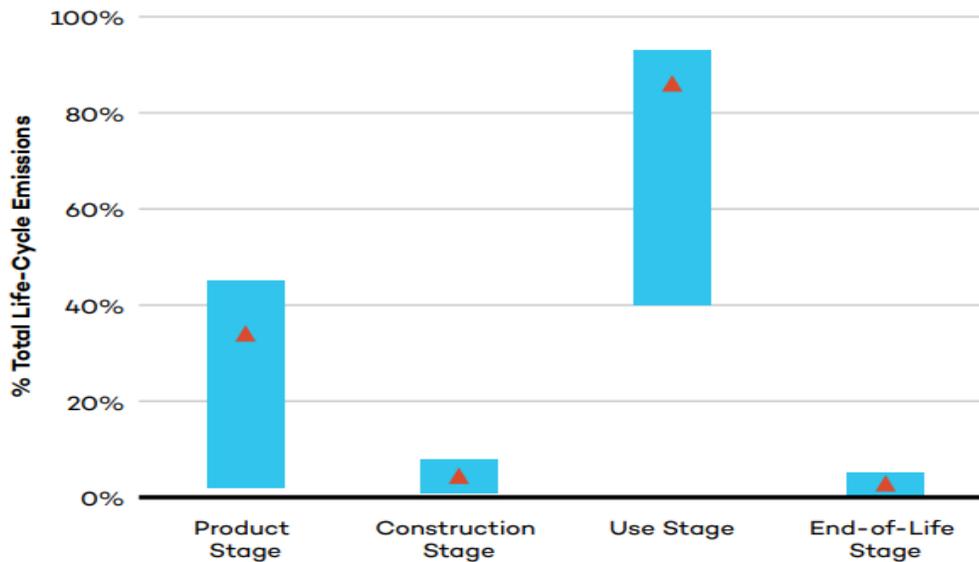


Figura 2.1: Contribución de emisiones de carbono de cada etapa del ciclo de vida de un edificio. Fuente: Stiebert S. et al 2019 ^[47]

Los efectos negativos que los residuos antes mencionados producen sobre el medio ambiente y la sociedad no son considerados por el modelo de producción y, por lo tanto, no se establecen medidas destinadas a reducir o compensar sus impactos.

Dentro de efectos negativos que se pueden asociar a la industria de la construcción producto de los desechos que esta genera, se encuentra la contaminación de suelos y agua, producto de un manejo inadecuado de los RCD, como es el caso de aquellos destinados a vertederos ilegales, la contaminación atmosférica que produce la emisión de carbono a lo largo del ciclo de vida de una infraestructura y su consecuente contribución a la emergencia climática que actualmente afecta al planeta.

Además de los efectos ambientales, la generación de RCD producto de la lógica del modelo lineal tiene consecuencias sociales que afectan directamente a la comunidad circundante de los sitios de disposición final y especialmente a aquellas cercanas a vertederos ilegales, en donde la disposición irregular de los residuos tiene impactos sanitarios, visuales y económicos en la comunidad, provocando la pérdida de plusvalía del sector ^[15].

2.3. El concepto de economía circular

En contraposición al modelo de producción lineal, surge el concepto de economía circular, que gira en torno a cambiar la concepción que actualmente existe con respecto a la generación de productos y servicios, buscando tener el menor impacto posible sobre el medio ambiente, minimizando la cantidad de residuos generados y reparando el daño producido sobre los ecosistemas.

Dentro de las variadas definiciones que existen, destaca la realizada por *Ellen MacArthur Foundation* ^[22] que plantea tres pilares fundamentales para el correcto desarrollo de la economía circular, los cuales son: Diseño sin emisiones de residuos y contaminación, circularidad

de materiales y productos existentes y regeneración de la naturaleza.

El primer pilar, plantea la eliminación de los desechos y la contaminación utilizando el diseño como la principal herramienta para lograrlo, disminuyendo la generación de residuos y aprovechando aquellos que se generen, reintroduciéndolos en el flujo de producción y de esta forma eliminando el concepto de “desechos”.

El segundo pilar, consiste principalmente en mantener a los materiales dentro del ciclo productivo, ya sea dentro de su mismo ciclo, reutilizándolos como parte del ciclo productivo de otros productos, o en última instancia reciclándolos como materiales primarios. Cabe mencionar que el reciclaje es el último proceso por considerar pues significa que parte del valor de los productos se pierde.

Finalmente, el tercer pilar tiene como propósito evitar la degeneración del medio ambiente, no solo empleando medidas protectoras hacia este, sino que también buscando mejorarlo, reincorporando nutrientes al ecosistema, fomentando el uso de energías renovables, etc.

La Figura 2.2 ilustra el concepto de economía circular utilizando un diagrama de mariposa, colocando a un lado los ciclos biológicos y en otro los ciclos técnicos, aplicando en cada uno de ellos los pilares mencionados anteriormente. Para el caso del ciclo biológico se considera recursos renovables, que pueden ser reintroducidos al ecosistema. En el caso del ciclo técnico, se centra en el diseño de los materiales para que estos puedan ser reutilizados y reciclados al final de su vida útil, evitando que estos sean convertidos en desechos.

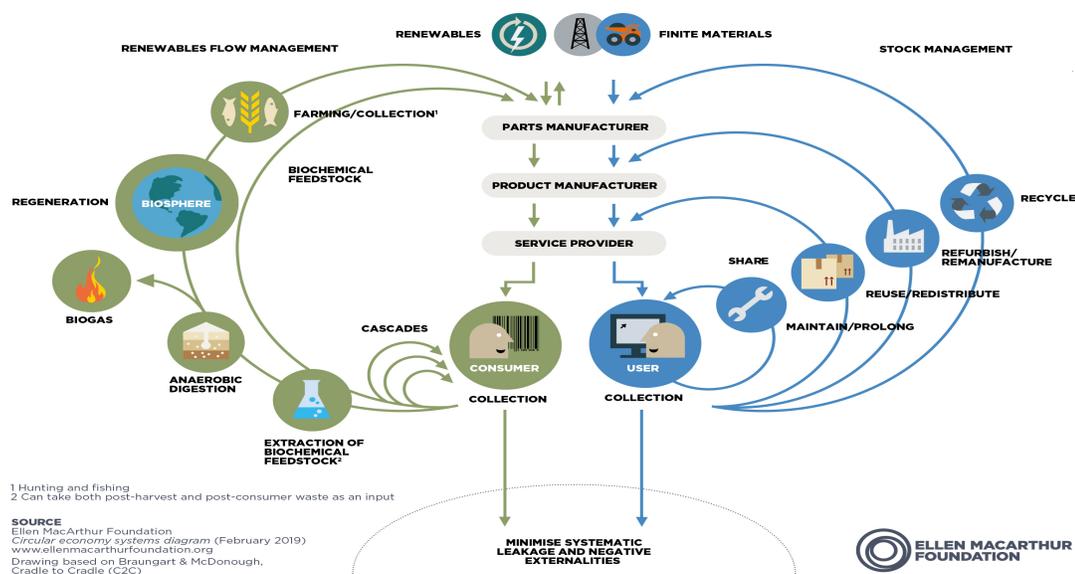


Figura 2.2: Diagrama “mariposa” que ilustra el concepto de economía circular. Fuente: Ellen MacArthur Foundation [21]

De esta forma, la implementación de la economía circular como modelo de producción dentro de la sociedad, traería consigo una disminución en la cantidad de desechos generados, revalorización de los productos existentes al permanecer más tiempo dentro del proceso productivo, una ampliación del mercado productivo, con materiales innovadores y amigables

con el medio ambiente, en otros beneficios.

2.4. Aplicaciones de la economía circular en el sector de la construcción

Las aplicaciones de la economía circular en la construcción son variadas y se pueden aplicar a lo largo de todas las etapas que involucran el ciclo de vida de una infraestructura. El impacto que generen sobre el medio ambiente dependerá de la etapa en la cual se incida, en donde la etapa de diseño tiene especial importancia, debido a que por medio de esta es posible aplicar técnicas de construcción modular, la utilización de materiales reutilizados/reciclados, implementación de energías renovables, diseño adaptable que permita cambiar el uso de la infraestructura en caso de ser necesario, entre otros.

Dentro de la amplia gama de metodologías que actualmente existen sobre de la aplicación de la economía circular, se encuentra la planteado por Ellen MacArthur Foundation en el informe “Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe” del año 2015 ^[20] denominada “*ReSOLVE framework*” y que se centra en las siguientes conceptos:

- **Regenerar:** Consiste en la regeneración de energías y materiales para lograr la recuperación de los ecosistemas.
- **Compartir:** Maximización de productos por medio de compartirlos con otros usuarios, reutilizándolos dentro de su periodo de vida.
- **Optimizar:** Incrementar la eficiencia de un producto prolongando su vida útil y eliminando los desechos dentro de su proceso productivo.
- **Repetir:** Mantener los materiales dentro de un ciclo cerrado utilizando, por ejemplo, procesos de reciclaje.
- **Virtualizar:** Reemplazar servicios o productos físicos por virtuales.
- **Intercambiar:** Reemplazar recursos y materiales que se hayan quedado obsoletos, con alternativas renovables y más tecnológicas.

La incorporación de uno o varios de estos conceptos planteados por esta metodología dentro de la industria de construcción permitiría la transición del modelo de producción lineal actual a un modelo circular, trayendo consigo una diversificación del mercado de materiales, generando nuevas oportunidades de negocio con características circulares e innovadoras y claramente una reducción en la generación de desechos y los efectos negativos que estos tienen sobre el medio ambiente.

A pesar de lo anterior, una transición hacia una economía circular presenta una gran cantidad de desafíos que dificultan y entorpecen esta transición. Dentro de los principales desafíos se encuentra la falta de información acerca de los materiales reciclados, falta de incentivos para realizar construcciones modulares o materiales sustentables, falta de normativa asociada a temas de circularidad, sustentabilidad y regulación de desechos, entre otros. ^[16]

Capítulo 3

Normativa relacionada a economía circular en el sector de la construcción

Como se mencionó anteriormente, uno de los grandes desafíos que enfrenta la transición de un modelo de producción lineal a uno circular es la falta de normativa y regulación en materia de sustentabilidad. Más aún, con respecto a RCD no existe normativa que regule su generación y tratamiento.

Debido a lo anterior es que realiza el siguiente levantamiento acerca de normativa que involucre a economía circular en la industria de la construcción, en donde se incluye situación nacional e internacional, así como compromisos y líneas de acción que ha adoptado el país para contribuir a contrarrestar el cambio climático.

3.1. Situación Nacional

En el ámbito nacional, la legislación relacionada a economía circular es poca y aquellas leyes que si incluyen conceptos circulares, no son aplicables a la industria de la construcción. Dentro de las legislaciones que si contemplan aspectos de circularidad, es posible notar que el impacto que generan es poco, debido a que se centran en las etapas finales de los ciclos de vida de los productos (principalmente reciclaje).

Más aún, es posible encontrar legislación que va en contra de los principios de circularidad, prohibiendo el uso de materiales reciclados como puede ser el caso de aquellas referidas a áridos y asfalto. De lo anterior, “se desprende que no existe en Chile normativa que genere la motivación suficiente para el desarrollo de innovación y que permita ejecutar acciones de EC en la construcción” (Ramos et al., en edición) ^[44].

Una de las leyes que abarca conceptos de circularidad es la Ley 20.920/2016 “Ley de responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje”, más comúnmente conocida como Ley REP. Como su nombre lo indica, esta ley impone obligaciones adicionales a los productores de ciertos productos, de forma tal que sean ellos quienes se responsabilicen por la gestión de los residuos que se generen a partir de sus productos.

La ley actualmente tiene un alcance acotado a ciertos productos que se clasifican como *prioritarios*, por su consumo, daño sobre el medio ambiente, consumo y factibilidad para ser

revalorizados, ninguno de estos productos corresponde a materiales utilizados en la industria de la construcción. Dentro de los productos que son definidos como prioritarios se encuentran los aparatos eléctricos y electrónicos, pilas, neumáticos, baterías, envases y embalajes, diarios y revistas y finalmente aceites y lubricantes. [33]

Por otro lado, está la Ley 21.305/2021 “Ley de eficiencia energética” que busca promover el uso eficiente de los recursos energéticos, de forma tal que se pueda alcanzar la carbono neutralidad al año 2050. En conjunto con la ley está el Plan Nacional de Eficiencia Energética, que busca establecer un marco para poder alcanzar las metas antes mencionadas.

Dentro de los objetivos que tiene el Plan está el establecimiento de estándares mínimos para artefactos, además de establecer una calificación energética para edificaciones de todo tipo, para poder obtener la recepción final. Además, dicha calificación deberá cumplir con los estándares mínimos que defina la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, y deberá ser incluida en cualquier publicidad de venta que se realice [37].

En cuanto a RCD, es posible encontrar la norma NCh3562of2019, “Gestión de residuos - Residuos de construcción y demolición (RCD) - Clasificación y directrices para el plan de gestión”, que busca establecer las bases para la creación de un plan de gestión de RCD para una determinada obra de construcción, además de realizar una clasificación para los distintos RCD que se pueden encontrar.

Si bien esta norma plantea un enfoque de economía circular, “Su alcance, sin embargo, no incorpora la dimensión integral de la economía circular como concepto no diferencia Reducción, Reutilización y Reciclaje (RRR), una distinción importante que pone énfasis en la etapa de diseño.” (Ramos et al, 2021) [43]. Por lo que, a pesar de ser un gran avance en materia de gestión de RCD, no es suficiente para lograr un impacto positivo en el medio ambiente.

A pesar de lo anterior, existen muchas oportunidades de crear legislación con enfoque circular. En el artículo “Políticas para la implementación de una estrategia circular en la construcción” del investigador Felipe Ossio [44], se plantea una serie de estrategias que se pueden implementar en materia de circularidad, ya sea incidiendo en la normativa actual, como creando nuevas legislaciones.

Entre las estrategias planteadas se encuentra, por ejemplo, premiar licitaciones públicas que utilicen materiales circulares, exigir la incorporación de un porcentaje de materiales circulares para obtener permisos de construcción, implementar impuestos a la extracción de ciertos recursos naturales y a la generación de RCD, entre otros.

3.2. Situación Internacional

En el ámbito internacional la legislación acerca de economía circular está mucho más avanzada en comparación a lo que se puede observar en Chile. Particularmente, en el caso de China se ha estado incluyendo el concepto de economía circular desde aproximadamente el año 2003, mucho antes de que haya sido considerado por la Unión Europea o los países latinoamericanos.

Un aspecto importante para considerar de los distintos sistemas legislativos y los planes de acción desarrollados por la mayoría de los países, es la creación de indicadores y sistemas de monitoreo para medir el avance en la implementación de la economía circular.

En lo que respecta a la Unión Europea, existe un sistema de indicadores separado en tres grandes áreas: producción y consumo, gestión de residuos e investigación, desarrollo e innovación. El primer grupo está centrado principalmente en medir el consumo de materiales y recursos, en conjunto con la cantidad de desperdicios que se generan. Por otro lado, la gestión de residuos busca establecer las tasas de reutilización y de reciclaje de los distintos desechos producidos por las industrias.

Finalmente, los indicadores agrupados en investigación, desarrollo e innovación tienen como objetivo medir la cantidad de materiales sostenibles que son incorporados en las industrias, además de las distintas patentes que se puedan generar producto de la gestión sustentable de residuos y desechos.

China por otro lado, tiene un sistema mucho más amplio para indicadores, que se pueden separar de acuerdo con el sistema productivo al que se aplican (nacional, municipal o a nivel de una sola empresa). Además, es posible agrupar los indicadores en cuatro categorías distintas, dependiendo de los valores que se están midiendo: Eliminación de residuos y emisión de contaminantes, tasa de producción de recursos, tasa de consumo de recursos y tasa de utilización integral de recursos (en donde se incluyen los procesos de reciclaje y reutilización) [8].

Finalmente, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés), cuenta con un sistema propio de indicadores agrupados en 5 categorías: negocios y economía, medio ambiente, infraestructura y tecnología, empleos y finalmente gobernanza. La mayor cantidad de indicadores definidos por la OECD se centran en las categorías de medio ambiente y gobernanza, en donde se cubren aspectos relacionados al medio ambiente, emisiones de contaminantes, procesos productivos, además de educación, capacidad de construcción y regulación, entre otros [41].

En cuanto a normativa, la UE cuenta con una serie de planes de acciones que involucran la intervención de la legislación para lograr la incorporación de la economía circular. El más reciente de ellos corresponde al “Nuevo Plan de acción para la economía circular, por una Europa más limpia y más competitiva” publicado durante el año 2020 [13].

En él se plantea una serie de medidas que incluyen la intervención del marco normativo para fomentar la creación de productos sostenibles y la circularidad en los procesos de producción, cambios en la cadena de valor de ciertos productos clave como son los electrónicos, baterías y vehículos, envases y embalajes, entre otros. Además de los ya mencionados planes de seguimiento para medir la evolución de la transición hacia la economía circular.

Por otro lado, la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas [48], contiene una visión clara sobre el tratamiento de residuos. Se define una jerarquía para la gestión de residuos en donde encabeza la prevención, seguida de preparación para reutiliza-

ción, reciclaje, otro tipo de valorización y finalmente la eliminación.

La Directiva plantea también la posibilidad de que los estados puedan aplicar la responsabilidad extendida del productor en los casos en que se cuente con la viabilidad técnica y económica para realizarla.

Finalmente, en el caso de China, existe una amplia gama de normativas referentes a economía circular, debido a la temprana incursión del país en esta materia. Dentro de las leyes que más destacan se encuentra la Ley de Promoción de la Economía Circular de la República Popular de China, promulgada en el año 2009 ^[45], en donde se establecen las bases para la inserción de la economía circular en la sociedad.

La ley establece una clara distinción entre reducir, reutilizar y reciclar, además de promover incentivos para la aplicación de la economía circular y el fomento a la innovación para la creación de materiales sustentables.

3.3. Compromisos nacionales en materia de sustentabilidad

Al igual que la Unión Europea y China, Chile cuenta con un plan de acción para la implementación de la economía circular y de esta forma alcanzar la carbono neutralidad. El plan en cuestión corresponde a la “Hoja de Ruta para un Chile circular al 2040”, desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente.

Dentro de las metas que establece la Hoja de Ruta, se encuentra la generación de empleos, la disminución de residuos sólidos por habitante y el total de residuos por PIB, el aumento en la productividad de material, tasa general de reciclaje, y tasa de reciclaje de residuos sólidos municipales, además de la recuperación de sitios afectados por disposición ilegal de residuos. Todas estas metas tienen una cifra objetivo para el año 2030 y el año 2040 ^[34].

Para alcanzar estas metas, se plantean una serie de iniciativas agrupadas en 4 ejes de acción distintos: innovación circular, cultura circular, regulación circular y territorio circular. Todos ellos enfocados en generar los cambios necesarios dentro la industria, la sociedad y el gobierno para poder concretar la transición a la circularidad.

Por otro lado, existe una Hoja de ruta centrada exclusivamente en la industria de la construcción, denominada “Hoja de Ruta RCD, economía circular en construcción 2035”, desarrollado por Construye 2025 durante el año 2020 ^[14]. La cual está centrada principalmente en cinco ejes estratégicos que se mencionan a continuación.

- Planificación territorial e infraestructura para la gestión de los RCD y la economía circular.
- Coordinación pública para el marco regulatorio y fomento a la economía circular en construcción.
- Ecosistemas y cadena de valor para mercados de economía circular en construcción.

- Información e indicadores para el desarrollo de mercados, políticas públicas e innovación.
- Restauración de pasivos ambientales y de riesgos.

Para cada uno de estos ejes estratégicos, se plantea una serie de acciones a realizar para cada uno de los actores participantes, además de metas exclusivas de cada eje para los años 2025 y 2035.

La hoja de ruta RCD para el sector de la construcción, se construye bajo ocho principios, destinados a establecer las directrices de trabajo en la implementación de la hoja de ruta. Dentro de estos principios se encuentra en primer lugar el *Gradualismo*, en donde se reconoce que los cambios y exigencias se deben implementar de forma gradual, para dar margen a las empresas y al mercado a adaptarse.

El segundo principio corresponde a *Colaboración multisectorial*, que busca lograr la participación de todos los agentes de la sociedad en iniciativas que involucren temas de sustentabilidad en el sector de la construcción. Por otro lado, *Inclusión, participación y transparencia* en sintonía con el principio anterior, busca que las iniciativas que se propongan se realicen con transparencia y logren la difusión necesaria.

El resto de los principios corresponden a *Velar por el bien común, fomento a colaboración para mejorar la competitividad, innovación y emprendimiento, modernización hacia una economía circular, fomento al fortalecimiento regional y local* y finalmente *racionalidad y responsabilidad ambiental*.^[14]

3.4. Anteproyectos de norma

Actualmente se encuentran en proceso de anteproyecto una serie de normas encargadas por el Ministerio del Medio Ambiente al Instituto Nacional de Normalización centradas en economía circular para el sector de la construcción. Con esto se busca establecer las bases de la circularidad para la construcción, estableciendo un marco conceptual y un lenguaje común para el desarrollo de futuras normas.

Como se puede observar en el listado de normas descrito a continuación. El objetivo es abarcar todo el ciclo productivo y de vida de un proyecto de construcción, desde los materiales, sistemas constructivos e infraestructura, hasta el diseño de barrios y ciudades con enfoque circular.

1. **prNCh3835** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Vocabulario y marco de referencia para atributos e indicadores de circularidad.
2. **prNCh3836** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Materiales, productos y elementos de construcción
3. **prNCh3837** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Sistemas constructivos
4. **prNCh3838** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Planificación y diseño de proyectos de edificación e infraestructura

5. **prNCh3839** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Construcción de proyectos de edificación e infraestructura
6. **prNCh3840** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Planificación y diseño de barrios y entornos construidos
7. **prNCh3841** - Economía circular - Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular - Planificación, diseño y operación de ciudades circulares

3.5. Certificaciones de sustentabilidad

Dentro de la normativa existente que tiene relación con la economía circular, se encuentran las certificaciones de sustentabilidad que están destinadas a medir el comportamiento ambiental de un determinado producto o material utilizado y producido por la industria de la construcción.

Es por esto que se describirán las principales certificaciones de sustentabilidad existentes hoy en día tanto a nivel nacional como internacional. Con el objetivo de detectar aquellos impactos ambientales que no están siendo considerados a día de hoy y la forma en la que estos se pueden medir. Para el caso de certificaciones internacionales se recurrirá a algunas de las certificaciones mencionadas por *World Green Building Council* ^[50].

3.5.1. Pasaporte de materiales

La primera certificación corresponde al pasaporte de materiales, y se encuentra creado por Green Building Council Chile y el Centro Tecnológico para la Innovación en la Construcción (CTEC). Se trata de una serie de documentos que buscan almacenar la información técnica, de sustentabilidad, toxicidad y circularidad de los distintos materiales que son utilizados durante la construcción de un edificio.

De acuerdo con la plataforma web de Pasaporte de Materiales ^[27], la base de datos que se crea con estos documentos puede ser consultada libremente por las empresas que se encuentren inscritas en dicha plataforma. Los datos disponibles abarcan todo el ciclo de vida del material correspondiente, tales como composición química, consumo de agua y energía durante su producción, la capacidad que tienen estos materiales para ser reciclados, su huella de carbono, etc.

Lo anterior contribuye a mejorar la gestión sustentable de las empresas, de forma tal que se incentiva el uso de materiales reciclables y se reduce la generación de desechos. Del mismo modo, se crea un incentivo en los productores para generar materiales más sustentables.

3.5.2. Certificación CES

La Certificación Edificio Sustentable (CES) corresponde a la principal certificación de sustentabilidad para edificios que existe hoy en día en Chile, permite evaluar el comportamiento ambiental de un edificio por medio del cumplimiento de una serie de requerimientos que se separan en obligatorios y voluntarios. Mientras más requerimientos cumpla el edificio, mejor será el puntaje obtenido en la certificación.

Cabe mencionar que la certificación se aplica únicamente para edificios de uso público, sin importar si su administración es pública o privada. De acuerdo con el Manual de Evaluación y Calificación ^[12], los edificios de uso público se definen como “construcciones destinadas a complementar las funciones básicas de habitar, producir y circular, cualquiera sea su clase o escala”, acotando esta definición para edificios destinados a educación, salud, servicios (incluyendo oficinas habitadas y del tipo planta libre), seguridad y social.

Para la realización de la certificación, se acude a una tercera parte que no se encuentre involucrada con el edificio en cuestión, de forma tal que exista imparcialidad y transparencia al momento de evaluar el cumplimiento de los requerimientos de la certificación.

El proceso de certificación se encuentra dividido en tres etapas, dos de ellas son de carácter voluntario; *Precertificado*, que se realiza una vez que el diseño se encuentra terminado; *Certificado*, correspondiente al proceso obligatorio y se realiza una vez el edificio se encuentra construido; y *Sello Plus Operación*, en donde se evalúa la gestión durante la fase de operación del edificio.

Para obtener la certificación, es necesario que el edificio cuente con la recepción municipal o la recepción provisoria realizada por el MOP para el caso de edificios con uso de seguridad. Además de contar con el puntaje suficiente en el Informe de Evaluación para obtener la certificación de menor nivel.

Los distintos grados de certificación que se puede alcanzar se basan en el puntaje que se obtiene al momento de realizar la certificación. El puntaje máximo es de 100 puntos, mientras que el mínimo para obtener una certificación corresponde a 30 puntos. Para alcanzar estos 30 puntos es necesario cumplir con todos los requerimientos obligatorios más algunos requerimientos voluntarios.

Los grados de certificación, dependiendo de la cantidad de puntos obtenidos son; *Certificado*, con 30 a 54,5 puntos; *Certificación Destacada*, con 55 a 69,5 puntos; y *Certificación Sobresaliente*, con 70 a 100 puntos.

Durante la evaluación se estudian 4 categorías que engloban gran parte del ciclo de vida de una estructura: Diseño pasivo (Arquitectura), Diseño de sistemas activos (Instalaciones), Construcción y Operación. Del mismo modo, el análisis separa las variables a estudiar en seis aspectos distintos: 1. Calidad del Ambiente Interior, 2. Energía, 3. Agua, 4. Materiales y residuos, 5. Gestión y 6. Innovación.

Con el propósito de comparar esta certificación con otras extranjeras, se describirán a continuación los aspectos relevantes a esta memoria, es decir, materiales y residuos, el resto de los aspectos evaluados en la certificación se escapan del alcance de la memoria.

Aquellas variables evaluadas relacionadas a Materiales y residuos son las siguientes: 08 ARQ. M&R Declaración Ambiental de Productos, 09 M&R Residuos en Operación y 10 CONST. M&R Gestión de Residuos. Los requerimientos obligatorios y voluntarios se muestran en la Figura 3.1 la cual corresponde a un extracto del cuadro resumen mostrado en el Manual de Evaluación y Calificación ^[12].

	Variable	Requerimientos obligatorios		Requerimientos voluntarios con puntaje	
ARQ. Agua	ARQ. Agua 7 Paisajismo	7R	Reducción de la evapotranspiración del proyecto paisajismo	7.	Disminución de la evapotranspiración
ARQ. & CONST. Materiales y Residuos	08 ARQ. M&R Declaración Ambiental de Productos		N/A	8.	Declaración Ambiental de Productos (DAP) para materiales del edificio
	09 ARQ. M&R Residuos en Operación		N/A	9.	Equipamiento para el manejo de residuos durante la operación del edificio
	10 CONST. M&R Gestión de Residuos	10R1	Medidas de control y mitigación	10.	Separación, control y reciclaje de residuos generados durante la construcción
10R2		Declaración de generación de residuos construcción			

Figura 3.1: Requerimientos obligatorios y voluntarios relacionados al aspecto: Materiales y residuos. Fuente: Manual de Evaluación y Calificación ^[12]

El primer requerimiento obligatorio asociado a Gestión de residuos corresponde a *Medidas de control y mitigación*. Tal como se indica en la Figura 3.1 este requerimiento se aplica únicamente para la etapa de construcción. Para su cumplimiento es necesario contar con un **Plan de gestión de residuos durante construcción** previo al inicio de la construcción y alineado a lo que se describe en la norma NCh3562.

En resumen, este plan debe considerar al menos: la verificación de la existencia de materiales peligrosos en el terreno de construcción y pasos a seguir para su eliminación. Proyección de residuos que se pueden generar durante la construcción y previa demolición. Descripción de la gestión a realizar para tratar estos residuos, indicando lugares de acopio, retiro y disposición final. Y finalmente identificación de responsables de aplicación del plan y labores de limpieza.

En cuanto a la etapa de construcción, es requerimiento que se ejecute el plan antes mencionado y además se lleve un registro mensual de dicha ejecución. Se debe llevar además el registro de los residuos generados mensualmente, indicando las cantidades (kg o m³) de cada uno de ellos, durante todo el periodo de construcción. Cabe mencionar que el reciclaje no se incluye como requisito obligatorio para el plan de gestión.

Por otro lado, el segundo requerimiento obligatorio denominado *Declaración de genera-*

ción de residuos de construcción va de la mano con lo mencionado anteriormente, pues para su cumplimiento es necesario informar los residuos que fueron generados (m^3/m^2) durante toda la etapa de construcción. La cifra anterior debe ser informada respecto a la superficie total construida (sin contar estacionamientos y pisos mecánicos).

En cuanto a los requerimientos voluntarios, es posible encontrar un requerimiento para cada variable asociada al aspecto Materiales y residuos.

El primero de los requerimientos voluntarios corresponde a *Declaración Ambiental de Productos (DAP) para materiales del edificio*. Esta declaración debe estar basada en la norma internacional ISO 14025:2012 (Etiquetas de tipo III), es decir, es necesario realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Existen dos opciones para la cantidad de DAPs que se deben presentar para cumplir con este requerimiento, en ambos casos los materiales deben estar permanente instalados en la estructura y deben contar con una etiqueta ambiental tipo III.

En la primera opción se otorga puntaje en base a la cantidad de materiales que cuentan con DAP, de esta forma con una cantidad de 10 a 15 materiales con DAP se obtiene 1 punto, con 15 a 20 se obtienen 2 puntos y con sobre 20 materiales con DAP se obtiene el puntaje máximo de 3 puntos. Para la segunda opción es necesario que al menos el 20 % de los materiales del Presupuesto de Materiales del edificio cuenten con DAP, en esta opción solo es posible obtener una cantidad de 2 puntos.

El segundo requerimiento voluntario se denomina *Equipamiento para el Manejo de Residuos durante la operación del edificio*. Tal como nombre lo indica, para cumplir con este requerimiento es necesario contar con equipamiento que permita el depósito y la separación de los residuos durante la fase de operación del edificio. Para verificar el cumplimiento se debe indicar una proyección un volumen de residuos generados, de forma tal que las instalaciones sean capaces de satisfacer estas estimaciones.

Se menciona además que la separación de residuos debe considerar: papeles y cartones, plásticos reciclables, metales y latas, vidrios, cartón para bebidas, residuos electrónicos, desechos peligrosos y, residuos no reciclables y no peligrosos. Para el caso de edificios en altura, estos deben contar con closets ecológicos en cada piso, además del espacio de almacenamiento general.

Finalmente, el último requisito voluntario relacionado a Materiales y residuos se denomina *Gestión de Residuos: Separación, control y reciclaje*, este requisito también se aplica únicamente para la fase de construcción del edificio. Dentro de los requisitos que se deben cumplir se encuentra la separación de los residuos en tóxicos y peligrosos, domiciliarios e inertes.

Además, debe existir un adecuado control de estos residuos, contando con certificados en donde se refleje que fueron depositados en lugares autorizados. Finalmente, se incluye como requerimiento el reciclaje de al menos el 50 % del volumen total de residuos y/o escombros retirados. En caso de que se consideren únicamente materiales de construcción este porcentaje debe ser de al menos el 20 %.

Sumado a lo anterior, existe un requerimiento voluntario adicional relacionado al aspecto

de Energía, el cual corresponde a *Huella de carbono en operación*. Este requerimiento consiste en la declaración de una disminución en las emisiones de CO₂ durante la fase de operación del edificio, considerando un edificio de referencia.

Para determinar las emisiones de CO₂, el manual detalla un procedimiento a seguir, comenzando por estimar la cantidad de energía consumida (eléctrica y combustibles), tanto del edificio de referencia como del edificio en estudio. Posteriormente se debe determinar el consumo de energía primaria y finalmente determinar las emisiones de CO₂ equivalente utilizando factores de conversión declarados por el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Energía. De esta forma, se comparan y demuestran que existe una reducción en las emisiones de CO₂.

3.5.3. BREEAM

Por sus siglas en inglés Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) es una certificación originaria de Reino Unido que con el tiempo ha sido implementada y adaptada localmente a una gran cantidad de países. Creada en 1990, BREEAM corresponde a la primera certificación de sustentabilidad para edificios.

Dentro de los objetivos que tiene BREEAM se encuentra el fomento al mercado de edificios con bajo impacto ambiental, lograr la incorporación de buenas prácticas ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de un edificio, definir estándares que superen a lo que se exige actualmente en la normativa, promover soluciones innovadoras que tengan poco impacto ambiental, entre otros.

Para determinar el comportamiento del edificio, la certificación cuenta con seis niveles de certificación los que dependen del puntaje porcentual que obtiene la estructura. Esta clasificación corresponde a: Sobresaliente con un puntaje $\geq 85\%$, Excelente con $\geq 70\%$, Muy Bueno con $\geq 55\%$, Bueno con $\geq 45\%$, Aprobado con $\geq 30\%$ y Desclasificado con $< 30\%$.

Al igual que gran parte de las certificaciones actuales, BREEAM cuenta con una gran cantidad de métodos de evaluación, dependiendo del edificio que está siendo evaluado, es decir, edificaciones nuevas, existentes, comunidades y reforma y acondicionamiento. Para efectos de esta memoria y considerando el resto de las certificaciones aquí expuestas se describirá el método descrito en BREEAM International New Construction Version 6 ^[7] publicado durante el año 2021.

De esta forma, los criterios que se describen dicho documento se encuentran agrupados en 10 ámbitos temáticos los cuales son:

1. *Gestión* en donde se estudia: resumen y diseño del proyecto, costo del ciclo de vida y servicios de planificación, prácticas de construcción responsable, puesta en marcha y entrega y, finalmente el cuidado por los convalecientes.
2. *Salud y bienestar* en donde se evalúa: confort visual, calidad del aire interior, contención segura en laboratorios, comodidad térmica, rendimiento acústico, accesibilidad, peligros, espacios privados y calidad del agua.
3. *Energía* que estudia: reducción en el uso de energía y de las emisiones de carbono, moni-

toreo de energía, iluminación exterior, diseño bajo en carbono, almacenamiento en frío energéticamente eficiente, sistemas de transporten energéticamente eficiente, sistemas de laboratorio energéticamente eficientes, equipos de eficiencia energética, espacios de secado y respuesta flexible ante la demanda.

4. *Transporte* que evalúa: accesibilidad del transporte público, proximidad a instalaciones, medios de transporte alternativo, capacidad máxima de estacionamiento de automóviles, planes de viaje y oficinas en casa.
5. *Agua* en donde se estudia el: consumo de agua, monitoreo de agua, detección de fugas de agua y equipos eficientes en agua.
6. *Materiales* que considera: impactos del ciclo de vida, paisajismo y protección de límites, abastecimiento responsable de materiales, aislamiento, diseño para durabilidad y resiliencia y, finalmente eficacia del material.
7. *Desechos* en donde se evalúa: gestión de residuos de construcción, áridos reciclados, residuos operativos, acabados especulativos de pisos y techos, adaptación al cambio climático y adaptabilidad funcional.
8. *Uso de la tierra y ecología* que evalúa: selección del sitio, valor ecológico del sitio y protección de sus características ecológicas, minimización del impacto en la ecología del sitio existente, mejoría de la ecología del sitio e impacto al largo plazo de la biodiversidad.
9. *Contaminación* cuyos criterios de estudio son: impacto de la refrigeración, emisiones de NOx, escorrentía de aguas superficiales, reducción de la contaminación lumínica nocturna y contaminación acústica.
10. *Innovación*

Los criterios que guardan relación con los temas tratados en esta memoria son: Man 02 - Costo del ciclo de vida y servicios de planificación, Ene 01 - Reducción del uso de energía y de las emisiones de carbono, Mat 01 - Impactos del ciclo de vida, Wst 01 - Gestión de residuos de construcción, Wst 02 - Áridos reciclados y Wst 03 - Residuos Operativos. Considerando esto, se entregará una breve descripción de cada uno de ellos.

El primer criterio *Man 02 - Costo del ciclo de vida y servicios de planificación* busca fomentar el uso del ciclo de vida para poder mejorar el diseño, el mantenimiento y la operación a lo largo de la vida útil del edificio. Para esto la evaluación se separa en: costo del ciclo de vida elemental, costo del ciclo de vida a nivel componente e informe de costos de capital. Cada uno de estos criterios tiene un puntaje y una lista de requerimientos propios que se deben cumplir.

En cuanto a *Ene 01 - Reducción del uso de energía y de las emisiones de carbono* en donde se buscan mejoras en el rendimiento energético por encima de lo establecido en la normativa, en el consumo de energía primaria y las emisiones de CO2. Además, se busca poder predecir el consumo de energía operativa durante el uso y con esto promover el monitoreo y la gestión de riesgos durante la construcción. Para lograr este estudio, el criterio se subdivide el análisis en: 1. Rendimiento energético, con dos posibles rutas de estudio: uso de software de cálculo de energía de edificios y ruta básica con características de diseño energéticamente eficientes, 2. Predicción del consumo energético operativo y 3. Criterios de nivel ejemplar.

El criterio *Mat 01 - Impactos del ciclo de vida* tiene que ver con el fomento en el uso de herramientas que permitan la evaluación del ciclo de vida y en consecuencia el uso de materiales con bajo impacto ambiental, a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio. Para el estudio de este criterio se exige el uso de alguna herramienta de evaluación de ciclo de vida para medir el impacto ambiental de al menos los elementos de construcción obligatorios que se indican en la sección “Alcance de la evaluación de materiales” de la calculadora BREEAM International.

Por otro lado, el criterio *Wst 01 - Gestión de residuos de construcción* en donde se busca promover la eficiencia de los recursos mediante una correcta gestión de los residuos de construcción. Para esto el estudio se divide en dos partes: Reducción de residuos en construcción y desvío de recursos del vertedero. En el primer criterio se debe minimizar los residuos peligrosos y no peligrosos, monitorear la cantidad de desechos y cumplir con los objetivos de reducción de desechos que se producen en la construcción. El segundo criterio establece cantidades de residuos producto de construcción y demolición que deben ser enviadas a disposición final en base al peso y volumen de estos.

El criterio *Wst 02 - Áridos reciclados* apunta al fomento en el uso de áridos reciclados y secundarios, de forma tal que se pueda disminuir la demanda por el material primario. Para lo anterior, las verificaciones que se deben realizar tienen relación con: el uso de al menos el 25 % de agregados provenientes de materiales secundarios o reciclados (porcentaje medido en peso o volumen) y, el origen de los agregados debe ser de: residuos de construcción, demolición y excavaciones obtenidas fuera del sitio de construcción u otro tipo de agregado secundario.

Finalmente, el criterio *Wst 03 - Residuos operacionales* se centra principalmente en la etapa de uso del edificio y tiene como propósito incentivar la instalación de almacenamientos destinados a desechos reciclables, de forma tal que estos no sean enviados a vertederos. Para esto es necesario destinar espacios para la separación y almacenamiento de desechos reciclables generados por el edificio o sus ocupantes. Dicho espacio debe estar claramente etiquetado, accesible para los ocupantes del edificio y con una capacidad adecuada para satisfacer las necesidades de este. En el caso de que se generen grandes cantidades de volúmenes de desechos es necesario contar con: compactadores de residuos estáticos, recipientes para el compostaje de residuos orgánicos y grifos adyacentes a los sitios de compostaje para la limpieza e higiene.

3.5.4. DGNB System

De origen alemán Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) corresponde a una certificación nacida en el año 2007 que puede ser aplicada a edificaciones nuevas y existentes edificaciones, además de áreas urbanas y renovaciones en edificios. Sus principios de sustentabilidad se centran principalmente en tres áreas: Ecología, Economía y Socio-cultural, en donde todas ellas comparten la misma importancia. Las certificaciones varían en distintos niveles, dependiendo del desempeño del edificio es posible obtener una certificación Platino, Oro, Plata o Bronce.

Para todos los criterios que evalúa la certificación se realiza una distinción en el puntaje máximo que se le otorga a dicho criterio en base al uso que tenga la edificación. De esta forma las puntuaciones de los criterios son diferentes dependiendo si el edificio se destina a educación, residencial, hotel, oficinas, centros comerciales, supermercados, producción, logís-

tica, asamblea o almacenes.

A pesar de tener origen alemán, la certificación cuenta con distintas versiones publicadas que pueden ser aplicadas internacionalmente. Durante el año 2020 se publicó una versión internacional del sistema de certificación utilizado en Alemania, basado en estándares normativos internacionales como ISO, normativa europea y adaptaciones de normativas alemanas. Para efectos de esta memoria, esta será la certificación que será descrita a continuación, cabe mencionar que toda la información que será expuesta a continuación fue extraída del documento *DGNB System New Construction, buildings criteria set* del año 2020 ^[17].

Aun cuando las principales áreas en las que se centra la certificación son ecología, economía y socio-cultural (cada uno recibe un 22,5 % del puntaje), existen otras tres áreas que también son estudiadas y que corresponde a calidad técnica (15 %), calidad del proceso (12,5 %) y calidad del sitio (5 %).

Para el caso de la calidad ecológica, existe un área temática denominada *Efectos en el ambiente local y global (ENV1)* que agrupa los siguientes criterios: ciclo de vida del edificio, impacto ambiental local y extracción sostenible de recursos. El otro grupo de criterios se denomina *Generación de residuos (ENV2)* y evalúa: demanda de agua potable y volumen de aguas residuales, uso del suelo y biodiversidad en el sitio.

En cuanto a la calidad económica, los criterios evaluados son: *Costos del ciclo de vida (ECO1)* y *Desarrollo económico (ECO2)* que se subdivide en: flexibilidad y adaptabilidad y, viabilidad comercial.

La calidad socio-cultural, tiene como criterios la *Salud, comodidad y satisfacción del usuario (SOC1)* con evaluaciones del confort térmico, calidad del aire interior, confort acústico, confort visual, control del usuario, calidad de los espacios interiores y exteriores y, seguridad y protección. Además se evalúa la *Funcionalidad (SOC2)* utilizando como criterio el “diseño para todos”.

Los criterios de *Calidad técnica (TEC1)*, por otro lado, son: seguridad contra incendios, aislamiento acústico, calidad de la envolvente del edificio, uso e integración de tecnología de construcción, facilidad de limpieza de componentes de construcción, facilidad de recuperación y reciclaje, control de inmisiones e infraestructura de movilidad.

La calidad del proceso agrupa sus criterios según *Calidad de la planificación (PRO1)* en donde se evalúa: resumen completo del proyecto, aspectos de sostenibilidad en la fase de licitación, documentación para la gestión sostenible y procedimiento de planeamiento y diseño urbano. Además del grupo denominado *Aseguramiento de la calidad de la construcción (PRO2)* en donde se evalúa: sitio de construcción/proceso de construcción, garantía de calidad de la construcción, puesta en marcha sistemática, comunicación con el usuario y planificación compatible con FM (Facility Management).

Finalmente, la *Calidad del sitio (SITE1)* evalúa: entorno local, influencia en el distrito, acceso de transporte y acceso a los servicios.

Con el objetivo de comparar con la certificación chilena CES, se describirá a grandes rasgos los criterios alineados con los objetivos de esta memoria, los cuales son: ENV1.1 Ciclo de vida del edificio, ENV2 Impacto ambiental local, ENV1.3 Extracción sostenible de recursos y TEC1.6 Facilidad de recuperación y reciclaje.

En primer lugar, el criterio *ENV1.1 Ciclo de vida del edificio* tiene como propósito garantizar que el enfoque de ciclo de vida sea coherente y, de esta forma se pueda reducir al mínimo los impactos relacionados a las emisiones y el consumo de recursos no renovables que se producen en todas las etapas del ciclo de vida del edificio. El uso de esta metodología permite una toma de decisiones respetuosa con el medio ambiente, así como la generación y reporte de indicadores ambientales importantes como las emisiones de CO₂ o la demanda energética a lo largo del ciclo de vida. Para evaluar este criterio se utilizan 3 indicadores:

1. Evaluaciones del ciclo de vida durante la planificación, con esto se busca tener una evaluación del ciclo de vida desde las etapas más tempranas del proyecto, evaluando distintas opciones de construcción y determinando impactos ambientales relacionados con el uso de energía o emisiones durante las fases de construcción y uso.
2. Optimización del análisis del ciclo de vida, con el objetivo de abordar lo más temprano posibles los impactos del edificio y de esta forma reducirlos u optimizarlos.
3. Cálculo comparativo de la evaluación del ciclo de vida. La certificación propone una metodología denominada “Método de evaluación del ciclo de vida de la DGNB” basa en la norma DIN EN 15978, en donde se busca evaluar la calidad ambiental de un edificio, teniendo en consideración su uso y comparándola con valores de referencia.

Los objetivos tras el criterio *ENV1.2 Impacto ambiental local* son reducir, evitar o sustituir los materiales o productos que puedan dañar o afectar negativamente a mediano o largo plazo a personas, flora y fauna y, de esta forma, disminuir la contaminación producida por la construcción del edificio. El único indicador de este criterio se denomina “Materiales respetuosos con el medio ambiente” y su medición depende del uso de la edificación.

En cuanto al criterio *ENV1.3 Extracción sostenible de recursos*, el objetivo primordial es promover el uso de productos que sean transparentes al momento de indicar sus impactos ambientales y sociales, y que a su vez utilicen métodos de extracción y procesamiento que cumplan con determinados estándares ambientales. Los indicadores de este criterio son:

1. Materias primas producidas de forma sostenible, en donde se valora el uso de materias primas que se encuentren debidamente certificadas por su extracción responsable, en donde el fabricante haya declarado responsabilidad a nivel corporativo
2. Materias primas secundarias, en donde se evalúa positivamente el uso de materiales reciclados.

El criterio *TEC1.6 Facilidad de recuperación y reciclaje* tiene como objetivo asegurar un uso económico y eficiente de los recursos naturales, reduciendo la cantidad de recursos primarios utilizados en la construcción y creando estrategias que permitan obtener materiales que se reciclen sin pérdidas efectivas. Para evaluar este criterio se utilizan 3 indicadores:

1. Facilidad de reciclaje de materiales de construcción, en donde se busca que los materiales de construcción utilizados para los componentes de construcción (estructurales) se seleccionen teniendo en cuenta el reciclaje.
2. Estructura del edificio fácil de recuperar, en donde se busca crear estructuras que se puedan desmontar fácilmente, de forma tal que los componentes puedan ser removidos sin el uso de métodos destructivos, para que posteriormente puedan ser reciclados.
3. Facilidad de recuperación, reutilización y reciclaje en el proceso de planificación, en donde se busca que el tema de la facilidad de recuperación y reciclaje de la estructura sea abordado por el equipo de planificación en etapas tempranas del proyecto.

3.5.5. LEED

Por sus siglas en inglés Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) ^[49] es una de las certificaciones más usadas en todo el mundo, fue creada en el año 1998 por U.S. Green Building Council y es aplicable a construcciones nuevas y existentes, y cualquiera sea el uso del edificio: comerciales, institucionales, residenciales, etc.

Dentro de los objetivos que persigue LEED se encuentra la optimización del uso de los recursos naturales, minimización de consecuencias negativas para la salud humana y ambiental por medio del diseño integrador y estrategias de vanguardia que promuevan una construcción ecológica, revertir el efecto negativo de la construcción sobre el cambio climático, proteger la biodiversidad, los ecosistemas, los recursos hídricos, construir una economía más verde, entre otros.

Para lograr lo anterior, LEED basa su sistema de certificación en la evaluación de una serie de requisitos (denominados créditos) clasificados como: Ubicación y Transporte (LT), Sitios Sostenibles (SS), Eficiencia del Agua (WE), Energía y Atmósfera (EA), Materiales y Recursos (MR) y Calidad Ambiental Interior (EQ). Cada uno de estos créditos tiene asignado un puntaje, en función de la importancia que tienen para alcanzar los objetivos que persigue LEED. La certificación entregada por LEED cuenta con cuatro niveles: Certificado (40 a 49 pts), Plata (50 a 59 pts), Oro (60 a 79 pts) y Platino (80 o más pts). El nivel obtenido depende del puntaje obtenido y el cumplimiento de los créditos antes mencionados.

Del mismo modo que en las certificaciones mencionadas anteriormente, los créditos de LEED cuentan con distintos atributos que son evaluados. En el caso de *Ubicación y Transporte (LT)* los atributos son: ubicación de LEED para desarrollo de vecindarios, protección de tierras sensibles, sitios de alta prioridad, densidad de envolvente y usos diversos, acceso a tránsito de calidad, instalaciones para bicicletas, huella de estacionamiento reducida y vehículos verdes. Todos estos atributos se encuentran asociados a la etapa de diseño del edificio.

Por otro lado, *Sitios Sostenibles (SS)* evalúa: prevención de la contaminación en la construcción, evaluación ambiental del sitio, evaluación del sitio, desarrollo del sitio/ protección o restauración del hábitat, espacio abierto, gestión de aguas pluviales, reducción de isla de calor, reducción de la contaminación lumínica, plan maestro del sitio, directrices de diseño y construcción para inquilinos, lugares de descanso, acceso exterior directo y uso conjunto de

las instalaciones. Los dos primeros atributos corresponden a pre-requisitos y se encuentran asociados a la etapa de construcción, mientras que el resto corresponden a créditos asociados a la etapa de diseño.

En cuanto a la *Eficiencia de Agua (WE)* los atributos evaluados corresponden a: reducción del uso de agua al aire libre y en interiores, medición de agua a nivel de edificio, uso de agua de la torre de enfriamiento y finalmente medición de agua. Todos ellos son evaluados durante la etapa de diseño del edificio.

El crédito de *Energía y Atmósfera (EA)* tiene dentro de los atributos estudiados: puesta en marcha y verificaciones fundamentales, rendimiento energético mínimo, medición de energía a nivel de edificio y gestión fundamental de refrigerantes como pre-requisitos evaluados durante la etapa de diseño. Mientras que como créditos se tiene: puesta en marcha mejorada, respuesta de la demanda y energía verde, y compensaciones de carbono evaluados durante la etapa de construcción. Además, se evalúa durante la etapa de diseño la: optimización del rendimiento energético, medición de energía, producción de energía renovable y gestión mejorada de refrigerantes.

Para el caso de *Materiales y Recursos (MR)*, los atributos estudiados corresponde a: almacenamiento y recolección de reciclables, planificación de gestión de residuos de construcción y demolición, reducción de fuente de mercurio, reducción del impacto del ciclo de vida del edificio, divulgación y optimización de productos de construcción; declaraciones ambientales de productos, abastecimiento de materias primas, ingredientes de materiales, reducción de fuentes de plomo, cadmio y cobre, mobiliario y mobiliario médico, diseño para flexibilidad y, gestión de residuos de construcción y demolición.

Por otro lado, en el caso de *Calidad Ambiental Interior (EQ)* los atributos son: desempeño mínimo de la calidad del aire interior, control ambiental del humo del tabaco, rendimiento acústico mínimo, estrategias mejoradas de calidad del aire interior, materiales de baja emisión, plan de gestión de la calidad del aire interior de la construcción, evaluación de la calidad del aire interior, comodidad térmica, luz interior, luz, vistas de calidad y rendimiento acústico.

Los criterios que se describirán a continuación se centran principalmente en el apartado de *Materiales y Recursos (MR)* pues son los temas más afines a los tratados en la presente memoria.

Comenzando por el crédito de *Almacenamiento y recolección de reciclables*, el cual tiene como objetivo reducir los residuos generados por los ocupantes del edificio y evitar que sean enviados a vertederos. Para esto es necesario contar con áreas específicamente dedicadas al almacenamiento de estos desechos, de fácil acceso para los transportistas. Los materiales que se deben tener en cuenta para el reciclaje son: papel mixto, cartón corrugado, vidrio, plástico y metales, las áreas de reciclaje de cada uno de ellos pueden encontrarse separadas. Para cumplir satisfactoriamente con este crédito LEED propone realizar un estudio del flujo de los desechos que se generaran, tomando como base los cinco materiales antes mencionados y, en base a esto determinar las zonas de acopio de estos materiales.

Por otro lado, la *Planificación de gestión de residuos de construcción y demolición* tiene

como objetivo la reducción de los residuos de construcción y demolición que son llevados a vertederos o incineradores, por medio de la recuperación, reutilización y reciclaje de los materiales. Para lograr esto es necesario contar con un plan de gestión de residuos de construcción y demolición en donde se identifiquen al menos cinco materiales y se defina el destino al que serán enviados. Se deben especificar las estrategias que se utilizarán con cada material, describiendo el proceso de reciclaje en caso de que corresponda. Finalmente es necesario entregar un informe en donde se detallan los flujos de los residuos, las tasas de eliminación y de desvío.

En cuanto a la *Reducción del impacto del ciclo de vida del edificio* tiene como principal objetivo fomentar la reutilización y optimizar el desempeño ambiental de los productos y materiales de la construcción. Para esto es necesario mostrar que los efectos ambientales fueron reducidos mediante la reutilización de los productos de construcción existentes o mostrar una reducción en el uso de materiales utilizando la evaluación del ciclo de vida. Lo anterior queda reflejado mediante el cumplimiento de alguno de los siguientes logros: Reutilización de un edificio histórico, Rehabilitación de edificio abandonado o deteriorado, Construcción y reutilización de materiales o Evaluación del ciclo de vida del edificio.

El crédito denominado *Divulgación y optimización de productos de construcción - Declaraciones ambientales de productos* busca fomentar el uso de productos y materiales que cuenten con la información referente al ciclo de vida e impactos ambientales, económicos y sociales. Además, se busca recompensar a los fabricantes de productos que hayan demostrado mejoras en los impactos ambientales de los ciclos de vida de sus productos. Para conseguir esto es necesario contar con las DAP de al menos 20 materiales que estén permanente instalados en el edificio, o utilizar productos que cumplan con ser: productos certificados por terceros que muestren una reducción del impacto por debajo del promedio de la industria, o pertenecer al programa aprobado por USGBC.

En relación a lo anterior, se encuentra el crédito *Divulgación y optimización de productos de construcción - abastecimiento de materias primas*, que comparte el mismo objetivo y el mismo requisito para ser cumplido, es decir, contar con las DAP de al menos 20 materiales que estén permanente instalados en el edificio, pero además tiene como segunda opción el uso de al menos el 25 % de materiales que cumplan con alguno de los siguientes puntos: cuenten con responsabilidad extendida del productos, sean materiales de base biológica, sean productos provenientes de madera, sean productos generados por reutilización de materiales, sean materiales con contenido reciclado o formen parte del programa aprobado de USGBC.

El último crédito de interés corresponde a *Gestión de residuos de construcción y demolición*, que tiene como objetivo la reducción de los residuos de construcción y demolición destinados a vertederos o incineradoras, utilizando técnicas de recuperación, reutilización y reciclaje de materiales. Para lograr esto es necesario reciclar y/o recuperar materiales de construcción, excluyendo los materiales provenientes de excavaciones y escombros por desmonte.

Lo anterior se puede cumplir utilizando una ruta de desvío del 50 % del total de los materiales de construcción incluyendo al menos tres corrientes de materiales, o con una ruta de desvío del 75 % del total de los materiales de construcción, pero con cuatro corrientes de materiales. Otra opción es reducir la cantidad de residuos generados, no generando más de 12,2 kg de desechos por metro cuadrado de la superficie del edificio.

3.5.6. Comparación de certificaciones

La Tabla 3.1 que se muestra a continuación resume los parámetros tratados en las cuatro certificaciones descritas anteriormente. Cabe recalcar que todas las certificaciones evalúan muchos más puntos de los que se han expuesto en esta memoria, debido a que los criterios que han sido descrito en este documento son aquellos relacionados a materiales, residuos y emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 3.1: Resumen de parámetros medidos en las certificaciones

Parámetro	CES	BREEAM	DGNB System	LEED
Gestión de residuos durante construcción	Se debe considerar durante diseño y aplicar durante construcción	Si se considera	Se considera dentro de un conjunto de medidas que se deben tomar durante la construcción	Si se considera
Declaración Ambiental de Productos	Es de carácter voluntario	Se cumple con ACV de materiales	Si se considera	Si se considera
Equipamiento para el manejo de residuos durante operación del edificio	Es de carácter voluntario	Se incentiva el uso de estos equipamientos	Si se considera	Si se considera
Gestión de residuos durante fase de uso	Es de carácter voluntario	Si se considera	Si se considera	Si se considera
Fomento a reutilización y reciclaje de materiales	Es de carácter voluntario	Es consecuencia del resto de criterios	Es fomentado durante la construcción y al fin de la vida útil de la estructura	Es consecuencia del resto de criterios
Medición de huella de carbono	Es de carácter voluntario y solo durante fase de uso	Se considera junto a medición de uso de energía	Es consecuencia del ACV del edificio	Se fomenta activamente su medición y reducción

Continuación de Tabla 3.1

Parámetro	CES	BREEAM	DGNB System	LEED
Reciclaje de áridos	No considera	Entrega cifras para la cantidad de áridos a reciclar	Es fomentado junto con la extracción sostenible de recursos	Es fomentado junto con la extracción sostenible de recursos
Separación de residuos durante fase de uso	Es de carácter voluntario	Si se considera	Si se considera	Si se considera
Estudio del ciclo de vida del edificio	No considera	Lo fomenta para mejorar el diseño y operación	Plantea su estudio, optimización y comparación con casos similares	Se plantea su estudio y reducir el impacto que este tiene
Estudio del ciclo de vida de materiales	No considera	Fomenta el estudio de ACV en materiales	Si se considera	Si se considera

Como se puede ver en la Tabla antes mencionada, la certificación CES considera muy pocos aspectos en comparación al resto de normativas. En primer lugar, los criterios relacionados a residuos mencionan únicamente la creación y aplicación de un plan de gestión de residuos durante la fase de construcción, en donde no se plantea al reciclaje como un requisito obligatorio, si no que más bien es voluntario.

Del mismo modo, la gestión de residuos de forma sustentable durante la etapa de uso del edificio es de carácter voluntario. Dentro de estas medidas se encuentran: la instalación de equipamiento que permita la separación y almacenamiento de residuos de forma que estos puedan ser reciclados, entregar el espacio suficiente para suplir todos los desechos generados, etc.

Considerando estos criterios y la forma en que han sido tratado en los otros certificados, es posible plantear algunos parámetros que actualmente no son considerados por CES, pero que pueden llevar a ser medidos y, de esta forma, mejorar el desempeño ambiental de un edificio.

Entre estos parámetros se encuentran, por ejemplo, la medición de ruido, medición de polvo y protección de suelo y aguas subterráneas. Todos estos parámetros son medidos y controlados durante la construcción por DGNB System, en donde se describen la importancia y metodología a seguir para controlarlos.

Por otro lado, es claro que el reciclaje y la reutilización de materiales durante la etapa

de construcción es otro de los parámetros que pueden ser incluidos en CES. Actualmente este parámetro no forma parte de dicha certificación pues los planes de gestión solo incluyen indicar los sitios a los cuales los desechos serán destinados y no incluyen una cuota mínima de reciclaje a cumplir.

En cuanto a los materiales, la certificación CES no tiene requerimientos obligatorios sobre este tema, sin embargo, presenta un requerimiento voluntario, el que consiste en presentar las Declaraciones Ambientales de Productos para una determinada cantidad de materiales que se encuentren instalados de forma permanente en el edificio. El resto de las certificaciones también consideran este requisito y lo valoran como una forma de incentivar el uso de materiales más amigables con el medio ambiente. Algunas de las certificaciones incluso requieren el uso de materiales que cuenten con responsabilidad extendida del productor, requisito que actualmente no es aplicable para la industria pues no existen materiales de la construcción que cuenten con esta característica.

Dentro de los criterios más importantes que se evalúan en todas las certificaciones menos en CES corresponde al Análisis de Ciclo de Vida (ACV), tanto para el edificio completo como para determinados materiales. Tal como se mencionarán en las secciones siguientes, esta herramienta de estudio es muy importante para conocer todos los impactos que genera un determinado producto, determinar indicadores tales como huella de carbono, uso de energía y de agua, etc.

Además, las certificaciones no solo incentivan la realización del ACV, sino que van un paso más allá y consideran dentro de los requisitos que se deben cumplir una optimización del ciclo de vida del edificio y una comparación con edificios de similares características, de forma tal que sea posible introducir mejoras y disminuir los impactos que se generan.

Es claro que la certificación CES aún tiene muchos aspectos por mejorar, sin embargo, muchos de los aspectos se han observado en certificaciones extranjeras no podrían llegar a ser aplicables hoy en día, debido a que la normativa chilena aún carece de los incentivos suficientes para poder incluirlos. Este es el caso del uso de materias primas más sustentables que incluyan materiales reciclados, actualmente en Chile existe normativa que prohíbe el uso de áridos reciclados. La responsabilidad extendida del productor corresponde a otra gran oportunidad de fomentar un mercado de materiales más sustentables, sin embargo, hoy en día la normativa no cuenta con alcances que incluyan materiales de construcción.

Otro aspecto importante que se tendría que incluir, al menos como requisito voluntario, es la realización del análisis de ciclo de vida de la estructura. Los beneficios de este estudio son múltiples, permiten extraer más información y entender mejor el comportamiento de la estructura y contribuir a una mejor toma de decisiones de cara a la sustentabilidad de la estructura, pues el análisis debe ser realizado durante la etapa de diseño.

Capítulo 4

Reciclaje y Reutilización del acero

Dentro de la amplia gama de materiales que se utilizan en construcción, el acero es uno de los que hoy en día más propiedades circulares presenta. Debido a su naturaleza, el acero puede ser reciclado en varias ocasiones sin perder sus características originales. Más aún, la chatarra que se produce durante la producción de acero es comúnmente utilizado como insumo dentro de la línea productiva de otros aceros.

Las principales líneas productivas que se pueden encontrar en la producción de acero depende de la materia prima utilizada; aquellos fabricados tradicionalmente en Altos Hornos con mineral de hierro, caliza y coque, pueden llegar a alcanzar hasta un 35 % de chatarra dentro de su producción. Por otro lado, la producción mediante un Horno Eléctrico, utilizando chatarra ferrosa como principalmente componente, alcanza hasta un 95 % de chatarra en su composición^[26]. Como se puede observar en la Figura 4.1 a nivel mundial la producción de acero se realiza principalmente por Altos Hornos llegando a superar el 70 % de la producción anual desde el año 2012 al día de hoy.

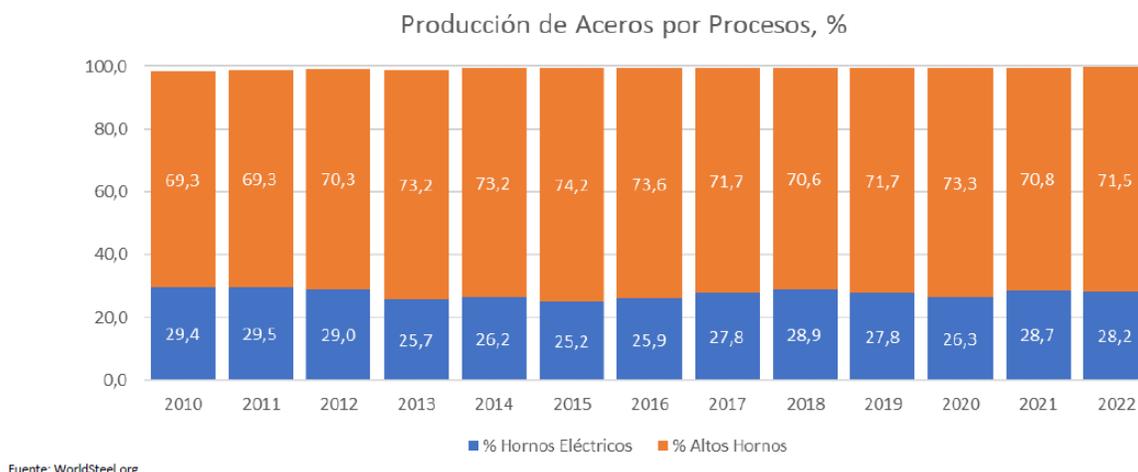


Figura 4.1: Producción de aceros según procesos productivos. Fuente: WorldSteel.org

A pesar de que claramente es posible fabricar materiales de acero utilizando únicamente chatarra como componente principal, se observa que independientemente del método utiliza-

do, no es posible alcanzar un 100% de chatarra como único componente de nuevos materiales de acero. Lo anterior se produce debido a que no existe un volumen suficiente de chatarra que permita cubrir la demanda de acero que actualmente existe en el mercado, por lo que se debe recurrir a los procedimientos mixtos que se describieron anteriormente.

La Figura 4.2 muestra los procesos que se llevan a cabo para producir 1 tonelada de acero mediante el uso de Altos Hornos y Hornos Eléctricos. Como se mencionó anteriormente, el producido por Altos Hornos requiere como materia prima el Mineral de Hierro, Carbón, Caliza y Coque los cuales son introducidos al Alto Horno para obtener hierro, posteriormente se agrega chatarra en un convertidor para obtener el acero líquido, el cual es vertido en coladas continuas para producir los distintos productos de acero. El uso de Hornos Eléctricos, por otro lado, requiere introducir la chatarra ferrosa en el Horno Eléctrico para poder obtener la acería primaria, posteriormente el proceso productivo es similar al realizado en Altos Hornos.



Figura 4.2: Proceso productivo de acero en base a Altos Hornos y Hornos Eléctricos. Fuente WorldSteel.org

En términos de cifras, el artículo “*La sustentabilidad del acero y las estructuras metálicas*” escrito por Helena Gervásio [26], entrega cifras contundentes acerca de ambos procesos productivos. En él se menciona que, para perfiles laminados, el consumo de energía puede alcanzar 29 GJ por tonelada de acero con el uso de alto horno, mientras que para el caso de hornos eléctricos la cifra asciende a tan solo 10 GJ.

A nivel global, World Steel Association indica que durante el año 2019 se consumieron 20.08 GJ/toneladas de acero producido, mientras que para los años 2020 y 2021 las cifras fueron de 20.70 y 21.31 GJ/tonelada de acero producida respectivamente [51]. A nivel nacional, CAP acero reporta en su “Memoria integrada 2021” [11] un consumo que alcanzan los

4.741.916 MWh, mientras que AZA reporta un consumo energético anual de 527.021 KWh en su Reporte de sostenibilidad del año 2019^[3].

En cuanto a emisiones de carbono, Gervásio señala que por cada 1 kg de acero producido se genera alrededor de 465 g de CO_2 para el caso del horno eléctrico, mientras que el caso del alto horno alcanza emisiones cercanas a 2.484 g de CO_2 . Finalmente, se señala que la producción de acero reciclado en comparación al acero tradicional puede llegar a ahorrar 1.25 ton de mineral de hierro, 630 kg de carbón y 54 kg de caliza por cada tonelada producida de acero reciclado. La Figura 4.3 muestra los impactos ambientales de la producción de acero y agrupa los datos mencionados anteriormente sobre uso de energía y emisiones de CO_2 de acuerdo con World Steel Association.

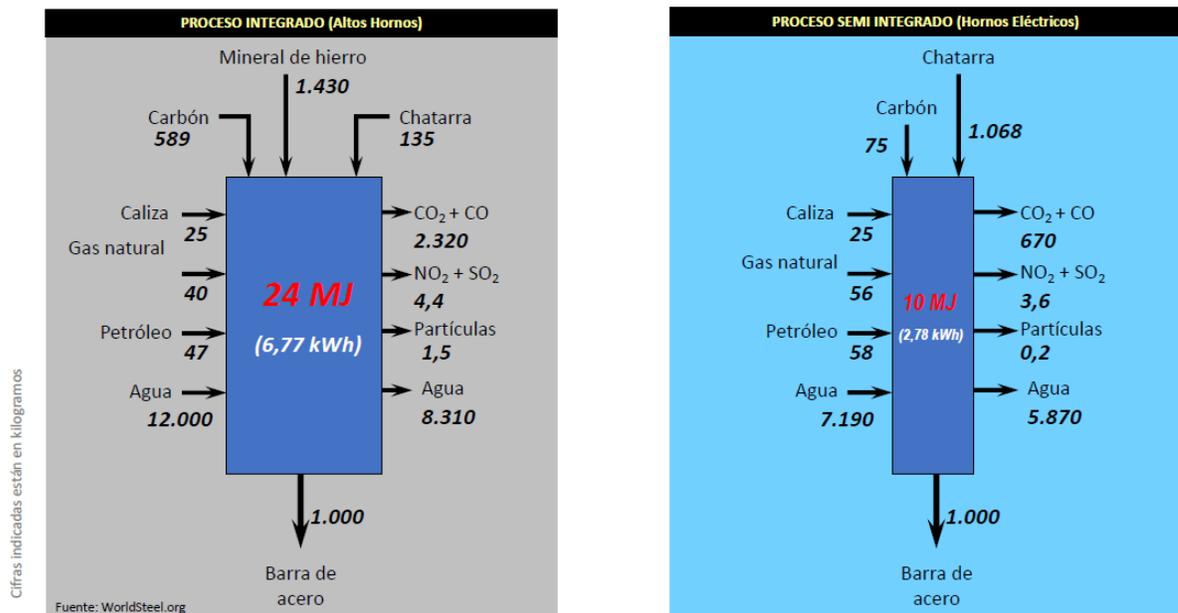


Figura 4.3: Impactos ambientales de la producción de acero por Altos Hornos y Hornos Eléctricos. Fuente: WorldSteel.org

Sumado a lo anterior, el acero por sí solo, tanto el reutilizado, reciclado como el tradicional, presentan oportunidades extra para aplicar principios de economía circular, relacionados principalmente con la estructura final de las cuales son parte.

Las estructuras construidas principalmente con acero permiten utilizar la construcción modular, utilizando estructuras prefabricadas que disminuyen los tiempos de ejecución y la mano de obra requerida en obra. Del mismo modo, la construcción modular facilita la deconstrucción de la estructura y favorece la recuperación de los materiales para que estos puedan ser reintegrados dentro del ciclo de producción.

Por otro lado, las características propias que tienen las edificaciones de acero permiten la reutilización de la propia estructura, luego de que esta cumpla el ciclo de vida estipulado, es decir, los amplios espacios que se pueden conseguir producto de una estructuración basada en acero permitirían que un edificio en cuestión se puedan redistribuir los espacios interiores para cambiar el uso que se le da a este.

En cuanto a la industria Chilena, existen dos siderúrgicas que se encargan de producir acero: AZA y CAP, cada una de ellas se especializa en un proceso de productivo distinto. AZA realiza su producción mediante el uso de chatarra ferrosa utilizando Hornos Eléctricos, mientras que CAP se dedica a fundir Mineral de Hierro mediante Altos Hornos. La Figura 4.4 muestra las cifras de producción de acero en base al proceso productivo. Es posible observar que a nivel nacional el acero es producido principalmente por Altos Hornos. Cabe mencionar que el acero producido nacionalmente solo representa alrededor del 30% del acero que se consume anualmente en el país, el resto proviene de importaciones desde el extranjero [29].

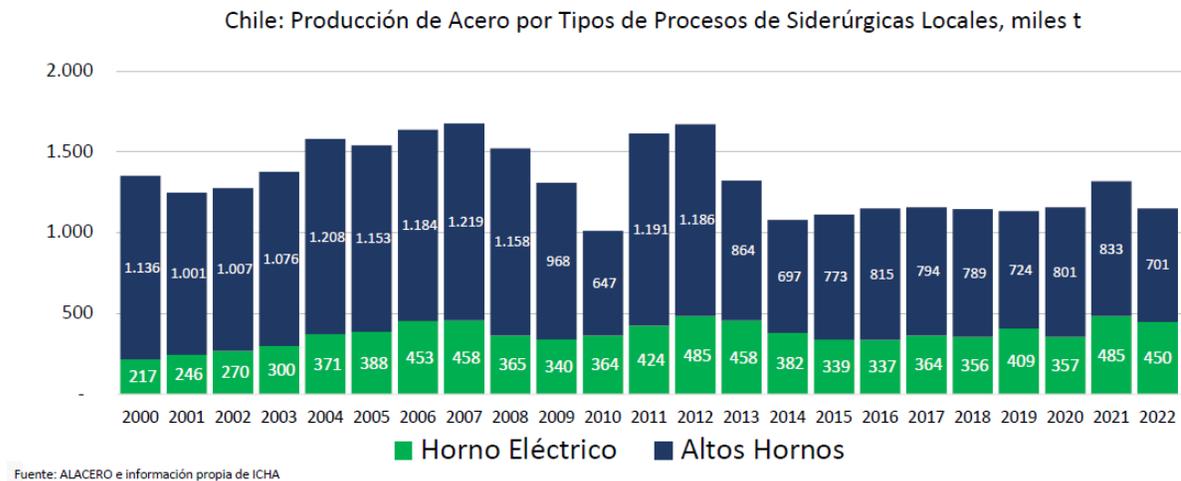


Figura 4.4: Producción de acero en Chile según el tipo de proceso productivo. Fuente: ALACERO e información propia de ICHA

Por otro lado, la Figura 4.5 muestra el porcentaje de acero que es producido anualmente utilizando chatarra respecto de la producción total. Como se puede observar, el 46% de la producción de Chile se realiza mediante chatarra. Por sobre el promedio mundial que es de 28%.

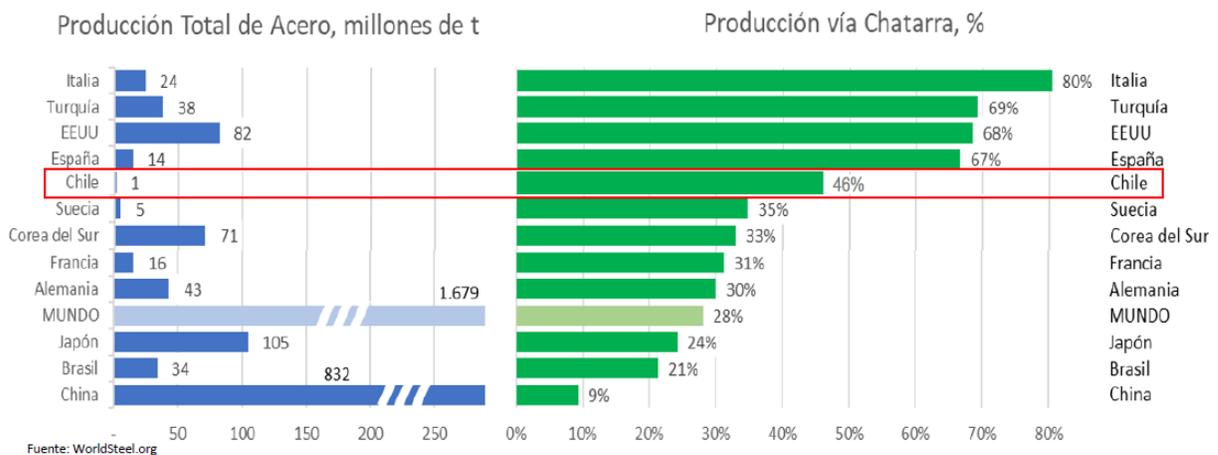


Figura 4.5: Producción de acero total y a través de chatarra a nivel mundial. Fuente: WorldSteel.org

Como se mencionó anteriormente, la producción nacional solo representa alrededor del 30 % del consumo de acero nacional, el resto proviene de importaciones. La Figura 4.6 muestra las distintas huellas de carbono producto de la producción y transporte de barras de acero. Como se puede observar en dicha figura Turquía y México son los países con menor emisiones de tCO₂ eq/ t acero por conceptos de producción y transporte de barras de acero, alcanzando cifras de 1,26 y 1,49 tCO₂ eq/ t acero respectivamente. Mientras que las mayores emisiones las producen Argentina y China con 2,13 y 2,44 tCO₂ eq/t acero respectivamente.

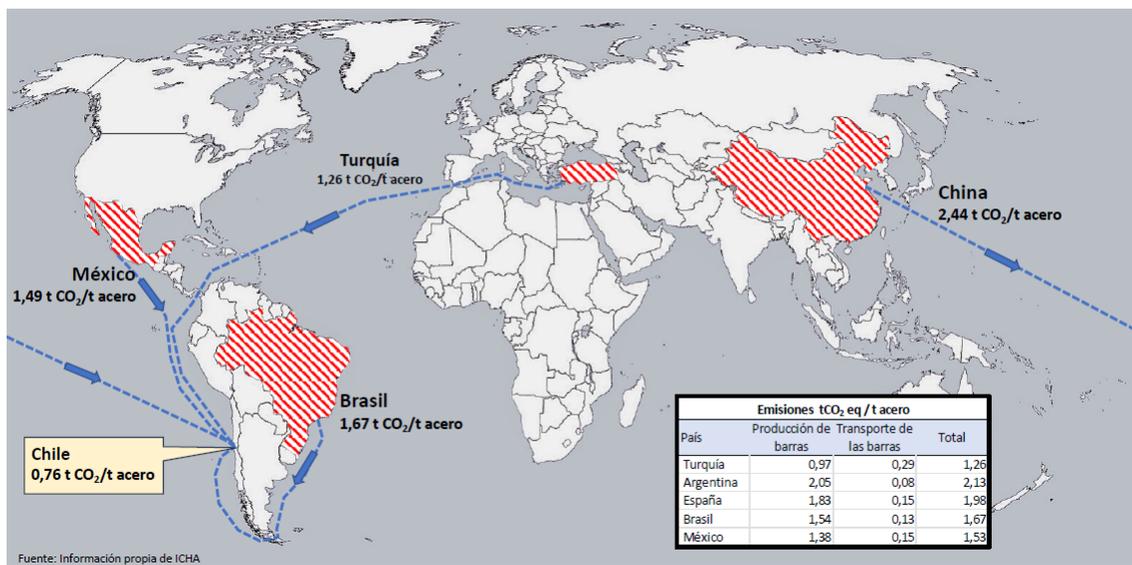


Figura 4.6: Emisiones de CO₂ producidas por importaciones de barras de acero. Fuente: ICHA

Capítulo 5

Huella de Carbono

Una de las formas de cuantificar el impacto que un determinado proceso o agente tiene sobre el medio ambiente es la huella de carbono. De acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente, la huella de carbono se define como, "el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO_2 equivalentes, y sirve como una útil herramienta de gestión para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar nuestras emisiones, cómo podemos mejorarlas y realizar un uso más eficiente de los recursos"^[35].

De esta forma, la cuantificación de la huella de carbono de determinados procesos y/o productos permite establecer planes de acción para mitigar y disminuir las emisiones que estos producen producto de su fabricación y utilización.

En el ámbito de la construcción, el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se pueden atribuir a la huella de carbono de un proyecto de construcción, se puede separar principalmente en dos categorías, las que dependen de la etapa del ciclo de vida en las que son producidas. De esta forma, las emisiones consideradas se denominan carbono operacional y carbono incorporado.

El carbono operacional hace referencia a aquellos GEI que se producen durante la vida útil de una determinada infraestructura y producto de las distintas actividades que se deben realizar para que esta cumpla correctamente su funcionamiento. Por otro lado, el carbono incorporado se refiere a todos los GEI que se producen por conceptos de construcción, en donde se incluye la fabricación y transporte de materiales, reparaciones y mantenimientos realizados durante la vida útil de la infraestructura y por último la demolición y disposición final de los desechos que se generen durante este proceso.

Considerando lo anterior, es que resulta complejo el estudio de la huella de carbono en la industria de la construcción. Se debe considerar una gran cantidad de variables y procesos que son parte del ciclo de vida de la infraestructura. Es por esto que surge el concepto de análisis de ciclo de vida (ACV), destinado a establecer los estándares que deben ser consideradas al momento de cuantificar la huella de carbono.

5.1. Análisis de ciclo de vida (ACV)

Para comprender el impacto ambiental de un proyecto de construcción es necesario realizar un análisis que involucre las distintas etapas que forman parte de él. Para esto se utiliza el Análisis de ciclo de vida (ACV), un método en donde se analiza desde la selección de materiales con su respectiva fabricación y transporte, hasta el fin de la vida útil de la infraestructura.

Para estandarizar la metodología se desarrolló las ISO 14040:2006 “Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia” [30] e ISO 14044 “Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices” [31]. En donde se establecen lineamientos generales para la realización de un estudio de análisis de ciclo de vida, definido principalmente por cuatro etapas de estudio:

- Definición del objetivo y alcance, en donde se establece el nivel de detalle que se alcanzará con el ACV, el cual varía dependiendo del objetivo y el uso que se le dará a dicho ACV.
- Análisis de inventario (ICV), en donde se realiza un inventario de las entradas y salidas que forman parte del ciclo de vida y que generen un impacto sobre este.
- Evaluación del impacto ambiental (EICV), cuyo objetivo es profundizar en el análisis de inventario, determinando el impacto que se generan sobre el medio ambiente.
- Fase de interpretación, en la cual se toman los resultados de las dos etapas anteriores, se contrastan con los alcances y objetivos definidos y, se presentan conclusiones y recomendaciones para la futura toma de decisiones.

Para el sector de la construcción, el ciclo de vida de una infraestructura está compuesto principalmente por cuatro etapas; selección de materiales, construcción, uso/mantenimiento y fin de vida útil. En la Figura 5.1, se puede ver una representación para el caso de edificación.

Dentro de las etapas del ciclo de vida de un edificio, el uso/mantenimiento puede llegar a alcanzar entre un 40 % a 60 % del total de emisiones de GEI, siendo estas emisiones predominantemente de carbono operacional y producido principalmente por el consumo de energía eléctrica y calefacción. Las emisiones de carbono incorporado, por otro lado, se producen por los procesos de fabricación de materiales, debido al consumo de combustibles y principalmente por las emisiones de GEI producidas por el transporte de recursos, materiales y desechos, a lo largo de todo el ciclo de vida.

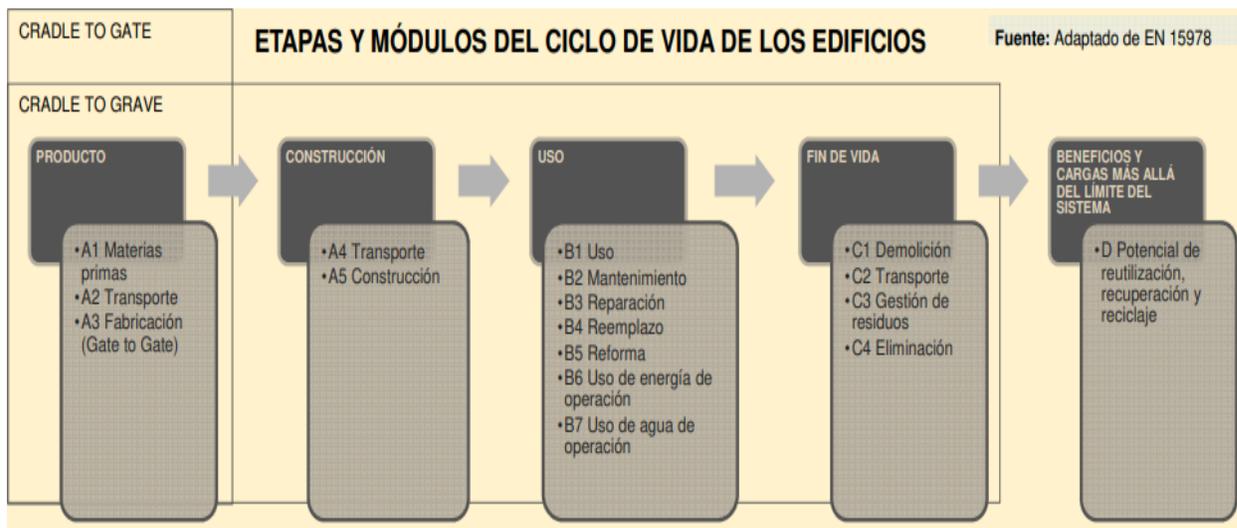


Figura 5.1: Ciclo de vida en edificación. Extraído de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en los Edificios. GBCe [2]

La utilidad que presenta el análisis de ciclo de vida, además del exhaustivo estudio que es posible alcanzar y la gran cantidad de impactos ambientales que se pueden determinar, se encuentra en la Declaración Ambiental de Productos (DAP), una Ecoetiqueta de Tipo III, regulada y reconocida internacionalmente por medio de las normas ISO, que permiten entregar una declaración ambiental de un determinado producto o servicio y obtener una certificación acreditada internacionalmente.

5.2. Declaración ambiental de productos (DAP)

Tal como se mencionó anteriormente, la Declaración Ambiental de Productos (DAP), corresponde a una Ecoetiqueta de Tipo III, realizada en base a un análisis de ciclo de vida de un determinado producto o servicio. A nivel internacional se encuentra regulada principalmente por la ISO 14025:2006. Etiquetas y declaraciones ambientales - Declaraciones ambientales tipo III - Principios y procedimientos, y a nivel europeo por EN 15.941. Sostenibilidad en la construcción - Declaraciones ambientales de producto - Metodología de selección y uso de datos genéricos.

Como se indica en la norma, esta declaración esta principalmente destinada a ser una comunicación entre empresas, sin embargo, no se cierra su utilización a la comunicación entre productor y consumidor. Además, en ella se señala el carácter de la verificación que deben tener los datos del ACV para poder obtener una certificación, de donde se desprende que debe existir una “verificación de tercera parte”, ajena a los participantes del ACV. Cabe mencionar que actualmente la DAP tiene un carácter voluntario.

De esta forma, la DAP corresponde a una fuente confiable de información acerca de los impactos ambientales que tiene un producto/servicio y permite la comparación entre productos de similares características, para valorar cuál de ellos resulta ser más beneficioso para el medio ambiente.

A continuación, se describirá el contenido de algunas DAPs relacionadas a productos de acero. Para esto se recurrirá a los principales productos utilizados en la construcción y a los principales productores nacionales e internacionales que disponen de DAPs para sus productos, de acuerdo a lo que es posible encontrar en *The International EDP System*.

AZA dispone de DAP para barras de refuerzo y perfiles de acero. En cuanto a las barras de acero, los productos que aquí se incluyen corresponden a barras de grado A440-280H de diámetros 8 a 16 mm y, A630-420H de diámetros 8 a 40 mm. Se realiza un análisis de la cuna a la puerta, considerando los módulos A1, A2, A3, A4, A5, C2, C3, C4 y D, según lo definido en las etapas y módulos del ciclo de vida de la Figura 5.1.

Dentro de los impactos al cambio climático de 1 ton de barras de refuerzo que se reportan en la DAP se encuentra un promedio ponderado de emisiones de 310 kg CO₂ eq entre las dos plantas de AZA con una diferencia de 8 % entre ellas. Consumo de gas natural de 7,61 m³/t de palanquilla y de gas licuado de petróleo de 9,1E-05 t GLP/t de palanquilla. Por otro lado se reporta una huella de carbono de 0,0067 kg CO₂eq/kWh debido a que la empresa cuenta con una matriz energética 100 % renovable.

En cuanto a los perfiles de acero de AZA, la DAP incluye a los perfiles de ángulo, perfiles estrella, barras planas, barras redondas, barras cuadradas y barras hexagonales, con las respectivas medidas que se pueden encontrar en el catálogo de AZA. Nuevamente el análisis es de la cuna a la puerta, considerando los módulos A1, A2, A3, A4, A5, C2, C3, C4 y D según lo que se observa en la Figura 5.1.

Los impactos que se reportan para 1 t de perfiles de acero son 299 kg CO₂ eq como promedio ponderado entre las dos plantas de la empresa, con una diferencia entre ellas del 9 %. Los consumos de gas natural, gas licuado de petróleo y huella de carbono corresponden a los mismos valores reportados en la DAP de barras de refuerzo.

Por otro lado, se encuentra CAP cuyos productos de acero para la construcción corresponden principalmente a barras de refuerzo. En este caso la DAP incluye a las barras de grado A440-280H y A630-420H en formato soldable y no soldable y grados 60 y 80 para barras de hormigón de alta resistencia. El análisis incluye los módulos A1, A2, A3, A4, A5, C1, C2, C3, C4 y D en base a lo definido en la Figura 5.1.

Los impactos ambientales que se reportan indican que para 1 t de barras de refuerzo no soldable se tiene 2.550 kg CO₂ eq y barras de refuerzo soldables 2.580 kg CO₂ eq. Se menciona además una contribución al potencial de calentamiento global del 97 % por la eutrofización de agua dulce acuática y 83 % por el agotamiento abiótico-fósil en el módulo A1, ambos casos esto se debe por el uso del carbón. Además, el módulo A3 tiene una contribución del 77 % debido a las emisiones de CO₂ que se generan durante el proceso de reducción del mineral de hierro.

Internacionalmente se encuentra el caso de GERDAU ACOS LONGOS S.A. que cuenta con DAPs para sus barras de refuerzo CA-50 y GG-50. En ambos casos el análisis se realiza de la cuna a la puerta, considerando los módulos A1, A2, A3, C1, C2, C3, C4 y D (Figura 5.1). Los impactos ambientales que se muestran en la DAP, para 1 ton de barras de acero

corresponde a 1.980 kg CO₂ eq, uso total de recursos energéticos primarios renovables de 6.690 MJ y no-renovables de 17.400 MJ.

Además, Özdemir Boru Inc. en Turquía cuenta con DAP para sus perfiles y tuberías de acero. Nuevamente el análisis se realiza de la cuna a la puerta considerando los módulos A1, A2, A3, A4, C1, C2, C3, C4 y D (Figura 5.1). Para 1 tonelada de perfiles/tuberías de acero se reporta un impacto de 3.054 kg CO₂ eq, uso total de recursos energéticos primarios renovables de 3.182 MJ y no-renovables de 32.158 MJ

5.3. Estrategia nacional de Huella de carbono

En el año 2021, la Secretaría Técnica del comité Huella de Carbono publicó el borrador de la Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector de la Construcción" (ENHCSC), documento destinado a definir los lineamientos a seguir para poder alcanzar la carbono neutralidad en el año 2050 ^[46].

Para alcanzar esta y otras metas, se plantean cuatro objetivos estratégicos, alineados con los cuatros ejes estratégicos y transversales de acción que se plantean en la estrategia de huella de carbono, y que tienen como propósito establecer las directrices que se deben seguir para lograr una correcta implementación de la estrategia. Entre estos objetivos se encuentran:^[46]

- 1. Reportabilidad de la huella de carbono de proyectos de edificación e infraestructura como práctica habitual en el sector de la construcción.
- 2. Compromiso permanente de instituciones del estado y actores relevantes para promover la carbono neutralidad dentro del sector de la construcción.
- 3. Regulación nacional con estándares de construcción bajos en carbono, con fomento a la innovación dentro del sector.
- 4. Concientización de la sociedad acerca de los beneficios de la construcción baja en carbono y demanda de proyectos NetZero.

Por otro lado, los ejes estratégicos y transversales que forman parte de la Estrategia Nacional de Huella de carbono se muestran en la Figura 5.2. Dentro de cada eje estratégicos, se plantean además una serie de acciones que permitirían alcanzar las metas planteadas a corto, mediano y largo plazo.

Dentro de las metas que se plantean, se encuentran a corto plazo contar con una red de información para lograr la verificación y el reporte de las emisiones de GEI de los proyectos de construcción, de forma tal que se logre una reportabilidad de la huella de carbono para las nuevas y actuales construcciones. Posteriormente, se busca definir una línea base de acción y en base a ella establecer metas graduales de disminución de GEI, hasta alcanzar la carbono neutralidad en el año 2050, en donde el 100 % de las nuevas edificaciones tengan cero emisiones de GEI y el 100 % de las actuales construcciones reporten las emisiones de carbono incorporado y operacional.



Figura 5.2: Ejes estratégicos y transversales de ENHCSC. Fuente: Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector de la Construcción ^[46]

El eje de gestión de la información plantea que, como primer paso, se debe contar con información precisa acerca de las emisiones que se generan en el sector de la construcción, por lo que se debe fomentar el desarrollo de metodologías de cálculo de huella de carbono, de forma que la información obtenida pueda ser de uso público y ser considerada a la hora de la toma de decisiones.

Como su nombre lo indica, el eje de coordinación institucional busca lograr la coordinación de las instituciones y agentes involucrados tanto en el sector de la construcción, como aquellas que trabajan en asuntos relacionados al cambio climático, además del fomento al desarrollo de estrategias, incentivos y gestión de la información para promover la carbono neutralidad.

En cuanto a la innovación de productos, materiales y servicios, se busca impulsar la innovación dentro del sector de la construcción, de forma tal que los productos y servicios sean bajos en carbono y cumplan con un marco regulatorio que a su vez tenga estándares más estrictos en temas de la carbono neutralidad de los que se pueden encontrar actualmente.

Finalmente, el eje de concientización transversal busca lograr un cambio cultural con respecto a la visión del impacto ecológico que debe tener un proyecto de construcción, de forma tal que los consumidores demanden proyectos con bajas emisiones de carbono. El nivel de concientización que se busca alcanzar afectaría a todos los niveles de la sociedad, desde estudiantes y académicos, hasta la ciudadanía en general.

Capítulo 6

Metodología para la cuantificación de la huella de carbono

Siguiendo los lineamientos planteados en estrategia nacional de huella de carbono, se busca plantear una metodología para la cuantificación de la huella de carbono de un determinado proyecto de construcción. Para lograr lo anterior se mencionará en primer lugar una serie de metodologías consultadas que incursionan en el tema y que sirven como marco de referencia para la elaboración de la metodología.

6.1. Metodologías de referencia

6.1.1. Calculadora de CO_2 para hormigones - FICEM

La Federación Interamericana del Cemento (FICEM) es una asociación de empresas, industrias e institutos relacionados al cemento pertenecientes a América Latina, El Caribe, España y Portugal. Tiene como principal objetivo fomentar la divulgación de materias relacionadas al cemento y al cambio climático, además de promover el uso de buenas prácticas para el uso del cemento.

Durante el año 2020, FICEM desarrollo una calculadora de CO_2 enfocada principalmente en el cemento y el hormigón. Hoy en día, la calculadora solo estima las emisiones de CO_2 para las etapas de fabricación de materiales (áridos y cemento), hasta la colocación del hormigón en obra. Sin embargo, a futuro se espera cubrir las etapas restantes del ciclo de vida de un proyecto de edificación/infraestructura.

Para el cálculo, se utiliza una base de datos construida con información de 5 países, contrastando datos y de esta forma entregando la huella de carbono. Los insumos principales que se utilizan, son las especificaciones técnicas del hormigón y la distribución de la mezcla utilizada para su fabricación. De esta forma, la calculadora tiene en cuenta las características propias que diferencian a cada hormigón, como puede ser la cantidad de áridos utilizados en la mezcla. Del mismo modo, se reflejaría en el cálculo de la huella de carbono una variación en las cantidades de los componentes de la mezcla.

La calculadora entrega además un detalle de la participación de cada proceso que emite CO_2 en la huella de carbono total del hormigón, como pueden ser CO_2 por procesamiento,

CO_2 por conceptos de transporte de cemento, CO_2 por concepto de transporte de áridos, CO_2 por consumo de energía eléctrica, etc. [28]

6.1.2. ABACO Chile

ABACO Chile nace con el objetivo de crear una plataforma web pública, gratuita y de libre acceso, que funcione como una base de datos de costos e indicadores ambientales, de forma tal que facilite la toma de decisiones al momento de postular y evaluar proyectos de construcción tanto del sector público como privado.

Las bases de datos presentes en la plataforma se dividen principalmente en dos categorías: actividades y recursos. Dentro de la base de datos de actividades, se encuentra una gran cantidad de actividades relacionadas con el sector de la construcción, con informaciones como costo económico, costo social, unidad de medida y los respectivos criterios utilizados para la determinación de los valores antes mencionados.

Por otro lado, la base de datos de recursos incluye mano de obra, materiales, máquinas y equipos y finalmente indicadores ambientales. Exceptuando a los indicadores ambientales, el resto de las categorías presentes en esta base de datos, contienen información acerca de unidades de medidas, costo base, factor social y especificación técnica.

Dentro de los indicadores ambientales disponibles en las bases de datos de ABACO Chile se encuentra consumo eléctrico (kWh/UF), consumo gas natural (MJ/UF), consumo fuel oil (MJ/UF), consumo diésel (MJ/UF), consumo kerosene (MJ/UF), consumo carbón (MJ/UF), consumo coque (MJ/UF), consumo biomasa (MJ/UF), uso de agua (m³/UF) y un factor de conversión de unidades (unid. costo/unid. funcional).

Finalmente, dentro de las principales funciones que tiene la plataforma web ABACO Chile, además de la base de datos antes mencionado, es la opción de *Presupuestador*, la cual permite crear una serie de presupuestos para un determinado proyecto, entre los que se incluyen: costos, carga ambiental, leyes sociales, gastos generales, recursos, entre otros [1].

6.1.3. Herramienta de cálculo y evaluación (CAT) de Level(s)

Dentro de la unión europea, existe un marco evaluativo e informativo, destinado a contribuir en la sustentabilidad del sector de la construcción, principalmente en edificación. Esta dividido principalmente en tres áreas, cada una con sus objetivos propios: Uso de recursos y rendimiento medioambiental durante el ciclo de vida de un edificio; salud y comodidad, y coste, valor y riesgo.

Para realizar la evaluación, Level(s) realiza un análisis de ciclo de vida. El nivel de detalle que se puede alcanzar con esta metodología depende del nivel o etapas del ciclo de vida que se desea evaluar en el proyecto. Se diferencian principalmente tres niveles, concepto del proyecto de construcción, etapas de diseño y construcción y, finalización y entrega al cliente. [25]

En total se trabaja con 16 indicadores agrupados en 6 macroobjetivos alineados a las 3 áreas que se mencionaron anteriormente. El primer macroobjetivo se demonina " emisiones

de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de un edificio” y tiene asociados 2 indicadores: eficiencia energética en la fase de uso (kWh/m²/año) y potencial de calentamiento global durante el ciclo de vida (kg eq CO₂/m²/año). Es justamente este último indicador al que se le puede denominar evaluación de huella de carbono, asociando estas emisiones principalmente a carbono incorporado. ^[18]

Con respecto al segundo macroobjetivo, este corresponde a ”ciclos de vida de los materiales circulares y que utilizan eficientemente los recursos”, en este caso se disponen de indicadores y herramientas sobre el ciclo de vida, entre las que se encuentran: lista de materiales de construcción; escenarios sobre la vida útil del edificio, su adaptabilidad y su deconstrucción; residuos y materiales de construcción y demolición (kg residuo/m²), y por último análisis del ciclo de vida de la cuna a la tumba.

El tercer macroobjetivo se denomina “empleo eficiente de los recursos hídricos”, de donde solo existe un indicador: consumo total de agua medido en m³ de agua por ocupante y año. El cuarto macroobjetivo corresponde a “espacios saludables y cómodos”, con dos indicadores asociados: calidad del aire en interiores y tiempo fuera del margen de bienestar térmico.

El quinto macroobjetivo nombrado “adaptación y resiliencia al cambio climático”, el cual tiene como único indicador/herramienta: escenarios de previsión de futuras condiciones climáticas. Finalmente, el último macroobjetivo corresponde a “optimización del coste del ciclo de vida y del valor”, cuyos indicadores asociados son: coste del ciclo de vida (EUR/m²/año) y creación de valor y factores de riesgo.

Cada uno de los indicadores y herramientas de medición mencionadas se definen con alcances, enfoques y metodología de cálculo, en conjunto con un análisis que incluye la importancia de su estudio y sus posibles aplicaciones en la industria de la construcción. ^[19]

6.1.4. Desempeño ambiental de edificios, MPG

Desde Amsterdam, el grupo de organizaciones denominada Metabolic que tiene como propósito ayudar en la transición de la economía global a un modelo sustentable, plantea una serie de criterios, metodologías e indicadores para poder medir la circularidad en la industria de la construcción, esta información se encuentra en el documento llamado “*Roadmap Circular Land Tendering, An introduction to circular building project*”^[32].

Los criterios que se definen para la construcción circular se separan en cinco grupos distintos: Materiales, Adaptabilidad y resiliencia, Agua, Energía y finalmente Ecosistemas y biodiversidad. Cabe mencionar que algunos de los criterios pueden recibir una calificación cualitativa o cuantitativa, dependiendo de la dificultad en el acceso a la información se tenga al momento de medir estos criterios (por ejemplo, algunos de ellos se deben medir al final del ciclo de vida útil del edificio). En su totalidad, se obtienen 32 criterios distintos, los que se mencionan a continuación:

- **Materiales:**

1. Uso de materiales durante su vida útil

2. Impacto ambiental de los materiales utilizados (Desempeño ambiental de edificios mediante la puntuación del indicador MPG)
3. Diseño para desmontaje
4. Reutilización teórica de materiales con una calidad equivalente
5. Uso de materiales secundarios para la construcción
6. Reutilización de suelos durante la fase de construcción
7. Política de contratación circular
8. Certificación de materiales
9. Uso y captura de materiales escasos y críticos
10. Uso de materiales renovables
11. Pasaporte de materiales
12. Puntuación total de materiales circulares

- **Adaptabilidad y resiliencia**

1. Reducción de la dependencia de materiales externos y flujos de energía
2. Edificios resistentes al clima
3. Integración en el desarrollo urbano
4. Diseño flexible, redundante y adaptativo
5. Sistemas de gestión de información

- **Agua**

1. Reducir la demanda de agua
2. Recuperación de aguas grises y pluviales
3. Recuperación de recursos de aguas residuales
4. Existencia de un sistema de gestión de agua, con seguimiento y retroalimentación
5. Diseño a prueba de lluvia

- **Energía**

1. Eficiencia energética
2. Energía incorporada
3. Cascada de energía
4. Energía renovable
5. Igualación de energía
6. Retroalimentación de desempeño
7. Contratación con desempeño energético

- **Ecosistemas y biodiversidad**

1. Impactos incorporados en la biodiversidad

2. Servicios ecosistémicos
3. Mejorar la biodiversidad local

Para el caso del criterio *Impacto ambiental de los materiales utilizados (EIPM)*, el documento ofrece una puntuación basada en el cálculo del desempeño ambiental de edificios (MPG), tomando como referencia un valor de 0.70 euros por GFA m^2 al año. Cabe mencionar que este valor se obtiene exclusivamente en base al contexto socioeconómico de los países bajos. De esta forma, el criterio puede obtener el siguiente puntaje:

Considerando el valor de referencia, si el cálculo de MPG es:

- ≤ 10 % del valor de referencia, es ≥ 0.63 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 10 puntos
- ≤ 20 % del valor de referencia, es ≥ 0.56 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 25 puntos
- ≤ 30 % del valor de referencia, es ≥ 0.49 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 40 puntos
- ≤ 40 % del valor de referencia, es ≥ 0.42 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 60 puntos
- ≤ 50 % del valor de referencia, es ≥ 0.35 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 80 puntos
- > 50 % del valor de referencia, es ≥ 0.35 euros por GFA m^2 al año \rightarrow 100 puntos

Para obtener el Desempeño ambiental de edificios (MPG), el Nationale Milieu Database dispone de una serie de documentos en donde se describe la metodología a seguir. Estos documentos corresponden a la Guía para cálculos de desempeño ambiental ^[38], Reglas de cálculo y lineamientos para el Desempeño ambiental de edificios. Parte 1: Explicación del método de cálculo para los instrumentos de cálculo validados ^[39] y Reglas de cálculo y lineamientos para el Desempeño ambiental de edificios. Parte 2: Instrucciones para la implementación del software de la determinación del desempeño ambiental ^[40]. Todos ellos disponibles únicamente en idioma neerlandés.

A continuación, se describe a grandes rasgos la metodología planteada en estos documentos, tomando en cuenta que para obtener el valor de MPG se debe recurrir al software que se describe en dichos documentos, el cual se encuentra patentado y requiere del pago de una tarifa para poder ser utilizado. Además de utilizar una base de datos con información perteneciente y representativa de los países bajos.

A la fecha, el método descrito se centra en edificaciones nuevas, sin embargo, se reconoce la importancia de tomar medidas para hacer más sostenible al parque inmobiliario existente.

La metodología separa el cálculo de MPG en 3 pasos, comenzando en el impacto por unidad de producto, impacto de la estructura y finalmente el impacto ambiental de la construcción, el cual corresponde a la suma de todos los productos calculados inicialmente. Se menciona además que los productos pueden ser tanto objetos tangibles como actividades, y se dividen en tres categorías, dependiendo del origen de la información de los datos que contengan.

La categoría 1 está destinada a datos suministrados por fabricantes y proveedores y que se encuentran verificados y calificados por la Fundación Nacional de Base de Datos Ambientales

(NMD), la categoría 2 agrupa a los datos sin marca, que se encuentran verificados por un tercero y calificados por NMD. Finalmente, la categoría 3 corresponde a datos que no se encuentran ni verificados ni patentados, y a los que se les aplica un incremento del 30 % durante el cálculo del indicador de costo ambiental (MKI) debido a que los datos se consideran inexactos.

A nivel de producto, se debe calcular el indicador de costo ambiental (MKI) el que corresponde al impacto ambiental de una unidad de producto durante todo su ciclo de vida, de esta forma se consideran las cantidades de producto iniciales y aquellas unidades de producto que son reemplazadas durante el ciclo de vida del producto.

Para este cálculo, se separa el análisis en las etapas del ciclo de vida que se pueden apreciar en la Figura 5.1, es decir: producto, construcción, uso-mantenimiento y fin de vida útil. Para cada una de estas etapas se debe calcular en primer lugar un factor de escala y determinar el número de unidades del producto.

El factor de escala depende de las dimensiones que tenga el producto, y se compara con las dimensiones estándares que se tengan en la base de datos. Existen cuatro casos distintos para la escala de un determinado producto, de forma que los datos deben ser ajustados a uno de estos casos al momento de utilizar la metodología. Estos casos corresponden a:

1. Sin escala, en cuyo caso el factor de escala SF_{ps} toma el valor de 1.
2. Escala lineal, en donde se determina en primer lugar SD_{ps} como $c_1 \cdot dim + c_2$
3. Escala exponencial, en donde se determina en primer lugar SD_{ps} como $c_1 \cdot \exp\{c_3 \cdot dim\} + c_2$
4. Escala logarítmica, en donde se determina en primer lugar SD_{ps} como $c_1 \cdot \ln dim + c_2$

En todos los casos c_1 y c_2 corresponden a constantes. Posteriormente, el factor de escala para los casos 2, 3 y 4 se calcula como $SF_{ps} = SD_{ps}/SD_{psref}$, con SD_{psref} el valor de escala de referencia del producto.

Para el caso de la determinación del número de unidades del producto Q_{on} , esta se obtiene multiplicando el factor de escala SF_{ps} por el número de unidades que se tengan registradas en la base de datos. En el caso de los productos de categoría 3, se debe aplicar un aumento del 30 %, tal como se mencionó anteriormente.

Una vez calculados los datos iniciales, se procede a calcular el indicador de costo ambiental (MKI) para cada etapa del ciclo de vida. La primera etapa denominada *Producto*, esta subdividida en tres fases: A1. Suministro de materias primas, A2. Transporte y A3. Fabricación/manufactura. Únicamente en esta etapa, el impacto ambiental se calcula considerando conjuntamente las tres fases mencionadas anteriormente.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo se muestran a continuación, en donde el cálculo inicial se basa en la puntuación de impacto ambiental que tenga dicho producto $MA1 - 3_{ps}$.

$$\bullet MA1 - 3_{on} = \sum_{ps_i} MA1 - 3_{ps} \cdot Q_{on} \cdot H$$

- $MA1 - 3_{pr} = \sum_{on_i} MA1 - 3_{on}$
- $MKI - A1 - 3_{pr} = \sum_{mi_k} MA1 - 3_{pr} \cdot W_m$

En donde, Q_{on} corresponde al número de unidades del producto, H al factor de reutilización que equivale a 0.20 si existe una reutilización no prevista del producto y 1.00 en caso contrario. Finalmente, W_m corresponde al factor de ponderación de la categoría de impacto ambiental.

En este punto es necesario mencionar que, para el resto de las etapas y fases del ciclo de vida, las ecuaciones del cálculo del impacto ambiental son análogas a las mostradas anteriormente, en donde los valores de $MA1 - 3_{ps}$ y W_m obtienen valores específicos de acuerdo a la etapa del ciclo de vida que se esté analizando.

La siguiente etapa que se debe analizar corresponde a *Construcción*, la que a su vez se encuentra subdividida en dos fases: A4. Transporte y A5. Proceso de construcción e instalación. A diferencia del caso anterior, cada fase debe ser analizada por separado. En ambos casos se deben tener en consideración los desechos que se generen, por lo demás las ecuaciones utilizadas son análogas al de la etapa de *Producto*.

La tercera etapa del ciclo de vida denominada *Uso-Mantenimiento*, se encuentra subdividida en siete fases: B1. Uso, B2. Mantenimiento, B3. Reparación, B4. Reemplazo, B5. Renovación, B6. Uso de energía en servicio y B7. Uso de agua en servicio. Cada una de estas fases se debe trabajar por separado y en cada uno de ellos es necesario plantear escenarios, debido a que los impactos ambientales que generan se encuentran alejados de la etapa del proyecto en el cual se calculan.

En la fase B1. Uso, se deben considerar todas las emisiones que sean liberadas por el producto durante el ciclo de vida del producto. Del mismo modo la fase B2. Mantenimiento, considera todos los residuos que se generen producto del mantenimiento de la estructura y que tengan relación con el producto que se está estudiando, a lo largo de todo el ciclo de vida.

Por otro lado, la fase B3. Reparación corresponden a una serie de actividades que son difíciles de predecir durante la fase de diseño del edificio, por lo que es posible tomar un número promedio de reparaciones que se deben efectuar durante la vida útil del producto. Lo mismo aplica para la fase B4. reemplazo, en donde el producto en cuestión debe ser reemplazado por un producto de similares características.

Nuevamente, para todas las fases mencionadas anteriormente, el cálculo del impacto ambiental tiene ecuaciones análogas las mostradas en la Fase A1, con los valores respectivos de las variables $MA1 - 3_p$ y W_m . El resto de las fases de la etapa de Uso-Mantenimiento (B5. Renovación, B6. Uso de energía y B7. Uso de agua), no son consideradas para el cálculo de impacto ambiental, ya sea por la dificultad en el planteamiento de escenarios, o porque no es posible ligarlos a un determinado producto (como es el caso del uso de energía y agua durante la vida útil del edificio).

La etapa final del ciclo de vida, denominada *Fin de vida útil*, se separa en cuatro fases: C1. Deconstrucción/Demolición, C2. Transporte, C3. Re-utilización/Reciclaje y C4. Disposición

final. Para todos los casos se considera únicamente la cantidad de producto que se encuentre presente en la respectiva fase, debido a los desechos por concepto de reparación o reemplazo deben ser considerados durante la etapa de uso. Nuevamente las ecuaciones son análogas al caso A1.

El impacto ambiental por unidad de producto MKI, se obtiene por la suma de los impactos ambientales de cada fase descrita anteriormente. En la metodología se describe además la opción de realizar una conversión en las unidades en las que se expresa el MKI a unidades de referencia, que faciliten la comparación con productos similares, para esto se utiliza un factor de conversión y el valor de la vida útil de la estructura.

Al momento de calcular el desempeño ambiental del edificio, se deben tener las mismas consideraciones que se tuvieron para cada producto, realizando la misma separación de las etapas del ciclo de vida, pero aplicándolas a la estructura completa. Es decir, tomando el ciclo de vida de la construcción y las cantidades de productos que son utilizadas en la estructura. Sin embargo, se debe tener en consideración los números de reemplazos de los productos que se producirán a lo largo de la vida útil de la estructura, debido a que con frecuencia sucederá que la vida útil del producto y de la estructura son completamente distintos, en donde por lo general el segundo será considerablemente mayor.

Para determinar el número de reemplazos simplemente se deben realizar la división entre los valores de ambas vidas útiles, es decir, vida útil producto/vida útil estructura, en donde por lo general se sugiere tomar dos cifras significativas.

De ahí en más, el análisis y cálculo es completamente análogo a lo descrito anteriormente, con la salvedad de que el valor de MPG al final de cada fase, corresponderá al valor de MKI normalizado por el valor de $A_b \cdot L_{bw}$, es decir, el producto de la superficie bruta y el valor de la vida útil de la estructura.

Finalmente, el valor del desempeño ambiental de la estructura corresponderá a la suma de todos los impactos ambientales obtenidos en cada fase.

6.2. Bases de la metodología

Como primer paso para plantear la metodología se definirán los alcances y limitaciones que esta tendrá, así como las normativas y variables a considerar, y los principales resultados que se esperan obtener.

Dentro de las limitaciones que tendrá la metodología que se planteará a continuación están las etapas del ciclo que se considerarán. Por simplicidad y disponibilidad de la información se considerarán únicamente las dos primeras etapas del ciclo de vida de una infraestructura, es decir, fabricación de materiales y proceso constructivo. Sin dejar de recordar que para determinar la huella de carbono de una estructura se debe realizar un análisis de ciclo de vida, lo que implica estudiar las cuatro etapas mostradas en la Figura 5.1.

Por otro lado, la metodología se trabajará únicamente de forma teórica, debido a que no se cuenta con datos concretos sobre emisiones de GEI de los distintos procesos involucrados en

la fabricación de acero y procesos constructivos, con los cuales realizar los cálculos concretos de la huella de carbono.

Al igual que en las metodologías mencionadas anteriormente, las principales normas que se deben considerar al momento del cálculo de la huella de carbono son las ISO 14040 e ISO 14044, en donde se plantea el marco de referencia y las directrices a seguir al momento de realizar un análisis de ciclo de vida. Por otro lado, se deben tener en consideración las disposiciones de ISO 14025 con respecto a las declaraciones ambientales de productos.

6.3. Identificación de GEI a tomar en cuenta

Entendiendo que existe una gran cantidad de gases de efecto invernadero que actualmente son liberados al medio ambiente, es que resulta necesario establecer cuáles de ellos serán considerados al momento de cuantificar la huella de carbono. Evidentemente el principal GEI que tiene que ser considerado es el dióxido de carbono CO_2 , pues es el que principalmente se emite por las distintas actividades y procesos que forman parte del ciclo de vida de un proyecto de construcción.

Por otro lado, debido a que una de las principales fuentes de emisiones de GEI que se pueden encontrar en el ciclo de vida corresponden al consumo de combustibles, es que se debe considerar dentro de los gases que contribuyen a la huella de carbono al metano, sobre todo considerando que la duración de este gas en la atmósfera es considerablemente mayor a la del CO_2 .

6.4. Identificación de fuentes de emisión

Dentro de las fuentes de emisión de GEI que se pueden encontrar en las etapas de fabricación de materiales y procesos de construcción se encuentran principalmente los consumos energéticos y emisiones por concepto de transportes de distintos insumos como materias primas, materiales, desechos, etc.

Para poder identificar todas las fuentes de emisiones de GEI se debe tener una clara noción de todos los materiales que se utilizarán para la materializar la estructura del proyecto. Para esto se debe contar con un listado de los materiales, en conjunto con las cantidades que se utilizarán de cada uno de ellos. Lo anterior generalmente se dispone a través de las cubriciones que se realizan en las etapas de diseño de la estructura.

Al haber identificado en su totalidad los materiales que se requieren para la construcción, se debe identificar, dentro de lo posible, la composición y especificación técnica de cada uno de ellos, de forma tal que se puedan identificar los procesos de fabricación y las posibles fuentes de emisiones de GEI presentes en cada uno de ellos.

Dentro de las fuentes de emisión que pueden ser transversales a cualquier material y proceso de fabricación se encuentran: consumo de energía eléctrica por planta, la cual se puede desglosar en consumo de energía eléctrica para maquinaria y energía eléctrica para el funcionamiento propio de la planta de producción, es decir, en actividades que no se encuentran directamente relacionadas con la producción de los materiales, como pueden ser oficinas, la-

boratorios, etc.

Otra de las fuentes de emisión que comúnmente se pueden encontrar, corresponden al consumo de combustibles por maquinarias que forman parte de la línea productiva de la planta. Finalmente, el consumo de combustibles por conceptos de transporte es otra de las grandes fuentes de emisión que comúnmente se pueden encontrar en los procesos de fabricación de materiales.

Quitando el consumo de energía eléctrica, los combustibles pueden llegar a ser la principal fuente de emisiones de GEI para las dos primeras etapas del ciclo de vida, debido a la gran variedad de transportes que se producen durante la producción de un determinado material: transporte de materias primas, transporte de equipos internos durante los procesos de producción y transporte de los materiales por conceptos de distribución.

Los procesos de construcción presentan fuentes de emisiones similares a las que se pueden encontrar en la etapa de fabricación de materiales, en donde se deben agregar transportes de los desechos que se generan durante la construcción de la estructura.

Cabe mencionar que, para la fase de uso, la que corresponde a la etapa de mayor duración del ciclo de vida, las principales emisiones de GEI que se pueden esperar son producto del consumo de energía eléctrica, para el caso de edificaciones se debe sumar además las emisiones producidas por los sistemas de ventilación y calefacción. Por lo que al momento de estudiar esta etapa es importante contar con un factor de conversión a carbono equivalente que permita transformar las cantidades de consumo a carbono equivalente.

6.5. Obtención de la información

Una vez que se ha identificado los gases de efecto invernadero que se deben medir y sus principales fuentes de emisión a lo largo del ciclo de vida de la estructura, se debe extraer datos concretos de estas emisiones o en su defecto, a realizar mediciones de estas emisiones.

En caso de que la obtención de alguno de las emisiones resulte muy difícil por su naturaleza o simplemente no sea posible acceder a la información pues esta proviene de un agente externo al realizador del cálculo de la huella de carbono, se puede optar por utilizar bases de datos que contengan la información necesaria, como puede llegar a ser el caso de ABACO Chile, que como se mencionó anteriormente cuenta con una serie de indicadores ambientales sobre distintas emisiones producidas por el consumo de distintos combustibles y fuentes de energía.

La calidad de los datos a utilizar para el cálculo determinará que tan exhaustivo puede llegar a ser el análisis del ciclo de vida. Por lo que se debe tener en cuenta una serie de variables acerca de la procedencia de los datos al momento de decidir si son aplicables al proyecto en cuestión.

En este sentido, la metodología Level(s) plantea una calificación para los datos basada principalmente en cuatro parámetros: representatividad tecnológica, geográfica, temporal y finalmente incertidumbre de los datos. Cuantificando cada uno de estos parámetros se puede

realizar una ponderación en base a la importancia que estos tienen para obtener un índice de calidad de datos ^[18].

Considerando lo anterior, al momento de escoger los datos a utilizar es deseable que estos provengan de mediciones directas y en segunda instancia de bases de datos provenientes de estudios ambientales o análisis de ciclos de vida de proyectos similares. Para el segundo caso, se buscará contar con bases de datos actualizadas y que provengan de regiones geográficas cercanas, lo anterior debido a que los marcos normativos propios de cada país pueden influir significativamente en la composición de distintos materiales o los procesos mismos de fabricación de estos.

6.6. Obtención de resultados

Una vez que se cuente con los datos necesarios se debe aplicar un modelo de cálculo adecuado para proceder a cuantificar la huella de carbono. En donde se debe tener en consideración que se debe separar la huella obtenida para cada etapa del ciclo de vida, con el propósito de identificar aquellas que mayor impacto tienen y por lo tanto enfocar la política y planes de acción en ellas.

Dentro de los datos que son pertinentes incluir como parte de los resultados, además del cálculo resultante de la huella de carbono, se encuentra la información acerca del modelo de cálculo utilizado y el origen de los datos utilizados, con el objetivo de transparentar la información y contribuir a la masificación del cálculo de la huella de carbono en el sector de la construcción.

Capítulo 7

Impacto del acero en Economía Circular en la Construcción

A continuación, se cuantificará el impacto que tiene el reciclaje del acero en la economía circular de la construcción. Para lograr lo anterior se utilizará información proveniente de las dos empresas con mayor producción de acero en la industria chilena, las cuales son AZA y CAP. Además, la medición de este impacto se centrará únicamente en las barras de acero, sin hacer distinción de los distintos tipos de barras que existen. Con el objetivo de contextualizar, se mencionarán las principales cifras relacionadas a la producción de las empresas antes mencionadas.

De acuerdo con la Memoria Integrada CAP ^[10] durante el año 2022 esta empresa tuvo 16,3 millones de toneladas en despachos de mineral de hierro, despachó 654 mil toneladas de acero y 294 mil toneladas de productos de acero procesado, la producción de este acero se basa en actividad siderúrgica utilizando como materia prima hierro, carbón y caliza. Para el año 2021 en cambio, la Memoria Integrada CAP ^[9] indica que hubo 16,2 millones de toneladas en despachos de mineral de hierro y 812,8 mil toneladas de acero y 357 mil toneladas de productos de acero procesado.

Además, se reporta una recuperación del 57% de agua en CSH, una reducción del 6% en su huella de carbono en comparación al año 2021, pasando de un total 28.063.038 ton CO₂e ¹ a 26.272.334 ton CO₂e. Por otro lado, la memoria reporta una generación de 373.343 toneladas de residuos, de las cuales 342.946 toneladas fueron enviadas a valoración. Del total de residuos generados un 1% corresponde a residuos peligrosos y el 93% de ellos fueron valorizados, mientras que el 99% del total restante fueron residuos no peligrosos y el 77% de estos fueron reciclados.

Con respecto a AZA, su Reporte de Sostenibilidad del año 2022 ^[6] indica que durante ese año se utilizó 497.581 toneladas de chatarra que fueron convertidas en acero, además el 21% de los residuos generados fueron llevados a valoración. Por otro lado, se produjo un total de 371.593 toneladas de acero laminados, de los cuales el 100% proviene de procesos de horno de arco eléctrico, es decir, no se utiliza carbón de coque durante el proceso productivo, tampoco

¹ El CO₂e es una medida de la huella de carbono, correspondiente a el potencial de calentamiento que tiene cada gas de efecto invernadero que se emite. Se agrupan todos los gases en un único valor equivalente al dióxido de carbono.

se utiliza mineral de hierro, pues el acero es producido por medio del uso de chatarra ferrosa reciclada. Para el año 2021 en cambio, el Reporte de Sostenibilidad ^[5] indica que se produjo un total de 456.019 toneladas de productos de acero laminado.

Sobre los residuos, AZA indica que para el año 2022 la totalidad de residuos generados fueron de 86.384 toneladas de los cuales un 7,7 % fueron residuos sólidos peligrosos, para el año 2021 la totalidad fue de 104.315 toneladas con un 8,3 % de residuos sólidos peligrosos. Finalmente, para el año 2022 las cifras de residuos totales generados fueron de 102.831 toneladas, de los cuales 7,8 % fueron peligrosos.

Las cifras de valorización, por otro lado, se encuentran separadas por plantas de producción, en donde la Planta Renca alcanza cifras de 96,1 %, 95,7 % y 94,7 % de valorización de desechos para los años 2020, 2021 y 2022 respectivamente. Durante estos mismos años, la Planta Colina alcanzó cifras de 15,3 %, 14,1 % y 20,9 % de valorización de desechos respectivamente.

En cuanto a emisiones, el reporte de sostenibilidad indica que la empresa emitió una totalidad de 47.252 ton CO₂e para el año 2022, además se indica que la intensidad de las emisiones de CO₂ fueron de 0,43 y 0,22 ton CO₂e por tonelada de acero producido, para los años 2021 y 2022 respectivamente. La disminución en la intensidad de las emisiones se debe principalmente a el uso de energía eléctrica de fuentes renovables, durante el año 2022.

Para conocer el impacto del acero en la Economía Circular en Econstrucción (ECC) es necesario tener el dato de cuanta chatarra se utiliza para las producciones mencionadas anteriormente. Para esto se recurrió a las Declaraciones Ambientales de Productos y las fichas técnicas disponibles en las respectivas páginas web de las empresas.

Respecto a CAP ^[24], las barras incluidas en la DAP son producidas por la Siderúrgica Huachipato, y corresponden a barras soldables, no soldables y de hormigón de alta resistencia, considerando una unidad declarada de 1 ton para cada barra. De acuerdo a lo indicado en la DAP, las barras son producidas por una mezcla de arrabio y chatarra recolectada post-consumo. La cantidad de chatarra representa un 24 % del peso total, el peso restante corresponde a arrabio.

Por el lado de AZA la DAP ^[23] indica que las barras de acero a las que se aplica esta DAP son barras de refuerzo en grados A440-280H y A630-420H. La unidad declarada corresponde a 1 ton de barra de refuerzo. Como materia prima se utiliza principalmente la chatarra ferrosa reciclada. Con respecto a la composición de las barras de acero, la *Ficha de Producto. Contribución a la Certificación Edificio Sustentable (CES)* ^[4] del año 2020, indica que la chatarra corresponde al 97,7 % del peso total de acero líquido, el resto corresponde a Ferroaleaciones (0,9 %), Carbón Escoria (0,7 %), Escoria Sintética (0,5 %) y Carbón Carburante (0,3 %).

Conocidas las cifras de producción y la cantidad de acero que es reutilizado por las empresas AZA y CAP, el siguiente dato que es necesario obtener corresponde a la cantidad total de acero que fue consumido durante los años 2021 y 2022. Para dicha información, se recurre a los datos entregados por ICHA en la sesión online de *Encuentros de Acero* del 11 de abril del 2023 ^[29], en donde se entregaron las cifras de consumo aparente de acero para los años 2018 a 2022.

De acuerdo con esta sesión, el consumo aparente corresponde a todos los productos acero resultantes de la producción local, junto a las importaciones y restando las exportaciones al extranjero, dentro de un determinado periodo de tiempo. De esta forma, durante el año 2021, el consumo aparente de acero fue de 3.287 mil toneladas, mientras que durante el año 2022 fue de 2.289 mil toneladas, mostrando una caída de 998 mil toneladas correspondientes a -30,4%. La Figura 7.1 muestra el consumo aparente de acero a lo largo de los años 2018 a 2022.

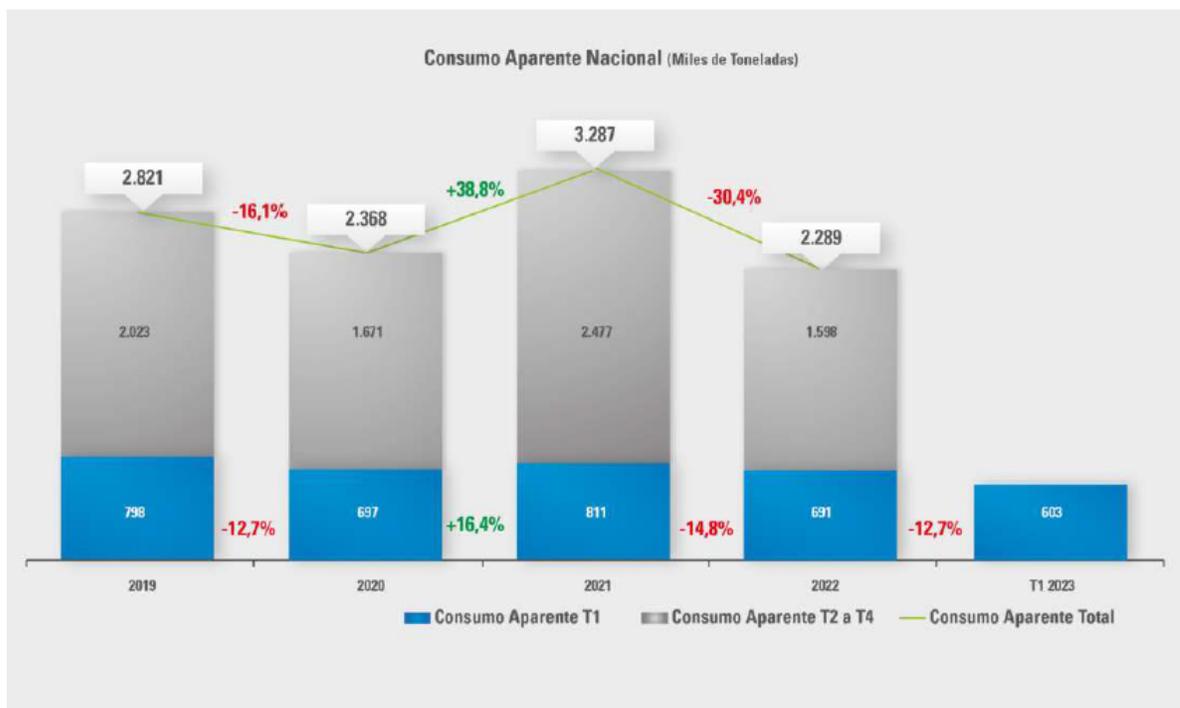


Figura 7.1: Consumo Aparente Nacional durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]

Debido a que los productos de acero producidos por AZA y CAP pueden ser catalogados principalmente como *Aceros Largos* (barras y perfiles), es que se mostrarán a continuación las gráficas de consumo aparente nacional de aceros largos (Figura 7.2), barras (Figura 7.3) y perfiles (Figura 7.4), mostradas durante la misma sesión mencionada anteriormente, con el objetivo de completar y tener un impacto mucho más acertado del reciclaje del acero en la economía circular en construcción.



Figura 7.2: Consumo Aparente Nacional de Aceros Largos durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]

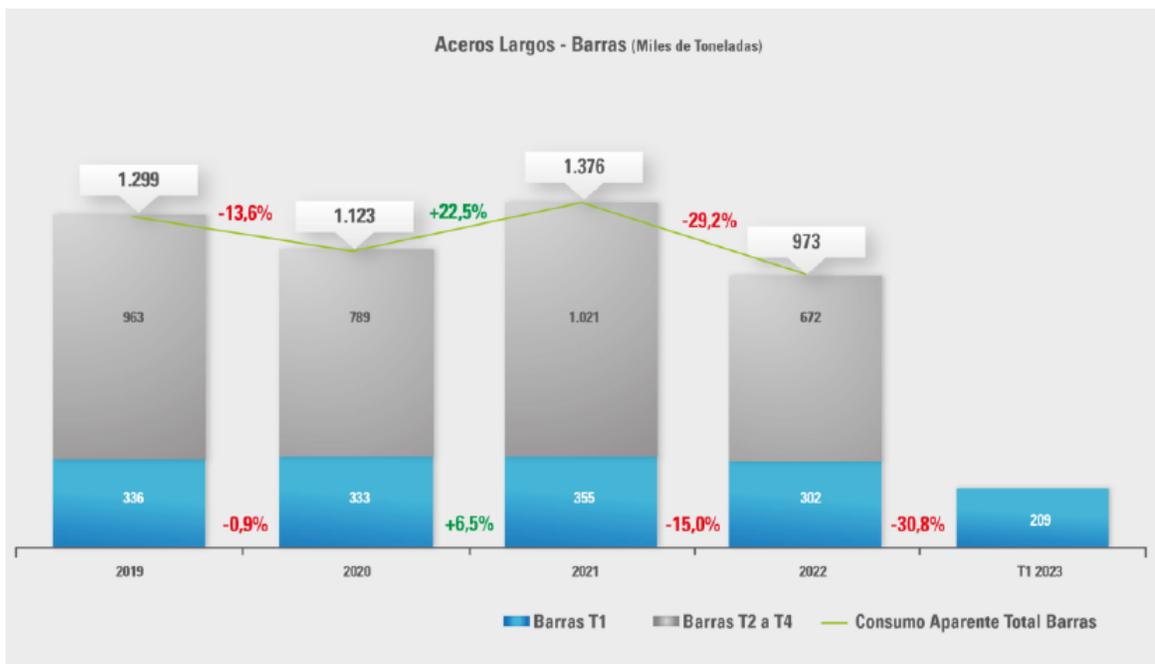


Figura 7.3: Consumo Aparente Nacional de Barras de Acero durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]



Figura 7.4: Consumo Aparente Nacional de Perfiles de Acero durante 2018 a 2023. Fuente: Informe de Acero Quinquenio 2019-2023. Instituto Chileno del Acero ^[29]

Considerando los datos anteriores, el impacto del acero reciclado en la economía circular en construcción puede ser cuantificado de forma porcentual, con los porcentajes de acero reciclado que son producidos por AZA y CAP, respecto del total de acero consumido durante un periodo de año, en este caso, para los casos 2021 y 2022. El resumen de estos datos se muestra en la Tabla 7.1, mientras que la Tabla 7.2 muestra la cuantificación de los impactos de forma porcentual, recordando que CAP utiliza un 24 % de chatarra reciclada en su producción, mientras que AZA utiliza un 97,7 % de chatarra ferrosa reciclada.

Tabla 7.1: Acero producido por AZA y CAP y consumo aparente durante 2021 y 2022 (miles de toneladas)

Variable	2021	2022
Acero producido por AZA	456	372
Acero producido por CAP	357	294
Consumo aparente	3.287	2.289
Consumo aparente aceros largos	1.518	1.082

Tabla 7.2: Impactos porcentuales de acero reciclado en el total de acero consumido y en los aceros largos (barras y perfiles)

Impacto	2021	2022
Impacto total de acero AZA	13,55 %	15,88 %
Impacto aceros largos AZA	29,35 %	33,59 %
Impacto total de acero CAP	2,61 %	3,08 %
Impacto aceros largos CAP	5,64 %	6,52 %

Las primeras conclusiones que son posibles extraer de las tablas mostradas anteriormente tienen relación con la disminución en todas las cifras de acero en el año 2022 respecto del año 2021, tal como se explica en la sesión *Encuentros de Acero* esto se debe a la recesión económica que actualmente afecta al país.

Por otro lado, es claro que la cantidad de productos de acero producidos por AZA es mayor a las de CAP, lo anterior se produce debido a que esta cifra solo considera los productos de acero procesado y tal como se mencionó anteriormente CAP tiene más productos de acero además de los productos procesados. En cuanto a los impactos, la diferencia tan gran entre ambas empresas se debe a que CAP solo utiliza un 24% de acero reciclado como materia prima, mientras que AZA esta cifra asciende al 97,7%.

Finalmente, es evidente que, aunque el impacto del acero reciclado aumentó desde el año 2021 a 2022 las cifras continúan siendo bajas, sobre todo para el caso del total de acero consumido. Y es que el análisis realizado corresponde únicamente a la industria nacional, considerando a las dos mayores productoras chilenas de acero, mientras que las cifras de consumo aparente de acero consideran las importaciones realizadas desde el extranjero, las que corresponden a la mayor parte del acero consumido en el país (cerca del 70% es acero importado).

Capítulo 8

Conclusiones

En conclusión, la aplicación de la economía circular aún presenta muchos desafíos que se deben afrontar para poder lograr una transición desde el modelo de producción lineal a uno circular. La gran parte de las hojas de ruta y planes de acciones que se revisaron durante la realización del presente trabajo de título, tienen lineamientos similares, es decir, plantear la recolección de información a corto plazo (ya sea de emisiones de GEI o generación RCD), para posteriormente plantear una línea base sobre la cual se determinan metas graduales a alcanzar a mediano y largo plazo. Buscando conseguir la menor cantidad de generación de residuos en el largo plazo y la carbono neutralidad para el sector de la construcción.

Dentro del campo regulatorio, la situación es un poco más complicada, sobre todo en Chile, pues existe muy poca normativa hoy en día que incluyan temas relacionados a economía circular. Más aún, existen normas que desincentivan la aplicación de conceptos con enfoques circular. Es justamente por esto que una parte importante de las hojas de ruta y planes de acción incluyen un trabajo conjunto de los actores involucrados en la industria para generar normativa al respecto. En este sentido, la serie de normas que actualmente se encuentran en anteproyecto suponen un gran paso para sentar las bases de la construcción circular.

En cuanto a las certificaciones de sustentabilidad es claro que la certificación chilena se encuentra bastante atrasada en los criterios que controla, a pesar de que existen varios aspectos de certificaciones internacionales que pueden ser incluidos hoy en día, la normativa vigente no cuenta con los incentivos necesarios para que estas variables sean controladas.

Uno de los criterios que más información proporciona y que permite un mejor control de los impactos ambientales que genera una estructura es el análisis de ciclo de vida de la estructura. En etapas tempranas permite generar indicadores como emisiones de desechos, gases de efecto invernadero, uso de energía y de agua, entre otros. Dicha información permite una mejor toma de decisiones y una mejor gestión de los recursos.

Por otro lado, una de las grandes oportunidades que existen actualmente para establecer líneas base de acción corresponden a los indicadores ambientales que se pueden extraer del análisis de ciclo de vida y la declaración ambiental de producto, destacando principalmente la medición de la huella de carbono de un determinado proyecto de construcción.

Tal como se observó anteriormente, las declaraciones ambientales de producto entregan

una serie de impactos ambientales como emisiones de gases de efecto invernadero, uso de agua, de distintos tipos de energía, generación de desechos, etc. Durante la realización de una DAP es necesario realizar un Análisis de ciclo de vida, este análisis permite separar los impactos ambientales y obtenerlos para cada uno de los módulos que componen el ACV. Esto último permite tener una mayor precisión al momento de determinar cual es la etapa que genera mayores impactos y, por lo tanto, enfocar las gestiones en dichas etapas.

Lo anterior es un claro incentivo para incluir las DAP como requisito de las licitaciones de proyectos de construcción. Debido a que permite el control y monitoreo de variables importantes para la economía circular y facilita la creación de indicadores ambientales. Además, gran parte de la industria de productos de acero hoy en día cuenta con DAP vigentes y acreditadas internacionalmente.

A pesar de lo anterior, no existen metodologías establecidas universalmente que permitan calcular la huella de carbono de una infraestructura. Más aún, el cálculo de este y otros indicadores hoy en día tienen un carácter opcional, a pesar de las grandes ventajas que proporcionan en el camino hacia la transición de una economía circular.

Considerando lo anterior, es que se plantea generar una metodología que permita calcular la huella de carbono de un proyecto de construcción. Por la dificultad en la accesibilidad de datos concretos sobre emisiones de GEI es que solo se plantea la metodología de forma teórica y solo se estudian las dos primeras etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción. Reconociendo para el cálculo completo de la huella de carbono se deben estudiar todas las etapas del ciclo de vida.

Ante esto es que una posible continuación del trabajo presente podría consistir en la obtención de datos de emisiones de GEI, actualizando la base de datos de ABACO Chile (pues esta se encuentra actualizada al año 2019), o generando una nueva base de datos enfocada únicamente en los estudios ambientales.

Por otro lado, la extensión de la metodología también representa una oportunidad de estudio, analizando los distintos consumos de energía durante el periodo de uso y obteniendo factores de conversión para traducir los consumos de energía en emisiones de carbono equivalente. Finalmente, en la etapa de fin de vida útil se abre la posibilidad de estudiar cómo afectan las distintas disposiciones que puede tener un determinado material en el cálculo de la huella de carbono, como puede ser los procesos de reutilización, reciclaje o la disposición final en vertederos/rellenos sanitarios.

En este sentido, la metodología descrita en los documentos de Ámsterdam tratados en la sección 6.1.3 son una buena base para el desarrollo de nuevas metodologías y puede ser extrapoladas y adaptadas a distintos países con la ayuda de bases de datos lo suficientemente completas como para poder representativas del panorama propio de cada país.

Finalmente, el estudio del impacto del reciclaje del acero también abre la posibilidad a nuevos estudios. Con información más precisa de las cantidades de acero generado es posible profundizar mucho más en el análisis, debido a que las cifras encontradas en las memorias integradas y reportes de sostenibilidad solo hablaban de producción general y no se especifi-

caba cuanta de la producción pertenecía a barras de acero o perfiles estructurales.

Dentro de estos nuevos estudios se encuentra, por ejemplo, el análisis de casos prácticos como puede ser el caso de naves industriales o viviendas sociales. Contando con planos y cubicaciones de casos tipo es posible determinar la cantidad de acero que se utiliza para la construcción de estas estructuras y, junto con cifras de edificación anual, es posible determinar el impacto que tiene el acero reciclado en determinadas estructuras.

Dicho estudio se puede profundizar en base al tipo de producto acero utilizado, es decir, barras o perfiles, siempre y cuando se cuente con las cifras de producción anual de las empresas antes mencionadas. Además, es posible complementar el análisis con el estudio de las importaciones internacionales, incluyendo la cantidad de acero reciclado que se utiliza en la producción de estos aceros importados y determinando su impacto en estructuras típicas como viviendas sociales y en la industria del acero nacional.

Bibliografía

- [1] ABACO Chile (2018). Acceso bases ambientales y costos. Recuperado de <http://abacochile.cl>.
- [2] Alemany, D. (2021). Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en los edificios. *Green Building Council España*.
- [3] AZA (2019). Reporte de sostenibilidad. page 79.
- [4] AZA (2020). Ficha de producto. contribución a la certificación edificio sustentable (ces).
- [5] AZA (2021). Reporte de sostenibilidad. page 10.
- [6] AZA (2022). Reporte de sostenibilidad. pages 12,28.
- [7] BRE Global Ltd (2021). Breeam international new construction - technical manual sd250. 6,0.
- [8] Cabrera, F. (2021). Economía circular: conceptos y referencia legislativa sobre residuos domésticos en la Unión Europea y China. Biblioteca del Congreso, Asesoría Técnica Parlamentaria.
- [9] CAP (2021). Memoria integrada cap. page 11.
- [10] CAP (2022). Memoria integrada cap. page 16.
- [11] CAP Acero (2021). Memoria integrada 2021. page 77.
- [12] Certificación Edificio Sustentable (2022). Manual de evaluación y calificación. v1.1.
- [13] Comisión Europea (2020). Nuevo Plan de acción para la economía circular, por una Europa más limpia y más competitiva.
- [14] Construye 2025 (2020). Hoja de Ruta RCD. Economía circular en construcción 2035.
- [15] Corporación de desarrollo tecnológico (2020). Gestión de residuos para mejorar la productividad en la empresa. Ediciones Técnicas(15).
- [16] Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción (2020). Introducción a la economía circular en la construcción. Diagnostico y oportunidades en Chile.
- [17] DGNB GmbH (2020). Dgnb system - new construction, buildings criteria set. versión 2020 international.
- [18] Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M., and Donatello, S. (2017a). Level(s): el marco común de la ue de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de oficinas. parte 3.
- [19] Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M., and Donatello, S. (2017b). Level(s): el marco común de la UE de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de

- oficinas. Partes 1 y 2s.
- [20] Ellen MacArthur Foundation (2015). Growth within: a circular economy vision for a competitive europe.
- [21] Ellen MacArthur Foundation (2020a). Circular economy principle: Circulate products and material. recuperado de <https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials>.
- [22] Ellen MacArthur Foundation (2020b). What is circular economy. recuperado de <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>.
- [23] EPD International AB (2022). Declaración ambiental de producto. de acuerdo con iso 14025 y en 15804:2012+a2:2019 para: Barras de refuerzo de acero de aza.
- [24] EPD International AB (2023). Declaración ambiental de producto. en línea con iso 14025 y en 15804:2012+a2:2019 para: Barra de refuerzo (barras de hormión soldables, no soldables y de alta resistencia). de compañía siderúrgica huachipato.
- [25] European framework for sustainable buildings. Level(s). Recuperado de https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en.
- [26] Gervásio, H. (2014). La sustentabilidad del acero y las estructuras metálicas.
- [27] Green Building Council Chile y CTEC Innovación en la Construcción (2023). Pasaportes de Materiales: Qué son, Cómo Funcionan y su Importancia en la Industria. Recuperado de <https://pasaportemateriales.cl/noticias-detalle.html?id=23>.
- [28] Hormigón al Día (2021). Calculadora 3C: Conociendo la huella de CO_2 final del hormigón colocado en obra. Recuperado de <https://hormigonaldia.ich.cl/novedades-tecnologicas/calculadora-3c-conociendo-la-huella-de-co2-final-del-hormigon-colocado-en-obra/>.
- [29] Instituto Chileno del Acero (2023). Informe de acero quinquenio 2019-2023. consumo aparente de acero en chile, enero-mayo 2023. Mayo.
- [30] ISO. 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [31] ISO. 14044. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [32] Metabolic (2019). Roadmap circular land tendering.
- [33] Ministerio del Medio Ambiente (2016). Ley 20.920 - establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. recuperado de <https://bcn.cl/2f7b2>.
- [34] Ministerio del Medio Ambiente (2021a). Hoja de Ruta RCD para un Chile circular al 2040.
- [35] Ministerio del Medio Ambiente (2021b). Huella de carbono. Recuperado de <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>.
- [36] Ministerio del Medio Ambiente (2021c). Informe del estado del medio ambiente, Capítulo 10 Residuos.
- [37] Ministerio del Medio Ambiente (2021d). Ley 21.305 - sobre eficiencia energética. recuperado de <https://bcn.cl/2nn0z>.
- [38] Nationale Milieu Database (2020). Guide to environmental performance calculations.

- [39] Nationale Milieu Database (2021a). Rekenregels en richtlijnen bepaling milieuprestatie bouwwerken deel 1: Toelichting op de berekeningswijze bij de gevalideerde rekeninstrumenten.
- [40] Nationale Milieu Database (2021b). Rekenregels en richtlijnen bepaling milieuprestatie bouwwerken deel 2: Instructies voor de softwarematige implementatie van de milieuprestatiebepaling. versie 1.0.
- [41] OECD (2021). The oecd inventory of circular economy indicators.
- [42] Ossio, F. and Faúndez, J. (2021). Diagnóstico nacional de sitios de disposición ilegal de residuo. reporte nro. 1.
- [43] Ramos, C., de León., A., D’alencon, R., Ahumada, M., Saintard, R., and Ossio, F. (2021). Economía circular en la construcción: estrategias de regulación y herramientas de diseño arquitectónico.
- [44] Ramos, C., de León., A., D’alencon, R., Ahumada, M., Saintard, R., and Ossio, F. (2022). Políticas para la implementación de una estrategia circular en la construcción.
- [45] República de China (2008). Circular Economy Promotion Law of the People’s Republic of China. Recuperado de <http://www.lawinfochina.com/display.aspx?id=7025&lib=law>.
- [46] Secretaría Técnica del comité Huella de Carbono (2021). Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector de la Construcción.
- [47] Stiebert, S., Echeverría, D., Gass, P., and Kitson, L. (2019). Emission Omissions: Carbon accounting gaps in the built environment. *International Institute for Sustainable Development*.
- [48] Unión Europea (2008). Directiva 2008/98/ce del parlamento europeo y del consejo de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas directivas. recuperado de <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
- [49] U.S. Green Building Council (2013). Reference guide for building desing and construction. 4.
- [50] World Green Building Council. Sustainable Building Certifications. Recuperado de <https://worldgbc.org/sustainable-building-certifications/s>.
- [51] World Steel Association (2022). Our performance: Sustainability Indicators. Recuperado de <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators/>.