



UNIVERSIDAD
MAYOR

para espíritus emprendedores

Facultad de Ciencias

**INGENIERÍA
EN CONSTRUCCIÓN**

**EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE LA UTILIZACION DE ELEMENTOS
GEOPOLIMÉRICOS COMO REEMPLAZO DEL CEMENTO EN LA
CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE CICLO
DE VIDA Y DESEMPEÑO AMBIENTAL.**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:

Nicolás Claudio Peredo Córdova

Profesor Guía:

Francisco Sanhueza Duran

Fecha:

Abril, 2024

Santiago, Chile

DEDICATORIA (OPCIONAL)

Esta tesis, va dedicada a toda la gente que me apoyo en este proceso. En especial a mi familia. Mis padres que me escucharon y dieron apoyo todo el tiempo, a mis gatas que me acompañaron todos los días de trasnoche.

Esta victoria me la dedico a mí, por todo el esfuerzo puesto para sacar adelante la carrera a pesar de todos los obstáculos que se presentaron a lo largo de este camino. Un dicho dice, uno se cae, pero se levanta con más fuerza, y fue así, se pudo llegar a la etapa final. Fue un largo, lindo y sacrificado camino, pero finalmente se logró y espero poder ser un gran profesional, en este hermoso y sacrificado rubro como lo es la construcción.

Finalmente, se la dedico a todos mis futuros colegas, diciéndoles que nada es imposible, todo se puede en esta vida y este es un paso más.

SOLO USO ACADÉMICO

AGRADECIMIENTOS (OPCIONAL)

Quiero agradecer nuevamente a mi familia, en especial a mi padre y hermana quienes me prestaron sus oídos para poder explicar y lograr desenvolverme en esta tesis. También agradecer a una persona especial que llegó este último tiempo, quien me daba ánimo y me escuchaba por las noches.

Agradecer a aquellas personas que se cruzaron en mi vida en la etapa universitaria y aportaron un granito de arena en cada encuentro. No fue una etapa fácil, fue una etapa llena de obstáculos que finalmente se logró superar.

También agradecer al profesor Francisco Sanhueza quien a pesar de las circunstancias en la que se encontraba, por los procesos que estaba pasando y con una agenda muy ocupada, se dio el tiempo para ayudarme y guiarme en este camino largo y difícil.

SOLO USO ACADEMICO

RESUMEN

El Hormigón es uno de los materiales más utilizados y a la vez uno de los más contaminantes, dado a sus procesos, los cuales emana una cantidad significativa de CO₂. Por esto se realizó un enfoque comparativo de Ciclo de Vida y desempeño ambiental del Hormigón Geopolimérico, que subsanaría las emanaciones del Hormigón Convencional, aportando a la economía circular y gestión de residuos. Para eso fue necesario identificar y sintetizar los requerimientos que constituyen la elaboración del Hormigón con ceniza volante a través de un levantamiento de información de su norma NCh 3520.

La cuantificación de la Huella de Carbono de los Ciclos de Vida determinados de los hormigones “de la cuna a la puerta”, tiene como factor el kg de CO₂eq y son consecuencia de bases de datos y documentos de literatura que hacen que los resultados sean verídicos y fiables al momento de obtener los antecedentes e información para su desarrollo, la cual se guía bajo a la referencia de un documento del Departamento de Medio Ambiente del País Vasco y normas ISO. Estos hormigones se distribuyeron en Etapa 1 (Hormigón Convencional) y Etapa 2 (Hormigón Geopolimérico), conforme a sus determinados procesos, se cuantifico cada resultado, se analizó y se evaluó a través de distintos criterios. En conjunto, se realizó un indicador que valorizó los impactos y el nivel de contaminación para que finalmente se concluyera con una comparación y una propuesta dado los resultados obtenidos.

Producto a los resultados favorables para el Hormigón Geopolimérico se interpretó que para el caso de 1m³, el Hormigón Convencional libera un 35% más que el Hormigón con Ceniza Volante.

Por efecto, la Ceniza Volante en el Hormigón es una alternativa más sostenible y duradera al Hormigón Convencional. Su producción genera una menor emisión de CO₂ y además su capacidad de reciclaje y su durabilidad lo convierten en una opción prometedora para la construcción de infraestructuras sostenibles en el futuro.

Palabras Claves: Ceniza Volante, Ciclo de Vida, Hormigón Geopolimérico, Huella de Carbono.

SUMMARY

Concrete is one of the most used materials and at the same time one of the most polluting, given its processes which emit a significant amount of CO₂. For this reason, a new comparative approach to the life cycle and environmental performance of Geopolymeric Concrete is proposed, which would be able to correct the emissions of Conventional Concrete, contributing to the circular economy and waste management. For this it was necessary to resort to, identify and synthesize the requirements that constitute the production of Concrete with fly ash through a collection of information from its standard, in this case the NCh 3520 standard.

The quantification of the carbon footprint of the determined life cycles of concrete “from the cradle to the gate”, has the kg of CO₂eq as a factor and is a consequence of databases and literature documents that make the results true. and reliable when obtaining the background and information for its development, which is guided by the reference of a document from the Department of the Environment of the Basque Country and ISO standards. These concretes were distributed in Stage 1 (Conventional Concrete) and Stage 2 (Geopolymeric Concrete), according to their determined processes, each result was quantified, analyzed and evaluated through different criteria. And along with this, an indicator was created that assessed the impacts and the level of contamination so that it was finally concluded with a comparison and a proposal given the results obtained.

Due to the favorable results for Geopolymeric Concrete, it was interpreted that for 1m³, Conventional Concrete releases a 35% more than Concrete with fly ash.

In effect, fly ash in Concrete is a more sustainable and durable alternative to Conventional Concrete. Its production generates a lower CO₂ emission and its recycling capacity and durability make it a promising option for the construction of sustainable infrastructures in the future.

Keywords: Fly Ash, Life Cycle, Geopolymeric Concrete, Carbon Footprint.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 ANTECEDENTES	7
1.2 OBJETIVO GENERAL	8
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3 METODOLOGÍA	9
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 IMPACTO DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL ENTORNO.	12
2.2 ECONOMÍA CIRCULAR Y RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.....	15
2.3 HUELLA DE CARBONO.....	25
2.4 MATERIALES SUSTITUTOS.....	28
2.5 CENIZA VOLANTE Y GEOPOLÍMEROS.	31
2.6 ESCALA DE LIKERT	34
2.7 SOFTWARE SIMAPRO	34
3. DESARROLLO.....	35
3.1 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES DE LA CENIZA VOLANTE.....	35
3.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.	40
3.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA HORMIGÓN CONVENCIONAL.	45
3.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.	49
3.5 DIAGNÓSTICO TÉCNICO AMBIENTAL PARA LA INCORPORACIÓN DE CENIZAS VOLANTES EN EL HORMIGÓN	57
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	59

4.1 BALANCE DE CARBONO	59
4.2 EVALUACIÓN DE INDICADORES RESPECTO DE LA HUELLA DE CARBONO E IMPACTOS AMBIENTALES	60
4.3 CIRCULARIDAD.....	66
4.4 GENERACIÓN DE RESIDUOS	68
4.5 ASPECTOS TÉCNICOS NORMATIVOS.....	69
5. CONCLUSIONES.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	75
7.2 TABLA DE CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA PROCESO DE TRANSPORTE DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	76
7.3 TABLAS DE CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO	76
7.4 TABLA PESO TOTAL DE RESIDUOS GENERADOS EN CHILE POR TONELADAS.....	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

A nivel global y local, la industria de la construcción contribuye significativamente al consumo de energía y de recursos naturales, así como a la generación de impactos ambientales, como emisiones a la atmósfera y generación de residuos. En cuanto a esta última, su impacto concierne principalmente en la contaminación del suelo, aguas, drenajes naturales, flora y fauna y al aire. En donde se estima que para el año 2025 los escombros producidos por la industria de la construcción llenarían 15 veces el estadio nacional de Chile. (Ossio, 2019).

El cemento siendo el material de construcción más usado a nivel mundial posee en la mayoría de sus ciclos de producción una elevada emanación de dióxido de carbono. Se logra apreciar en su proceso de producción la cual emite gases de efecto invernadero en la que puede llegar a ser responsable de hasta el 8% de las emisiones de CO₂ (Centro de Estudios Británico Chatham House, 2018), a su vez la industria de la construcción acumula cerca de 40% del total de las emisiones de CO₂ a nivel global, relacionadas a la generación de energía. De este total, cerca de 70% se explica por la emisión en el proceso constructivo y el tiempo operativo (vida útil) de las obras (Agencia Internacional Global Alliance for Buildings and Construction, 2018)). En cuanto a su proceso de producción, se encuentra la extracción de áridos, donde se observan los impactos que atribuyen las canteras liberando un polvillo tóxico afectando el aire, la fauna y a los seres humanos.

Actualmente se está trabajando en la norma NCH 163, esta permite ampliar el espectro de los materiales utilizados para la confección del hormigón. Pudiendo así, considerar incluso agregado grueso en un 5%, lo cual extiende la gama de recursos para este material. (NCh163, 2013).

En conjunto a esto, también a nivel internacional se está trabajando en sustitutos no solo en cuanto a los agregados, sino que apuntando también a la circularidad permitiendo estimular el crecimiento económico y generando empleos sin comprometer el medio

ambiente, además incorporando políticas públicas y cadenas de valor a los ciclos de vida de los proyectos, logrando nuevos procesos constructivos a través de normas y políticas que avalan la reutilización y gestión de residuos a partir de su demolición. Considerando también el procesamiento y el trabajo de las cenizas volantes o elementos que vayan en reemplazo de los componentes cementicios que son gran parte del nivel de contaminación.

Esta situación ha motivado el interés por evaluar los impactos que genera esta industria, desde un enfoque comparativo de ciclo de vida y desempeño ambiental del cemento tradicional frente al cemento constituido por geopolímeros. Basándose en la economía circular y en la gestión de residuos, que proyecta un desarrollo más sostenible y duradero en el tiempo. Con el fin de dar cuenta cual de estos posee un mejor indicador respecto a la huella de carbono en el entorno.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los impactos que genera el hormigón geopolimérico desde un enfoque comparativo de ciclo de vida y desempeño ambiental, basándose en la economía circular y en gestión de residuos, medidos a través de su huella de carbono.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los requerimientos técnicos y ambientales para desarrollar hormigón geopolimérico.
2. Definir criterios para el análisis de ciclos de vida a partir del desempeño ambiental y eficiencia de los procesos para el hormigón convencional y hormigón geopolimérico.
3. Comparar ciclos de vida de hormigón convencional con hormigón geopolimérico.
4. Generar una propuesta en base a la evaluación y comparación de análisis normativo de los hormigones con respecto al ciclo de vida y huella de carbono.

1.3 METODOLOGÍA

Se realizará un levantamiento bibliográfico a partir de páginas de artículos científicos, normas chilenas (Instituto Nacional de Normalización), páginas de instituciones de la industria, páginas gubernamentales, etc. Con información técnica a partir de la búsqueda de conceptos como cenizas volantes, geopoliméricos, cemento, requerimiento ambiental, requerimiento técnico, etc. Esta información se sintetizará, es decir, se leerán normas y documentos, se seleccionarán e identificarán ideas principales e información más relevante, se redactará y presentará definiendo los principales requerimientos en base a sus regulaciones para la eventual implementación de un hormigón con incorporación de cenizas volantes.

Se obtendrá información, datos y antecedentes de calidad fiables a través de bases de datos, libros, documentos y otras redes de búsquedas. Se realizará el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el cálculo de la Huella de Carbono (HC) mediante la referencia del artículo “Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono, Dos Maneras de Medir el Impacto Ambiental de un Producto” (Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Vasco, Ithobe S.A, 2009). Junto a esto se usará un documento denominado como “ECOBASE Construcción”, siendo este una metodología y base de datos para evaluar y reportar los impactos ambientales del ciclo de vida del hormigón, el cual fue realizado por la IDIEM de la Universidad de Chile, en conjunto con la CDT, Fundación Chile y diversas empresas de materiales de construcción como Gerdau, Hormigones Transex, Cap Acero, etc. Proyecto apoyado por la CORFO y el Gobierno de Chile que permite obtener datos fiables y cuantificables sobre el ciclo de vida del hormigón y el cálculo de HC, desde el inicio de su proceso de extracción, hasta el fin del proceso de elaboración, donde a continuación se detallan las siguientes etapas a analizar en cada ciclo de vida:

ETAPA 1

Hormigón Convencional.

A) Producción de Materias Primas.

- B) Transporte de Materias Primas.
- C) Producción de Cemento.
- D) Fabricación del Producto.

Para el Cálculo de Huella de Carbono del Hormigón Geopolimérico se usará el documento y tabla simplificada otorgada por Juan Fernández, estudiante de la Universidad de Chile. Se tomó como antecedente el HGHD (Hormigón Geopolimérico Hardjito D), mezcla común de hormigón, la cual trata sobre el desarrollo y propiedades del hormigón geopolimérico en base a ceniza volante, de la Universidad Tecnológica de Curtin en Australia, el año 2005. Creado por el profesor ingeniero D. Hardjito y BV Rangan. Esta mezcla ha sido evaluada en estudios anteriores realizados en el IDIEM (Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales). Los resultados de factores de emisión fueron obtenidos mediante el software Simapro, donde Juan facilitó una tabla de cálculo simplificada en Excel con las bases de datos y resultados del software.

Cabe destacar que el software Simapro es una herramienta analítica utilizada para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de transparencia. Es usado por cientos de organizaciones en todo el mundo.

Para el Hormigón Geopolimérico se consideran las siguientes etapas a analizar en el ciclo de vida:

ETAPA 2

Hormigón Geopolimérico.

- A) Producción de Materias Primas y Ceniza Volante.
 - A.1) Producción de Solución de Hidróxido de Sodio.
 - A.2) Producción de Solución de Silicato de Sodio.
- B) Transporte de Materias Primas y Ceniza Volante.
- C) Procesamiento de Materias Primas con Ceniza Volante.

Con los datos y resultados ambientales obtenidos en los puntos anteriores, se logrará establecer la huella de carbono equivalente de cada proceso y se comparará por etapas y criterios de evaluación de análisis de ciclo de vida de cada material, esto es: ACV Hormigón Convencional, Etapa 1. – ACV Hormigón Geopolimérico, Etapa 2. También se evaluará por su categorización, es decir de Calentamiento Global. La suma total de entradas y salidas será la base para un posterior análisis y evaluación de los efectos ambientales relacionados con el producto (Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida).

A partir de los criterios establecidos para la evaluación del análisis de ciclo de vida de cada material, se realizará una comparación con el fin de identificar las brechas obtenidas en los resultados, para finalmente generar una propuesta o elaborar estrategia de mitigación o diagnóstico, basada en la evaluación y comparación de análisis normativo de los hormigones con respecto al ciclo de vida y huella de carbono.

Junto a esto se determinará el impacto al Calentamiento Global a través de un análisis de sus procesos y evaluación de impacto. Donde permita lograr realizar un levantamiento en cuanto a ciclos, desempeño y evaluación. Además, se tendrán tres matrices de análisis de discusión, uno a partir de las variables de los criterios de evaluación (desempeño ambiental a partir de los resultados de la HC de kg de CO₂eq, gestión de residuos y circularidad) y otro a partir de la comparación de etapas o procesos.

Se realizará un indicador con el fin de valorizar los resultados, este indicador será la Escala de Likert, el cual se medirá a través de resultados de cálculos de huella de carbono a través de ACV y a través de sus impactos, considerando 1 como muy bajo (muy desfavorable) o muy en desacuerdo y 5 muy alto (muy favorable) o muy de acuerdo. Lo que interpretará como resultado el nivel de contaminación y de repercusión ambiental de Calentamiento Global que tiene alguno de los cálculos de HC e impactos ambientales que genera la utilización de la ceniza volante, con el fin de demostrar lo importante que es el uso de un material sustentable para lograr una economía más circular y sostenible en el tiempo. Y, por último, se relacionarán los resultados con la estrategia de la construcción y economía circular sostenible, obteniendo y desarrollando síntesis, comparaciones y conclusiones de dichos resultados e informaciones obtenidos,

a través del desarrollo del ACV, Escala de Likert y del resultado total cuantificado de la HC.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 IMPACTO DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL ENTORNO.

En Chile, debido a la ausencia de un reporte de datos, no existen cifras que entreguen información certera sobre el nivel de contaminación del rubro. No obstante, a partir del Tercer Informe Bienal de actualización sobre Cambio Climático (2018) es posible obtener una estimación de las emisiones. Considerando el ciclo de vida completo de los proyectos de construcción, se calcula que el sector podría potencialmente participar cerca de un 23% del total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del país. Sin embargo, a nivel mundial, Chile contribuyó el año 2012 con un 0,25% de las emisiones globales. A nivel latinoamericano, su contribución fue cerca del 4,7% de las emisiones de la región, situándose por debajo de México, Brasil, Argentina y Venezuela. Cabe destacar que la contribución de Chile al Producto Interno Bruto (PIB) mundial es de un 0,34%, mientras que su contribución al PIB de América Latina es de un 5,7%, lo que indicaría que la actividad económica local es menos intensiva en emisiones que el promedio del mundo y de la región. (CCHC, 2019)

La industria de la construcción es una de las entidades más contaminantes a nivel mundial, esto por todos los materiales y residuos que generan sus procesos productivos. La producción del cemento es fundamental para la elaboración de la mayoría de los proyectos de construcción y como tal está ligada al crecimiento económico del país. No obstante, cuando esta actividad no cuenta con una gestión ambiental bien concebida y eficazmente llevada a la práctica, se ocasionan impactos significativos al ambiente debido al uso intensivo de energía y materia prima (minerales y agua), generando desechos, emisiones y efluentes contaminantes. (García, Gil, Rico, 2015)

En el uso intensivo de energía y materias primas, se encuentra el agua. Elemento importante para la buena colocación y desarrollo del material, sin embargo, dentro de

sus procesos de ocupación ocurre un significativo consumo del elemento a nivel mundial para la elaboración de un hormigón. La cual es responsable del 9% de extracción de agua industrial en todo el planeta. Asimismo, se calcula que, en el año 2050, el 75% de la demanda de agua para la producción del hormigón, probablemente se producirá en regiones afectadas por la sequía y el estrés hídrico. (Segui, 2019)

Junto a estos graves impactos, se encuentra también la gestión del agua proveniente del lavado de camiones mixer en las obras. Entendiendo que un camión luego de verter el hormigón necesita un rápido lavado para que el material no se endurezca y así impedir restos de hormigón en su interior. Es por esto por lo que requiere un lavado de canaletas in situ. Luego de ese proceso el agua adquiere características físico-químicas y es necesario una gestión adecuada para evitar la contaminación circundante, produciendo elevados valores de pH.

En efecto, este procedimiento puede causar daños a distintos organismos del cuerpo, así como también tiene efectos biológicos que pueden dañar los organismos vivos y a la flora inhibiendo su crecimiento. (Chaer, 2020)

En cuanto a los procesos de los minerales se encuentran los áridos o agregados pétreos. Estos agregados son compuestos de partículas duras, de forma y tamaño estable para la correcta elaboración de hormigón o mortero. Donde cumplen una función de resistencias mecánicas, durabilidad y rigidez.

Su proceso masivo de extracción produce un agotamiento de recursos afectando a canteras y lechos de ríos que dan lugar a la sobreexplotación de recursos naturales, lo que puede llegar a agotar los depósitos de áridos y causar impactos ecológicos negativos, como la degradación del hábitat y la erosión del suelo. Además, su extracción y procesamiento requieren grandes cantidades de energía, lo cual genera una gran emisión de gases de efecto invernadero. También da lugar a la degradación del paisaje y la destrucción del ecosistema. (Anefa, 2004)

En ocasiones, los áridos utilizados pueden contener impurezas que afectan la calidad del hormigón o presentan riesgos para la salud y el medio ambiente. Frente a este caso se presenta la búsqueda de áridos sostenibles y el reciclaje de materiales siempre cuando sea posible. Y en consecuencia el desarrollo de tecnologías de construcción más

sostenibles, como lo es la utilización de materiales reciclados o alternativos en el hormigón, donde podría traer efectos positivos tras la reducción de dependencia de áridos naturales.

Dicho anteriormente los áridos naturales pueden ser sustituidos, en parte, por áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), lo que conlleva varios impactos positivos. En primer lugar, permitiría disminuir el uso de áridos naturales cuya extracción y procesamiento es intensivo en energía y materiales. En segundo lugar, permitiría valorizar uno de los principales residuos generados por las obras de construcción, el hormigón.

En Chile, se estima que se generan 7,1 millones de toneladas de RCD anualmente, de las cuales entre un 60% y 80% corresponden a hormigón. (Instituto de la Construcción, 2021)

Siendo este último uno de los materiales más contaminantes a nivel global, provocando un gran impacto ambiental. Además de las repercusiones ecológicas y socioeconómicas de los miles de millones de toneladas de arena y grava que se extraen anualmente para alimentar la industria mundial del hormigón, este material tan útil a la hora de erigir un edificio tiene otro inconveniente: contribuye al cambio climático. Los procesos que se utilizan para producir el cemento con el que después se crea el hormigón generan grandes emisiones de dióxido de carbono. Cada año se producen más de 4.000 millones de toneladas de cemento, lo que representa alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂, según el informe Making Concrete Change de la organización Chatham House. (Tungsteno, Rubio, 2021)

Junto a esto, existen dos principales causas que ocasionan las emisiones de gases, estas son: la calcinación de la piedra caliza, ya que, al sobrepasar los 900°C, esta libera CO₂ y pasa a convertirse en dióxido de calcio. Este proceso genera el 60% de las emisiones. Y el segundo vendría siendo la quema de carbón/combustible para los procesos de calcinación y formación del Clinker. Este proceso genera el 40% de las emisiones.

El horno cementero creado para la quema de mezclas de minerales produce aproximadamente 0.8 toneladas de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento portland que se producirá. (Diaz, 2012)

2.2 ECONOMÍA CIRCULAR Y RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.

Ha resultado de lo dicho anteriormente, la Economía Circular (EC) tiene como proposito rediseñar las formas en que las sociedades se proveen de edificación e infraestructura, diseñan sus espacios, los mantienen y se relacionan con el medio ambiente. (Hoja de Ruta Economía Circular, 2020)

En este contexto, las organizaciones internacionales, incluidas las Naciones Unidas (ONU), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y el Foro Económico Mundial (FEM), han pedido cada vez más un nuevo paradigma de desarrollo: uno que priorice vías para la reducción de la pobreza. y mejores niveles de vida, promoviendo al mismo tiempo la eficiencia de los recursos y aliviando la presión sobre los recursos naturales y el medio ambiente. Dos acuerdos históricos en 2015, la creación de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) y la firma del Acuerdo de París, anunciaron un cambio radical en la forma de pensar sobre el crecimiento y el desarrollo. Colocaron la producción y el consumo sostenibles a la vanguardia de los esfuerzos globales para lograr un crecimiento económico equitativo y abordar el cambio climático.

El panorama de las políticas de Comisión Europea se ha ampliado notablemente en las últimas dos décadas. Aunque el pensamiento de tipo Economía Circular ha existido desde la década de 1970, las políticas que se refieren explícitamente a la "economía circular" comenzaron a introducirse recién en la década de 2000. La Unión Europea y China han sido los pioneros mundiales en este proceso. China introdujo su Ley de Promoción de la Economía Circular en 2009 y desde entonces ha desarrollado una serie de políticas de apoyo, incluida la Estrategia de Desarrollo de la Economía Circular y el Plan de Acción a Corto Plazo del Consejo de Estado, publicado en 2013; y el Plan de Promoción de la Responsabilidad Ampliada del Productor, introducido en 2016. En Europa, las discusiones de alto nivel sobre la Comisión Europea (CE) comenzaron en 2011 en el contexto de preocupaciones sobre los altos precios de las materias primas. La

Unión Europea anunció su ambicioso Plan de Acción para la Economía Circular en 2015. A esto le siguieron una serie de anuncios de políticas, estrategias específicas de CE y planes de acción de ambiciosos estados miembros y ciudades europeas.

Las inversiones en las economías emergentes y en desarrollo en los próximos años serán fundamentales para cumplir con estos dos acuerdos globales y para configurar la demanda de recursos naturales, el control de la contaminación y las vías de gestión de residuos para las próximas décadas. Para cumplir los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), será necesario ampliar la infraestructura crítica en los países de ingresos bajos y medios para brindar oportunidades económicas y acceso a servicios modernos. Sin embargo, las industrias esenciales para este proceso (cemento, acero, energía, por ejemplo) demandan cantidades significativas de agua, tierra y minerales. Para cumplir con las disposiciones del Acuerdo de París, la expansión de la infraestructura deberá basarse en tecnologías bajas en carbono y sistemas circulares que sean amigables con el clima y resilientes al clima. (Chatham House, 2019)

Dicho a esto, la Cámara Chilena de la Construcción (CCHC) junto con el Instituto de la Construcción (IC), el programa Construye 2025 de Corfo y otras entidades buscan permear un plan de acción al 2025 para el sector de la construcción convocando a los principales actores de la industria con el objetivo de impulsar medidas que disminuyan la demanda de recursos, logren menor impacto ambiental, la regeneración del medio ambiente y la protección del patrimonio ambiental, fomentando y promoviendo la economía circular en dicha industria.

La transición a una economía circular es uno de los desafíos clave para superar la crisis climática y para desarrollar una economía verde y sostenible, que aumente la satisfacción y resiliencia que brindan las ciudades y territorios. Impulsarla en el sector de la construcción abre nuevas oportunidades para la innovación, la mejora en la productividad y el empleo; en el contexto inmediato de una recuperación ecológica, y en el mediano y largo plazo, permite la construcción de mejores lugares donde vivir. (RCD Economía Circular, 2020)

Uno de los aspectos importantes para que una economía sea sostenible es considerar un diseño sostenible. En donde el diseño de edificios y estructuras se deben considerar

desde el principio, la eficiencia energética, el uso de materiales renovables y reciclables, la facilidad de desmontaje y reutilización, y por último la reutilización de materiales, la cual consiste en que en lugar de desechar materiales de construcción al final de su vida útil, se fomente la reutilización de estos materiales en nuevos proyectos o la remodelación de estructuras existentes. (RCD Economía Circular, 2020) También promueve el reciclaje de materiales de construcción, como el hormigón, el acero y el vidrio, para producir nuevos materiales y reducir la necesidad de extraer recursos naturales. La energía renovable y eficiencia energética también tienen un punto a destacar ya que la incorporación de tecnologías de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética en los edificios pueden reducir el consumo de recursos y las emisiones de carbono. (RCD Economía Circular, 2020)

Dentro de la actividad de la edificación se pueden distinguir tres etapas generadoras de residuos: la demolición de edificaciones pre-existentes, el movimiento de tierras y la construcción propiamente tal. (Construye 2025, 2018)

Ahora bien, la gestión de los RCD es una iniciativa multisectorial, es decir una asociación de distintas entidades gubernamentales y organizaciones que buscan fomentar y promover la gestión sustentable de los residuos, bajo el foco de Economía Circular, Para esto, se creó un Comité Consultivo Público la cual surge de la necesidad de abordar desde el sector público una serie de brechas, con el fin de realizar una gestión eficiente de los recursos y fomentar la sustentabilidad y la economía circular a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de edificación e infraestructura, y en toda su cadena de valor. Teniendo en cuenta que, en este escenario, es fundamental el trabajo integrado de los sectores público, privado y academia, el Estado asume un rol estratégico para impulsar la transformación hacia una economía circular, a través de las compras públicas, licitaciones y la acción coordinada de sus organismos para establecer un marco regulatorio claro y el fomento a nuevos mercados circulares. (Hoja de Ruta Economía Circular, 2020)

La cantidad de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) generados en el conjunto de los países de la Unión Europea, supera los 180 millones de toneladas al año, hecho que representa 480kg, por persona al año. De aquí solamente el 28% de estos

residuos son reusados o reciclados, el restante (72%) se envía a vertederos. (Symonds, 1999)

Sin embargo, a la fecha, en Chile esta información no está disponible, debido a que las políticas que incentivan el registro de impactos ambientales para el sector construcción son deficientes. No obstante, existe una iniciativa en la que se está trabajando llamada “Gestión de los Residuos de la Construcción”, la cual surge de la Hoja de Ruta del programa Construye 2025, impulsado por Corfo (2015) que tiene como objetivo orientar técnicamente el desarrollo de estudios e iniciativas del sector. La relación que posee con la Economía Circular se da en que las dos estrategias buscan la mitigación del cambio climático, fomentando la oferta y demanda de productos y materiales fabricados en base a materias primas secundarias del reciclaje de residuos de la construcción u otras cadenas de valor (áridos y otros materiales de construcción) y que a su vez sean reciclables. (RCD Economía Circular, 2020)

A continuación, se presenta la Figura 1, la cual establece las etapas de las cadenas de valor y RCD, desde la etapa de cadena de suministro hasta la etapa de construcción y montaje:

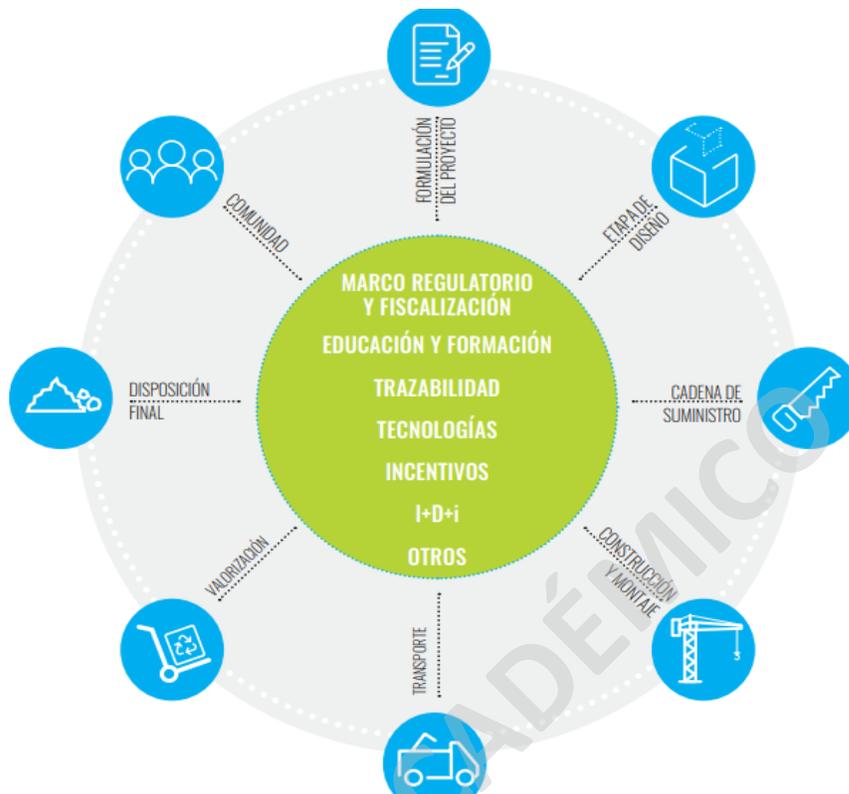


Figura 1: Cadena de Valor Incorporando la Gestión de los RCD y Economía Circular. (RCD Economía Circular. Hoja de Ruta RCD, 2020).

Un ejemplo en base a esto se aprecia en los residuos del hormigón que mayormente son botados a vertederos, la cual pierde su reutilización, aunque, “El mayor uso que se les da a los áridos reciclados de residuos de hormigón es como base y sub-base de carretera. Por ello, en varios países ya se están incorporando en la mezcla de hormigones tanto estructurales como no estructurales”. Según las cifras de requerimientos de áridos para la producción de hormigones del año 2019, “podríamos disminuir en un 30% el requerimiento de áridos naturales, si llegásemos a utilizar la totalidad del árido reciclado en la producción de hormigones”. (Hormigón al Día, 2020)

En conjunto a esto, la Gestión de Residuos presentan normas y leyes, tales como la NCh 3562 y la Ley N°20.920 (2016) del Ministerio del Medio Ambiente, con el fin de establecer un marco para la gestión de esta, además instaura la responsabilidad de los productores de RCD en su manejo adecuado, promoviendo la valorización, reutilización y reciclaje de estos residuos. Además, regula la disposición final de los RCD en vertederos autorizados. En el marco de esta ley se fomenta la separación en la fuente de

los RCD, es decir, que los residuos se separan en el lugar donde se generan para facilitar su gestión posterior. También se establecen normativas para el transporte, almacenamiento y disposición de los RCD. Con el propósito de que estos materiales compuestos en el fin de su vida útil puedan ser reutilizados para colaborar y promover la reutilización y el buen uso de los desechos o residuos.

Por eso es importante evaluar cada una de las fases, para identificar oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental en el ciclo de la construcción. Junto con esto, se debe tener en cuenta que todo proceso constructivo, actividad, servicio o producto poseen fases o etapas en las que se evalúan a través de un ACV, el cual se determina a partir de los objetivos de cada proyecto en particular.

Dicho esto, comúnmente en las etapas de ciclo de vida para la fabricación de un producto de la construcción se encuentran las siguientes fases:

- Extracción de materias primas.
- La fabricación del producto.
- Construcción.
- Uso.
- Fin de vida.

Estas fases para ser evaluadas conllevan un análisis en su ciclo de vida, la cual se define como la herramienta adecuada para “la recopilación y valoración de las entradas (materia y energía), salidas (productos, emisiones y residuos) e impactos potenciales de un sistema de producción o servicio a lo largo de su ciclo de vida”. (De Carvalho Filho, 2001)

El análisis del ciclo de vida de un edificio se centra en la medición del impacto de cada uno de los materiales que integran a un edificio, desde su fabricación hasta una posible nueva vida de estos materiales. (Campos, 2023)

Por lo general los edificios son construidos con materiales de gran resistencia y durabilidad, como lo son el acero y el hormigón. Este último posee una gran relevancia ya que es el principal material para poder construir una estructura resistente, sin

embargo su proceso de producción no es muy amigable con el ambiente, esto se logra apreciar en su Análisis de Ciclo de Vida, en el cual se asocia principalmente a una alta demanda de materias primas naturales (agregados pétreos, agua), así como materias primas procesadas (cemento, aditivos), junto con un alto consumo energético, utilizado tanto en el proceso de producción como en el de transporte a la obra. Mientras los aspectos ambientales a tener en cuenta son la emanación de residuos sólidos (inertes) y líquidos (aguas residuales) y la generación de emisiones diversas (material particulado, CO₂, ruido, etc.), como también el impacto a la infraestructura vial (por traslado de materias primas y producto final). (Muñoz, Quiroz, Vol. 4, 2014).

A continuación, se presenta la Figura 2, la cual alude al ciclo de vida del proceso de producción del concreto premezclado, presentando las respectivas entradas y salidas, desde la etapa de extracción de la materia hasta su disposición:

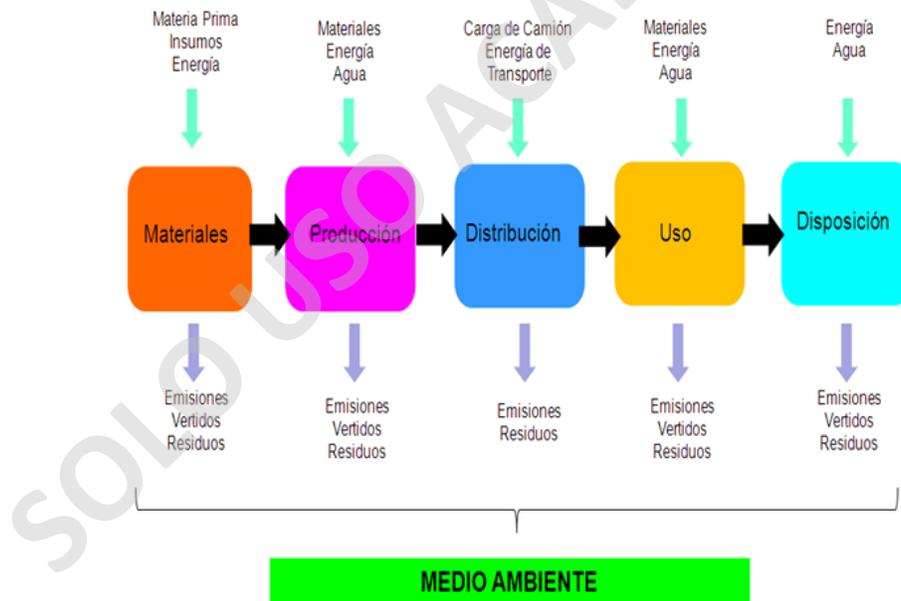


Figura 2: Proceso de Producción del Concreto Premezclado. (Impactos Ambientales Asociados con el Proceso de Producción del Concreto. García, Gil, Rico, 2015)

Junto a esto, existe una evaluación sistemática de los impactos ambientales asociados con todo el ciclo de vida del hormigón en un proyecto de construcción, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto. Esto incluye la etapa de producción, transporte, construcción, uso y eventual demolición o reciclaje. El

objetivo principal del ACV es identificar y cuantificar los impactos ambientales para tomar decisiones informadas y buscar formas de reducir estos impactos. Para lograr su correcto desarrollo se debe realizar un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) donde se recopilan y se analizan las entradas y salidas. Se clasifican y luego se calculan los resultados del indicador de categoría, para finalmente obtener la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), donde se cuantifican los resultados y elabora un indicador de equivalentes.

Para el desarrollo, existen herramientas de software y bases de datos de fuente primaria y secundaria, tales como Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Ecoinvent, Greenhouse Gas Protocol, Casos de estudios, Instituciones Gubernamentales, Universidades, etc. El cual permite almacenar, organizar y gestionar de manera eficiente todos los datos relacionados con el estudio específico. Esto incluye información sobre participantes, variables, resultados, metodología, fechas, entre otros. También permite realizar consultas, análisis y generar informes detallados sobre los datos recopilados, para facilitar la toma de decisiones y la elaboración de conclusiones de estudios. Además, las bases de datos proporcionan seguridad y control sobre la información, permitiendo mantenerlas actualizadas y protegidas. Mas aun cuando las bases de datos han sido creadas y mantenidas con altos estándares de calidad y precisión, la cual hace que estas sean fiables y seguras al momento de utilizarlas.

En síntesis, el ciclo de vida del hormigón acarrea emanaciones de gases de CO₂, lo cual repercute en la huella ambiental durante la fase de vida del material de construcción. En este caso la tecnología del hormigón en un proyecto de construcción.

A continuación, se muestra la Tabla 1, en la que se exponen los principales aspectos ambientales e impactos negativos en cada uno de los ciclos de la tecnología del hormigón:

Ciclo	Aspectos ambientales y acciones	Impactos negativos más comunes
--------------	--	---------------------------------------

Ciclo I: Extracción de materias primas	Extracción de áridos y otras materias primas. Extracción y procesamiento de minerales. Consumo de energía.	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación y compactación de suelos. Cambio de uso de suelos. Afectaciones a la calidad edáfica y a la biodiversidad.
Ciclo II: Transportación de materias primas.	Transportación de materias primas y materiales. Consumo de energía.	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación por aceites y lubricantes.
Ciclo III: Producción de componentes del concreto	Fabricación de cemento y aditivos. Fabricación del acero. Prefabricación en planta, Vibrado del concreto. Consumo de agua. Consumo de energía	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación del suelo por residuos sólidos de la producción. Contaminación del suelo por residuos líquidos. Liberación de CO2 por proceso de fraguado y curado.
Ciclo IV: Distribución de componentes a plantas y obras.	Distribución de cemento, acero, aditivos, áridos y otros productos Consumo de energía	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación por aceites y lubricantes.
Ciclo V:	Proyectos estructurales,	Incremento de la

Diseño o proyección	arquitectónicos y otros. Consumo de energía. Consumo de papel y otros materiales.	generación de residuos sólidos de papel y otros materiales.
Ciclo VI: Construcción y puesta en marcha	Construcción. Izaje de elementos. Consumo de agua. Consumo de energía. Ocupación de suelos.	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación del suelo por residuos sólidos de la producción. Contaminación del suelo por residuos líquidos. Cambio de uso de suelos. Afectaciones a la calidad edáfica, a la biodiversidad y el paisaje.
Ciclo VII: Uso	Uso de la edificación. Mantenimiento. Reparación de las patologías del concreto. Reparación de terminaciones, redes técnicas, y otros. Consumo de agua. Consumo de energía.	Contaminación por residuos sólidos. Contaminación por residuos líquidos. Ruidos
Ciclo VIII: Demolición. Re-uso. Rehabilitación	Abandono y demolición. Rehabilitación o Reutilización de componentes. Gestión	Emisiones atmosféricas de polvo y gases. Ruidos. Contaminación por residuos sólidos. Contaminación por

	de residuos.	residuos líquidos. Afectaciones al paisaje y personas
--	--------------	--

Tabla 1: Aspectos Ambientales e Impactos más Comunes de la Tecnología del Hormigón por Ciclo. (Elaboración Propia, Información: Diaz, Hernández, Gutiérrez, 2024)

En definitiva, el ACV evalúa una serie de impactos ambientales, que pueden incluir la emisión de gases de efecto invernadero, la toxicidad, el agotamiento de recursos, entre otros. El resultado del ACV puede proporcionar información valiosa para tomar decisiones más sostenibles en la selección de materiales y la gestión de proyectos de construcción.

Es importante considerar las prácticas sostenibles, como el uso de cementos con menor contenido de clinker o la incorporación de elementos o materiales reciclados en la mezcla de hormigón, para reducir los impactos ambientales y el dióxido de carbono a lo largo del ciclo de vida de este.

Para contribuir a la solución de este problema, han aparecido nuevas e innovadoras tecnologías industriales en los últimos años, con nuevos enfoques que aún están muy poco difundidos y menos considerados en la educación y en las profesiones de ingeniería, estas innovaciones revolucionan los paradigmas a partir de los cuales utilizan las tecnologías para la creación, en este caso de ambiente construido, en la búsqueda de una integralidad existente con anterioridad a la aparición de los materiales modernos.

2.3 HUELLA DE CARBONO.

Bajo esta realidad de impactos, que se viene arrastrando hace años nace la Huella de Carbono (HC), la cual se define como: “La totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto”, según Carbón Trust, 2008.

Se expresa generalmente en toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) y se utiliza para evaluar el impacto ambiental de una entidad y tomar medidas para reducir su

contribución al cambio climático. La huella de carbono puede calcularse para distintos aspectos, como el consumo de energía, la producción de residuos y los desplazamientos. El concepto de Huella de Carbono va más allá de la medición única del CO₂ emitido, ya que se tienen en cuenta todos los GEI que contribuyen al calentamiento global para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO₂. Por ello el termino correcto sería HC equivalente o emisiones de CO₂ equivalentes, aunque por la práctica se utiliza el termino Carbono. (Ihobe S.A, noviembre 2009)

Dada la creciente preocupación de los gobiernos, ciudadanía y entidades privadas frente al cambio climático, se ha promovido el desarrollo de metodologías y/o herramientas de cálculo para la estimación de la HC. (Albornoz,2015)

La huella de carbono es una versión simplificada de un Análisis de Ciclo de Vida en la que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente una de ellas, la relativa a Calentamiento Global. Una HC menor no siempre es sinónimo de un mejor comportamiento global. Es por ello recomendable complementar el uso de la HC con otro tipo de herramienta con visión global, como el ACV.

Para lograr desarrollar la medición de la HC se pueden aplicar distintas metodologías, una de ellas el ACV, principalmente la EICV, la cual permitirá medir las emisiones de CO₂ equivalentes, donde pueden ser regidas a través de normas ISO, con el fin de dar credibilidad y aseguramiento a los reportes de emisión de GEI.

Para cumplir con las mediciones de la HC se deben seguir los siguientes pasos habituales:

- A) Medición de las emisiones GEI o de CO₂ equivalentes.
- B) Limitación y reducción de las emisiones de GEI.
- C) Compensación de las emisiones de GEI.
- D) Comunicación de los resultados.

(Ihobe S.A, 2009).

Por consiguiente, se puede realizar tablas equivalentes de huella de carbono que principalmente son herramientas que se utilizan para cuantificar y comparar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por diferentes actividades, productos o servicios. Estas tablas permiten expresar las emisiones en términos equivalentes a la captura de dióxido de carbono (CO₂) o la cantidad de árboles necesarios para absorber esas emisiones.

Para realizar las tablas equivalentes de huella de carbono, se siguen generalmente los siguientes pasos:

Recopilación de datos: se deben recopilar datos precisos y completos sobre las emisiones de GEI generadas por la actividad, producto o servicio en cuestión. Esto puede implicar el seguimiento de consumos energéticos, procesos industriales, transporte, entre otros.

Cálculo de emisiones: utilizando metodologías reconocidas y estándares internacionales, se realizan los cálculos de las emisiones de GEI. Esto implica convertir los datos recopilados en emisiones de CO₂ equivalente, que toma en cuenta las diferentes capacidades de calentamiento global de los diferentes gases.

Conversión a medidas equivalentes: una vez que se tienen los resultados de las emisiones en CO₂ equivalente, se convierten en medidas equivalentes.

Estas tablas equivalentes de huella de carbono permiten a las organizaciones, gobiernos y consumidores comprender y comparar el impacto ambiental de diferentes actividades, productos o servicios, lo que puede ayudar a tomar decisiones más sostenibles y reducir las emisiones de GEI.

En general, los niveles de huella de carbono en la construcción con hormigón suelen ser muy altos en comparación a otros materiales sustitutos más sustentables que poseen una menor huella de carbono, esto porque los componentes de estos materiales se obtienen, utilizan y desechan de manera respetuosa con el medio ambiente, ya sea por ser renovables, reciclables o biodegradables. Un ejemplo de esto es el hormigón geopolimérico un material más sostenible que requiere menos energía para su producción y reduce la emisión de gases de efecto invernadero en comparación con el hormigón tradicional, puesto que este utiliza adiciones de cenizas volantes que

reemplazan casi la totalidad del cemento, reduciendo así el consumo de este material y, por lo tanto, las emisiones asociadas.

2.4 MATERIALES SUSTITUTOS.

Asimismo, existen diferentes materiales sustitutos que actualmente surgen como necesidad para poder mitigar la extracción de recursos naturales, esto debido al gran uso de recursos, puesto que el foco es la materialización de infraestructura desde el uso de diversos materiales utilizados para las distintas fases de la obra. Y es que a pesar de que construir optimizando recursos, sea uno de los objetivos principales, los residuos que deja el proceso constructivo alcanzan volúmenes significativos respecto a otros sectores productivos. En efecto, la construcción, como sector económico, está en una búsqueda continua de nuevas herramientas que permitan mejorar sus procesos, con el fin de disminuir el uso de recursos, cumplir con los estándares estipulados y minimizar los impactos ambientales. (RCD Economía Circular, 2020)

Durante las distintas fases del proceso constructivo de un edificio, tales como: instalación de faena, excavación, obra gruesa y terminaciones, se generan residuos dentro de los cuales algunos son caracterizados como sólidos inertes por ende se están buscando materiales con componentes sustentables o reutilizables que cumplan el mismo rol y contengan propiedades físicas proporcionales a los de los materiales comunes. (Ramos Jara, 2017)

Dentro de la familia de materiales sustentables que cumplen como sustitutos de los materiales tradicionales para la construcción se encuentran:

Bambú

El Bambú es considerado como el acero vegetal, es ligero y flexible, pero tiene una resistencia superior a maderas duras como roble o caoba, comparado con algunos materiales de construcción, la resistencia de diseño es mayor al concreto lo que lo hace ideal para estructuras que deben soportar peso.

Crece de forma rápida y abundante, entre uno y cinco años dependiendo la especie y se puede cultivar en cualquier parte del mundo, no requiere químicos ni pesticidas. El Bambú absorbe los gases de efecto invernadero, tiene la capacidad de producir 35% más de oxígeno que otras plantas y árboles. En construcción se puede utilizar en andamios, puentes, edificios y casas. Y en muchos lugares del mundo, el bambú se ha convertido en una alternativa popular a la madera y el acero en la construcción. (González, 2021)

Bloques de Fibra de Minerales

Los Bloques de Fibra de Minerales son un material compuesto por minerales como la resina, el calcio natural, vidrios y otros minerales añadidos. Este material se caracteriza por ser un sustituto al ladrillo y ser un material económico, que reduce el tiempo de trabajo, tener una mayor resistencia al ladrillo convencional, posee además propiedades acústicas y térmicas, lo que permite mantener una temperatura más constante en el interior de edificios y reducir el consumo de energía y mejorar el confort acústico. Además, tiene un bajo peso, lo cual facilita su transporte, manipulación e instalación, lo que puede ahorrar tiempo y costos en la construcción Y lo más importante es que se puede elaborar bajo a materiales reutilizados, reduciendo costos y consumo energético. (Structuralia, 2022)

Árido reciclado del hormigón

El cemento en particular para ser formado pasa por una serie de procesos desde la extracción de las materias primas hasta su obtención del producto final, la cual libera mucha energía y CO₂ en sus diferentes procesos. Al ser utilizado para el desarrollo del hormigón necesita de otros componentes como arena, agua y áridos. Esta última materia prima se ve sobreexplotada, causando una remoción y deslizamientos modificando su cauce natural en canteras, ríos, lagos. Lo que puede alterar los ecosistemas acuáticos y terrestres circundantes, afectando considerablemente a la biodiversidad provocando además posibles aumentos de riesgo de inundaciones y reducción de caudales. Para

lograr una remediación a las consecuencias de estos procesos que impactan negativamente al ambiente se conoce como reemplazo de los áridos el hormigón reciclado. El árido reciclado del hormigón es un material obtenido a partir del procesamiento de residuos de hormigón de demolición o desecho de la construcción. Este material se somete a un proceso de trituración y clasificación para obtener tamaños y formas adecuadas para ser utilizado como árido en la fabricación de nuevos hormigones.

El hormigón cuando ya cumple su vida útil es desechado. Sin embargo, cuando es reutilizado ayuda a reducir la cantidad de residuos enviados a vertederos y a disminuir la extracción de nuevos recursos naturales. Además, el uso de árido reciclado en la fabricación de hormigón puede contribuir a la obtención de certificaciones de construcción sostenible, como LEED o BREEAM, al demostrar la utilización de materiales reciclados en el proceso constructivo. Junto a esto, puede ser utilizados como áridos para la elaboración de morteros u hormigón geopoliméricos. La inclusión del hormigón reciclado como árido para morteros geopoliméricos da como resultado un aumento en la resistencia mecánica que desarrollo la mezcla.

Además, la incorporación de hormigón reciclado de manera total o parcial del árido presenta una idea interesante a considerar para la confección de hormigones 100% sustentables. Otro hecho que se podría considerar útil es que el uso de hormigones reciclados, en hormigones con cemento portland conlleva a un aumento significativo en la retracción y el creep. Este efecto se produce principalmente por la absorción que tiene el árido. Se considera que el hormigón geopolimérico presentaría menos de la mitad de retracción que el hormigón corriente (entre 5 y 7 veces menos según la literatura), el efecto adverso por retracción que produce el hormigón reciclado se podría ver disminuido. (Diaz, 2012)

Ceniza Volante

Por último, las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón en centrales eléctricas que utilizan carbón como fuente de energía. Estas cenizas son

recogidas mediante sistemas de filtrado y tienen propiedades cementantes, lo que significaría que pueden reaccionar con el agua y formar compuestos similares a los encontrados en el cemento, lo que las hace útiles como adiciones en la producción de concreto o mortero. La adición de las cenizas volantes al hormigón puede mejorar sus propiedades, tales como la resistencia a la compresión, durabilidad y la reducción a la permeabilidad. Además, el uso de cenizas volantes en lugar del cemento Portland reduce significativamente la cantidad de emisiones de dióxido de carbono asociadas con la producción de cemento, lo que lo hace beneficioso para el medio ambiente y para el desarrollo tecnológico de la construcción hacia un futuro más sostenible.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de cenizas volantes en hormigón tiene ciertas consideraciones, como la necesidad de ajustar las proporciones de los otros componentes para obtener las propiedades deseadas y el control de la calidad de las cenizas volantes utilizadas, también son menos conocidos y estudiados. (Instituto Nacional de Normalización, 2020)

2.5 CENIZA VOLANTE Y GEOPOLÍMEROS.

Conforme a ello, la ceniza volante está compuesta generalmente por óxidos de silicio, aluminio, calcio y hierro, y posee un tamaño de partícula que va desde los 10 a 100 micrones.

Este se define como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, originadas por la combustión de carbón pulverizado, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de Dióxido de Silicio (SiO_2) y Óxido de Aluminio (Al_2O_3), que:

Se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas de polvo de los gases de combustión procedentes de centrales termoeléctricas; y se puede procesar, por ejemplo, por clasificación, selección, tamizado, lavado, secado, mezcla, molienda o reducción del carbón, o mediante combinación de estos procesos, en plantas de producción adecuadas, en cuyo caso estas cenizas volantes procesadas pueden estar compuestas de cenizas volantes de diversas centrales termoeléctricas, cada una conforme

con la definición dada en la cláusula correspondiente. (Instituto Nacional de Normalización, 2020)

Este elemento contiene partículas finas y se clasifica como una clase de ceniza conocida como material pulverizado.

Según el investigador y académico del departamento de ingeniería y gestión de la construcción, de la escuela de ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), dice que “Si bien existe un compromiso en Chile de cerrar las centrales termoeléctricas, tenemos un acumulado de cenizas volantes por décadas: por un megawatt tenemos 250 toneladas de cenizas volantes al año. Lo que es un impacto enorme, ya que solo en 2019 se produjo un millón de toneladas cenizas volantes de las centrales de carbón”. (Ortiz, 2021).

Dicho esto, aparte de ser un impacto sumamente importante, no habría problema en la captación de cenizas volantes para la elaboración del hormigón geopolimérico, debido a las grandes toneladas de cenizas volantes que se concentran por resultado del proceso de combustión en centrales termoeléctricas.

No obstante, en Chile las cenizas volantes no son muy utilizadas, ya que no existe una gran difusión de este desecho y no se conoce los beneficios que podría tener este al complementarlo con el hormigón. En países más desarrollados este geopolímero ya es usado como subproducto para la elaboración de hormigones y adiciones.

Según el profesor Ramesh Joshi, las cenizas volantes fueron reconocidas como puzolanas para uso en el hormigón en 1914. Pero, no fue hasta 1937 con Davis que comenzó a estudiarse de forma detallada. A finales de los años 50 y principio de los 60 el Comité C-9 de la ASTM e investigadores como Minnick, Timms y Grieb estudiaron las cenizas que se clasifican en la ASTM como Clase F. Estos determinaron las características fundamentales de hormigón con cenizas volantes como sustituto al cemento. A partir de 1983 el Centro Canadiense de Tecnología de Minerales y Energía (CANMET por sus siglas en inglés) en asociación con la Alianza Cooperativa Internacional (ACI) y otras organizaciones internacionales llevan a cabo congresos mundiales que tratan sobre el uso de las puzolanas en el hormigón. Los proceedings o actas de estas conferencias trianuales son publicadas por la ACI. En 1987 el Comité 226

del ACI recogió todo el estado del conocimiento sobre el uso de las cenizas en el hormigón. En la actualidad el comité 232 del ACI recoge las mejores prácticas para el uso de las cenizas volantes y puzolanas naturales en el hormigón. (Molina, 2008)

Por consecuencia, las cenizas volantes llegan a reemplazar gran parte del cemento si no el total, siendo así un material más sostenible y con mejores propiedades físicas, disminuyendo considerablemente las emisiones provocadas por los procesos de producción del cemento como lo es la calcinación de la piedra caliza. Generando así una nueva iniciativa para la reducción de la huella de carbono, como lo son los hormigones geopoliméricos.

Esta tecnología llamada hormigón geopolimérico, en su mayoría pueden llegar a ser un 80% menos contaminantes y requieren un 50% menos de consumo de energía en su fabricación. Además, en su elaboración se emplean residuos industriales que no requieren de procesamiento térmico alguno. (Instituto del Cemento Portland Argentino, 2014)

Los geopolímeros se definen como polímeros inorgánicos formados por una reacción química entre un aluminosilicatos y una solución acuosa de silicatos o una solución alcalina.

El desarrollo de esta materia implicaría el reemplazo de materias primas por otros materiales reciclados, lo que sería ventajoso para el impacto ambiental de la producción de cemento, generando un hormigón con pocas emisiones, al mismo tiempo incorporando aspectos de economía circular en su producción.

El termino, Geopolímero, fue acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos obtenidos a partir de aluminosilicatos activados mediante una solución alcalina que da origen a la reacción química conocida como geopolimerización.

Esta reacción es llevada a cabo al poner material puzolánico en contacto con una solución alcalina, lo cual tras reorientarse los iones en solución da como resultado la formación de cadenas poliméricas. A través del curado, en horno o a temperatura ambiente, los materiales resultantes de estas reacciones presentan una estructura amorfa tridimensional. (Albornoz,2015)

Los geopolímeros han sido conocidos desde finales de los años 60, sin embargo, aún no han sido producidos en grandes cantidades o en aplicaciones industriales de larga duración. Una aplicación industrial de este producto, son los durmientes de una línea férrea en el Este de Europa y Rusia. Recientemente, en España se ha utilizado el hormigón geopolimérico a base a cenizas volantes con el mismo propósito. (Albornoz, 2015)

2.6 ESCALA DE LIKERT

Para la evaluación o generación de valorización de lo que se ha expresado se puede utilizar la Escala de Likert la cual es un instrumento de medición o recolección de datos cuantitativos utilizado dentro de la investigación. Es un tipo de escala aditiva que corresponde a un nivel de medición ordinal; consiste en una serie de ítems o juicios a modo de afirmaciones ante los cuales se solicita la reacción del sujeto. El estímulo (ítem o juicio) que se presenta al sujeto, representa la propiedad que el investigador está interesado en medir y las respuestas son solicitadas en términos de grados de acuerdo o desacuerdo que el sujeto tenga con la sentencia en particular. Son cinco el número de opciones de respuesta más usado, donde a cada categoría se la asigna un valor numérico que llevará al sujeto a una puntuación total producto de las puntuaciones de todos los ítems. Dicha puntuación final indica la posición del sujeto dentro de la escala. (Méndez, Peña, 2007)

2.7 SOFTWARE SIMAPRO

Además, existe otro tipo de instrumento que permite desarrollar un ACV con bases de datos fiables para el usuario. Este es un software analítico utilizado para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de transparencia. Es usado por cientos de organizaciones en todo el mundo.

Es una herramienta única para uso académico: es preciso, cuenta con fundamentos científicos y proporciona un alto nivel de transparencia; es un software fundamental a

nivel empresarial para desarrollar planes de acción que le permitan medir y alcanzar sus metas de sustentabilidad, ya sea al interior de la organización o en toda la cadena de suministros.

SimaPro ha sido construido y mejorado a lo largo de 30 años, por líderes en ACV que han contribuido a los principales desarrollos de investigación y políticas públicas. SimaPro permite ver redes de suministro completas y proporciona una visión total de las bases de datos y los procesos unitarios, esto brinda plena capacidad para analizar y modificar las elecciones y suposiciones, indispensable para la investigación de calidad, para educar a los profesionales de ACV, y para su uso empresarial.

Este software fue creado en el año 1991 por una empresa consultora en los Países Bajos.

3. DESARROLLO

3.1 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES DE LA CENIZA VOLANTE.

A través de termoeléctricas, las cuales producen la energía se generan las cenizas volantes. Para este proceso se producen diversos tipos de cenizas esto debido a los distintos tipos de carbón y de calderas donde se desarrollan. Estos tipos de cenizas pueden ser calcáreas, silíceas o silicocalcareas las cuales poseen propiedades puzolánicas e hidráulicas latentes.

El uso de cenizas volantes debe ser obtenida directamente del proceso de centrales termoeléctricas en base a carbón pulverizado, por ende, no se aplica a cenizas volantes acopiadas en su disposición final y generadas por el proceso de co-combustión y las obtenidas por incineración de residuos municipales, agrícolas, forestales e industriales; A no ser que el generador de electricidad tome las medidas necesarias para hacerlas aptas, homogéneas y libre de contaminación, para usarlas en el hormigón. Además, antes de su uso esta puede pasar a través de diversos procesos con el fin de reducir su demanda de agua, optimizar su finura o simplemente para mejorar otras propiedades.

Dentro de los procesos se encuentran: tamizado, lavado, secado, mezcla, clasificación, selección, etc.

Durante estos procesos existen efectos producidos por la puzolanicidad de las cenizas volantes, en donde ciertas propiedades del hormigón fresco y endurecido se pueden ver afectadas. Estos sucesos deben ser considerados al momento del diseño y elaboración del hormigón con el fin de cumplir los requisitos de la NCh170.

Para obtener un resultado exhaustivo en la elaboración del hormigón con ceniza volante, estas se deben expresar como proporciones en masa de la ceniza volante en base seca, junto a esto se deben considerar los siguientes requerimientos químicos que se detallan en la Tabla 2:

Subcláusula	Propiedad	Requisito % en masa
4.1.2	Perdidas por calcinación: Categoría A Categoría B Categoría C	$\leq 5,0$ $>5,0$ y $\leq 7,0$ >7 y $\leq 9,0$
4.1.3	Cloruro	$\leq 0,10$
4.1.4	Contenido de sulfato	$\leq 3,0$
4.1.5	Óxido de calcio libre	$\leq 1,5$
4.1.6	Óxido de calcio reactivo	$\leq 10,0$
4.1.7	Óxido de silicio + óxido de aluminio + óxido de hierro	≥ 50
4.1.8	Contenido total de álcalis	$\leq 5,0$

Tabla 2: Requisitos de Propiedades Químicas, NCh3520, (Cenizas Volantes para Hormigón- Requisitos,2020)

Coincidiendo con la Tabla 2 se presentan una serie de punteos referentes a cada subcláusula.

Los ensayos deben llevarse a cabo conforme a las directrices establecidas en la norma NCh147.

4.1.2. Las pérdidas por calcinación deben mantenerse dentro de los rangos especificados en las categorías (A, B, C), y se deben determinar a una temperatura de $750\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ según el estándar ASTM C 311.

4.1.4. En caso de exceder el límite de porcentaje en masa, se deben realizar pruebas según el estándar ASTM C 1012 utilizando una mezcla de 70% de cemento y 30% de ceniza volante. El resultado debe cumplir con lo establecido en la norma NCh 170, sección 6.4.2.3. Si no se cumple con esta especificación, se puede considerar ajustar la proporción de la mezcla de hormigón y verificar su cumplimiento.

4.1.5. Para determinar el óxido de calcio libre, se debe emplear el método descrito en el estándar EN 451-1. Si el contenido supera los valores indicados en la Tabla 2, se deben realizar pruebas adicionales en la ceniza volante para garantizar que cumpla con los requisitos de estabilidad de volumen descritos en la sección 4.2.3

4.1.6. Si el contenido de óxido de calcio reactivo, calculado según las pautas de EN 197-1:2011, 3.1, cumple con los requisitos especificados en la Tabla 2, se considera que la muestra cumple con el estándar. En caso contrario, se deben llevar a cabo ensayos según ASTM C 1012 utilizando la misma mezcla de 70% de cemento y 30% de ceniza volante, con el fin de cumplir con lo establecido en la norma NCh 170, sección 6.4.2.3. Si la proporción de la mezcla difiere, se puede utilizar la proporción prevista para el hormigón y verificar su cumplimiento.

4.1.7. La conformidad con los requisitos establecidos en la norma NCh170 se determina según lo estipulado en dicha norma, considerando únicamente las cenizas volantes obtenidas a partir de la combustión de carbón pulverizado.

4.1.8. El cálculo del contenido de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ se realiza de acuerdo con la norma NCh170, considerando exclusivamente las cenizas volantes obtenidas por la combustión de carbón pulverizado. En caso de no cumplir con este requisito, se deben seguir las pautas del estándar ASTM C1567.

A continuación, en la Tabla 3 se identifican los siguientes requerimientos físicos de la ceniza volante para hormigón:

Subcláusula	Propiedad	Requisito
4.2.1	Finura	$\leq 40\%$ en masa
4.2.2	Actividad puzolánica	$\geq 6,9$ MPa
4.2.3	Estabilidad de volumen	≤ 10 mm

Tabla 3: Requisitos de Propiedades Físicas, NCh3520, (Cenizas volantes para Hormigón- Requisitos, 2020)

Coincidiendo con la Tabla 3 se presentan una serie de punteos referentes a cada subcláusula.

4.2.1. La finura se debe determinar a través de un tamizado húmedo de malla de 0,045mm según NCh150, se expresa en porcentaje como proporción en masa.

4.2.2. Para determinar la actividad puzolánica, se sigue el procedimiento establecido en la norma NCh161, con una excepción que permite una relación agua/(ceniza volante + cal) de 0,5 en peso. Sin embargo, esta medida no proporciona información directa sobre cómo contribuyen las cenizas volantes a la resistencia mecánica del hormigón. Para evaluar su efecto en el hormigón, se puede aplicar el método descrito en ASTM C 311.

4.2.3. La determinación de la estabilidad de volumen se realiza utilizando una mezcla que contiene un 30% de cenizas volantes y un 70% de cemento de prueba. Se considera que el requisito se cumple cuando el contenido de óxido de calcio libre en las cenizas volantes es igual o inferior al 1,5% en masa, según lo establecido en la sección 4.1.5. Luego, se extraen muestras uniformemente distribuidas con un peso igual o superior a 2 kg. Las muestras compuestas deben tener al menos una masa de 4 kg, obtenida mediante el proceso de cuarteo de muestras individuales.

En cuanto a la frecuencia de muestras, se explican en la Tabla 4:

Tipo de ensayo	Requisitos	Frecuencia de ensayo
Caracterización ¹⁾	Tabla 1 Tabla 2	Mensual o cada 2000 tons
Control	Contenido de humedad ²⁾ Pérdida por calcinación	Diario o cada 100 tons

	Finura	
<p>1) Son los destinados a determinar la aptitud de una ceniza volante para el uso en la elaboración de morteros y hormigones.</p> <p>2) Determinar el contenido de humedad según norma ASTM C311.</p>		

Tabla 4: Frecuencia de Ensayo de Cenizas Volantes, NCh3520, Cenizas Volantes para Hormigón- Requisitos, 2020.

Para el tiempo de fraguado, se recomienda verificar que no se extienda de manera excesiva el tiempo de fraguado de la mezcla de cemento y ceniza volante. El tiempo de fraguado se puede medir mediante la norma NCh152.

El hormigón con ceniza volante debe ser capaz de resistir a la intemperie, ataques químicos, cambios de temperatura y otros factores que pueden deteriorar su estructura con el tiempo. Debe tener una baja permeabilidad y ser resistente a la abrasión. Las cenizas volantes que satisfacen los requerimientos tanto físicos como químicos proporcionan un hormigón durable. Junto con el cumplimiento de lo requerido en la norma NCh170, conforme a la durabilidad del hormigón.

Para la aplicación de las cenizas volantes al hormigón son indispensables las siguientes normas: NCh3520, NCh147, NCh150, NCh161, NCh170:2016, ASTM C 311, ASTM C 1012, ASTM C 1567, EN 196-3, EN 197-1:2011 y EN 451-1.

Las cenizas volantes conformes con todos estos requerimientos pueden ser empleadas también en morteros y lechadas.

Ahora bien, el hormigón con ceniza volante también debe cumplir ciertos requerimientos ambientales para su uso que se han descrito a lo largo del capítulo, junto con estos requerimientos, se debe considerar:

La Compatibilidad y calidad de las cenizas volantes: Las cenizas volantes deben cumplir con los estándares de calidad establecidos por las normativas ambientales. Deben estar libres de elementos tóxicos que puedan afectar la calidad del hormigón y el medio ambiente.

Control de emisiones durante la producción: Es importante contar con un sistema de control de emisiones en las plantas de producción de cemento y centrales termoeléctricas que generan cenizas volantes. Esto garantiza que las emisiones de partículas y compuestos gaseosos contaminantes se reduzcan al mínimo.

Gestión adecuada de las cenizas volantes: Las cenizas volantes pueden ser consideradas como residuos industriales, por lo que es necesario implementar un plan de gestión adecuado. Esto implica su almacenamiento y transporte seguro, así como su disposición final de acuerdo con las regulaciones ambientales vigentes.

Minimización de la huella de carbono: La incorporación de cenizas volantes en el hormigón puede tener ventajas en términos de reducción de la huella de carbono. Al utilizar residuos industriales en lugar de recursos naturales, se reduce la cantidad de energía y emisiones asociadas a la producción de cemento.

Monitoreo y control de la calidad del hormigón: Es necesario llevar a cabo pruebas y análisis de laboratorio para asegurar que la adición de cenizas volantes no afecte negativamente las propiedades y resistencia del hormigón. Se deben establecer especificaciones y criterios de calidad para garantizar un producto final confiable.

Los requerimientos ambientales para el hormigón con ceniza volante incluyen el cumplimiento de estándares de calidad, control de emisiones, gestión adecuada de residuos, minimización de la huella de carbono y monitoreo de la calidad del hormigón.

3.2 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

Definición de Objetivos y Alcance

Para el desarrollo de este capítulo se usaron datos secundarios a través de bases de datos nacionales e internacionales, fuentes bibliográficas, estudios, documentos, etc. La toma de datos puede ser verificada a través de su documentación anexada. Estas bases de datos y documentos permiten obtener datos cuantitativos e información calificada de distintas bases de datos confiables, con el fin de lograr los objetivos de la ejecución del

ACV y el respectivo cálculo de HC, logrando evaluar los impactos ambientales asociados a un determinado producto, actividad o proceso.

Además, hoy en día existen varios marcos metodológicos para la medición de las emisiones de GEI. Estas poseen varios aspectos en común, como incorporar el análisis de ciclo de vida como función principal para el cálculo de la huella de carbono.

En acuerdo a lo anterior, para este estudio se escogió la metodología dispuesta de la norma ISO 14067 “Gases de Efecto Invernadero – Huella de Carbono de Productos – Requisitos y Directrices para Cuantificación”, para el caso de la determinación de la unidad funcional del producto, se usan las condiciones pertinentes a la norma ISO 14044 “Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Requisitos y Directrices”. El producto al conocer los límites del sistema, el cual está considerado solo desde la fase de extracción de materias primas hasta la fase de fabricación del producto, se toma en cuenta una unidad de referencia, basada en el ACV, para reflejar la información ambiental necesaria en las etapas de ciclo de vida. Para este caso la unidad declarada será de 1m³ de hormigón de resistencia G30 o H30 en su defecto y para el hormigón geopolimérico será el G25 o en su defecto H25.

Al tener considerado un hormigón de resistencia G30 se considera una dosificación referencial para la correcta ejecución de 1m³, cabe destacar que la dosificación puede variar ligeramente dependiendo de la calidad de los materiales y las especificaciones del proyecto.

A continuación, se presenta la dosificación de los hormigones por metro cúbico en la Tabla 5:

Resist. Mpa	Cemento kg	Gravilla kg	Arena kg	Agua lt
G25	380	1120	645	200
G30	440	1145	585	200

Tabla 5: Dosificación de Hormigón por Metro Cúbico. (Chile Cubica, 2022)

En la siguiente Figura 3, se muestra el esquema de ACV utilizado para el desarrollo de este documento, conforme por la ISO 14040, donde se contemplan las siguientes

actividades: - Definición de Objetivo y Alcance -Análisis de Inventario -Evaluación de Impactos.

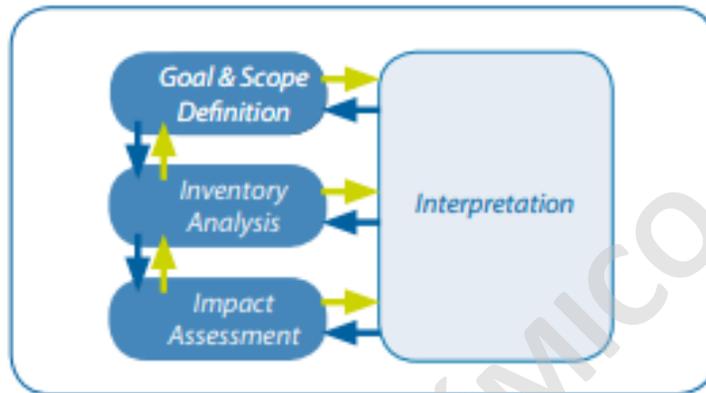


Figura 3: Esquema de un ACV Según ISO 14040. (Ihobe S.A, 2009)

Seguido, se hace referencia a las respectivas fases que tiene un ciclo de vida junto a las entradas y salidas que le competen. Cabe mencionar que estas fases pueden variar según su modo de uso, al igual que las entradas y salidas. Se presenta la Figura 4:

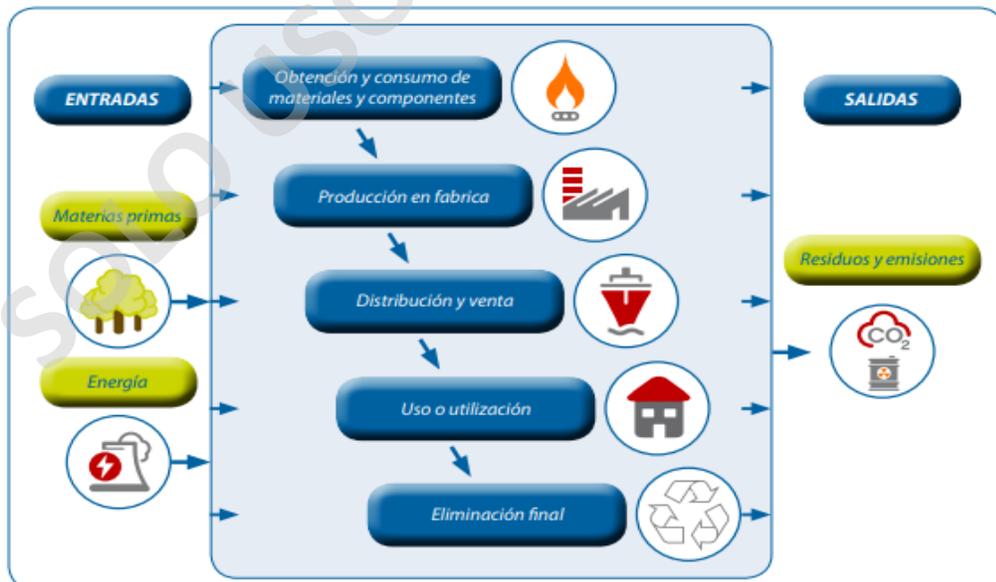


Figura 4: Concepto de la Perspectiva de un Análisis de Ciclo de Vida y Fases que se Tienen en Cuenta. (Ihobe S.A, 2009)

Para el cálculo de la HC se debe multiplicar los datos de la actividad por un factor de conversión (emisión), como resultado da una estimación de las emisiones de GEI para la actividad.

Emisiones de GEI(CO₂ eq) = datos de actividad x factor de conversión de emisiones

Fórmula 1: Calculo de Emisiones GEI.

Los datos de actividad pueden ser una unidad en masa, volumen, kWh, km, etc. Y el factor de emisión en este caso se debe considerar CO₂ por unidad.

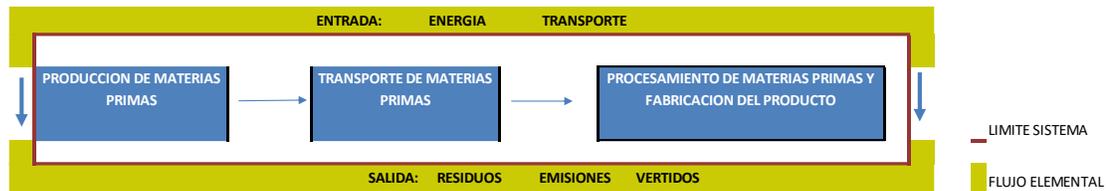
Dicho esto, la unidad referencial para interpretar los resultados del cálculo las emisiones de CO₂ se establece como kgCO₂eq.

Los resultados obtenidos para el desarrollo de etapas y flujo del Ciclo de Vida del Hormigón se obtuvieron mediante el proyecto “ECOBASE Construcción”, desarrollado por la IDIEM de la Universidad de Chile, en conjunto con la CDT y Fundación Chile. Además de participar diversas empresas de materiales de construcción.

Esta iniciativa es una metodología y bases de datos para evaluar y reportar distintos impactos ambientales del ciclo de vida de los materiales de construcción. Si bien el proyecto “ECOBASE Construcción” en la etapa de Ciclo de Vida del Hormigón, específicamente en los impactos prioritarios de cada proceso, no considera el transporte de los materiales, sin embargo, para remediar la situación se utilizó una base de datos de DEFRA (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales), junto con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y las Directrices para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero de 2006 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). La herramienta fue desarrollada por Clear Standards Inc. en colaboración con WRS.

Esta herramienta fue utilizada para los factores de emisión para el transporte del Hormigón Convencional.

A continuación, se muestra en la Figura 5, el límite del sistema y su respectivo flujo elemental para el ciclo de vida del Hormigón Convencional:



*Figura 5: Limite del Sistema y Flujo Elemental del Hormigón Convencional.
(Elaboración Propia, 2024)*

Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

Dicho esto, se realiza un ICV donde se toman todos los elementos consumidos para su elaboración, tales como el cemento, los áridos, los aditivos, el agua y la energía durante el proceso dentro de las entradas y de los residuos, efluentes y emisiones generados en las salidas de dichos procesos productivos.

Cuando el alcance del sistema se rige en entradas y salidas desde la extracción de materias primas hasta que el producto se pone en el mercado, se le denomina “de la cuna a la puerta”. El cual hace referencia al utilizado en este estudio.

Y cuando se tiene en cuenta solamente las entradas y salidas del sistema productivo, es decir de los procesos de fabricación, se le denomina “de la puerta a la puerta”.

Ahora bien, existe un nuevo enfoque, basado en tener en cuenta que las corrientes de salidas del fin de vida del sistema pueden ser apreciadas como materias primas y/o entradas al mismo sistema o a otro. A este enfoque se le denomina “de la cuna a la cuna”.

A continuación, se hace referencia en la Figura 6, los enfoques de límites de sistemas “de la cuna a la puerta” y “de la puerta a la puerta”, para un ACV:



Figura 6: Alcance de sistemas de un ACV. (Ihobe S.A, 2009)

Para dichas entradas y salidas, en la elaboración del **hormigón convencional**, se encuentra el Límite del Sistema en la Figura 7 y una serie de etapas que se detallan a continuación:

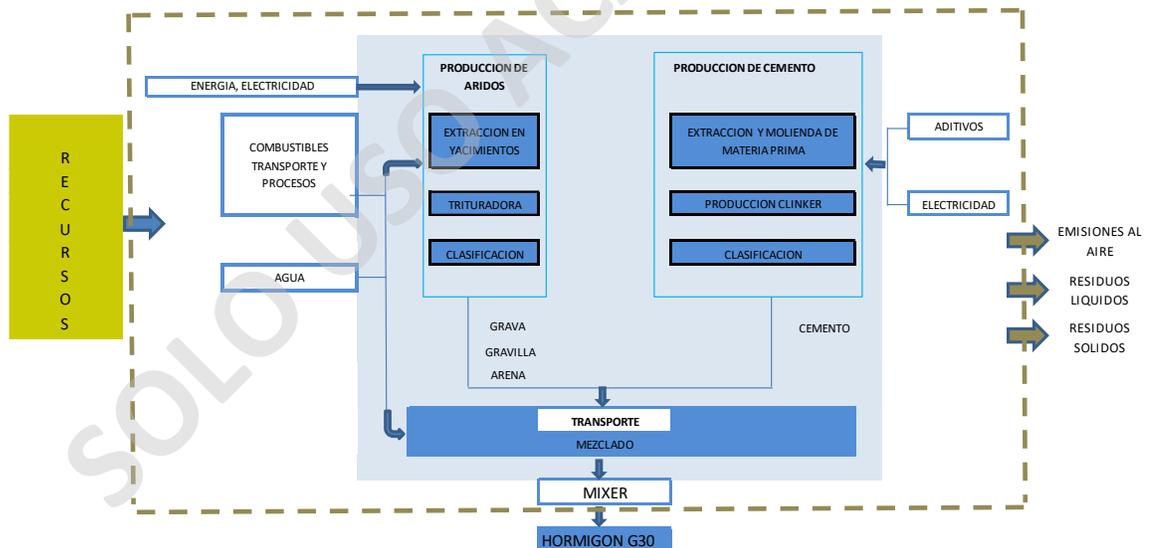


Figura 7: Límite de Sistema del Hormigón. (Elaboración Propia, 2024)

3.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA HORMIGÓN CONVENCIONAL.

ETAPA 1

A) Producción de Materias Primas

Comprende la extracción de material pétreo de distintos tamaños, el chancado, harneado, selección y acopio. Se habla entonces de árido tratado en contraposición al árido usado desde su estado natural. Los productos intermedios son grava, gravilla, y árido fino (arenas).

Las materias primas pétreas se obtienen mediante extracción en minas naturales a cielo abierto, depósitos naturales, o la explotación de canteras a través de voladuras controladas en el caso de materiales rocosos y duros como lo son la caliza, mientras en el caso de materiales blandos (Arcilla) se utilizan excavadoras para su extracción, al igual que en la extracción de áridos como la arena y gravilla.

Este proceso se realiza generalmente en canteras o minas a cielo abierto. Una vez extraídos, los áridos son transportados a la planta de producción de cemento.

Seguido, se presenta en la Tabla 6 la Huella de Carbono para el proceso de Producción de Áridos, para 1m³ de Hormigón:

Producto	Unidad	Producción de Áridos
Hormigón premezclado G30 o en su defecto H30, para 1m ³ .	Kg CO ₂ eq	7,75

Tabla 6: Cambio Climático para Producción de Aridos .(ECOBASE Construcción, IDIEM Universidad de Chile, 2015)

Según datos obtenidos, para el proceso de producción de áridos de 1 m³ de hormigón se tiene una liberación (salida) de **7,75 kg CO₂eq**.

B) Transporte de Materias Primas

Para el transporte de materias primas de la Etapa A, se considera un vehículo pesado rígido con cargas separadas por cada materia: Arena, Gravilla y Agua. Se considera una distancia de 47 km desde los depósitos o yacimientos autorizados hasta la planta (Rio Maipo a Planta Hormigonera Bio Bio Providencia) y con una carga para la ejecución de 1m³ de hormigón.

Los resultados obtenidos para el transporte de materias primas se ven reflejados en la tabla anexada con una unidad de medida de toneladas métricas de CO₂eq, a continuación, se presenta la conversión de los resultados en kg de CO₂eq:

- Transporte de 585 kg de Arena, 6 kg CO₂eq.
- Transporte de 1145 kg de Gravilla, 11 kg CO₂eq.
- Transporte de 200 lts de Agua, 2 kg CO₂eq.

Dando como resultado una suma total de **19 kg CO₂eq**, para la etapa de transporte de materias primas.

Los factores de emisión utilizados en esta herramienta provienen del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido (DEFRA), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y las Directrices para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero de 2006 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). La herramienta fue desarrollada por Clear Standards Inc. en colaboración con WRS. (Se anexa documento)

C) Producción de Cemento.

El cemento se produce con la pulverización del clinker, más la adición de una o más formas de yeso y aditivos. Comprende la extracción de materias primas, homogeneización de materiales y dosificación, producción clinker a través de proceso de calcinación en horno, molienda de clinker y adición final de yeso.

Seguido, se presenta en la Tabla 7 la Huella de Carbono para el proceso de Producción de Cemento, para 1m³ de Hormigón:

Producto	Unidad	Producción de Cemento
Hormigón premezclado G30 o en su defecto H30, para 1m ³ .	Kg CO ₂ eq	202,33

Tabla 7: Cambio Climático para Productos de Hormigón. (ECOBASE Construcción, IDIEM Universidad de Chile, 2015)

Según datos obtenidos, para el proceso de producción de cemento de 1 m³ de hormigón se tiene una liberación (salida) de **202,33 kg CO₂eq**.

D) Fabricación del Producto.

Consiste en el proceso de mezcla y amasado del agua, gravilla, arena y cemento, en las proporciones específicas para cada producto.

El agua utilizada en la elaboración del hormigón generalmente se extrae de fuentes potables como ríos, lagos o pozos. También se puede utilizar agua reciclada o agua de lluvia, siempre y cuando cumpla con los estándares de calidad y no contenga contaminantes que puedan afectar la resistencia y durabilidad del hormigón. Es importante utilizar agua limpia y libre de impurezas para garantizar la calidad del hormigón producido.

A continuación, se presenta en la Tabla 8 la Huella de Carbono para el proceso de Fabricación del Producto, para 1m³ de Hormigón:

Producto	Unidad	Fabricación del Producto
Hormigón premezclado G30 o en su	Kg CO ₂ eq	19,00

defecto H30, para 1m3.		
---------------------------	--	--

Tabla 8: Cambio Climático para Productos de Hórmigón. (ECOBASE Construcción, IDIEM Universidad de Chile, 2015)

Según datos obtenidos, para el proceso de fabricación de 1m³ del producto se tiene una liberación (salida) de **19,00 kg CO₂eq**.

Por conclusión del límite del sistema para el cálculo de los factores de emisiones del hormigón convencional de tipo G30 o en su defecto H30 se obtiene un **total de 248,08 kg CO₂eq** por m³.

3.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO.

ETAPA 2

Para la elaboración del **hormigón geopolimérico**, se obtuvo datos y resultados de estudios conformado por un estudiante de la Universidad de Chile, Juan Fernando Albornoz, 2015. Se tomo como antecedente el HGHD (Hormigón Geopolimérico Hardjito D), mezcla común de hormigón, la cual trata sobre el desarrollo y propiedades del hormigón geopolimérico en base a ceniza volante, de la Universidad Tecnológica de Curtin en Australia, el año 2005. Creado por el profesor ingeniero D. Hardjito y BV Rangan. Esta mezcla ha sido evaluada en estudios anteriores realizados en el IDIEM (Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales). Los resultados de factores de emisión fueron obtenidos mediante el software Simapro, donde Juan facilitó una tabla de cálculo simplificada en Excel con las bases de datos y resultados del software.

Cabe destacar que el software Simapro es una herramienta analítica utilizada para medir la huella ambiental de productos y servicios de una manera objetiva y con alto nivel de transparencia. Es usado por cientos de organizaciones en todo el mundo.

La aplicación de un hormigón geopolimérico está compuesto principalmente por ceniza volante, áridos, agua, soluciones alcalinas e hidróxido de sodio y en ocasiones superplastificante. Estos últimos se usan especialmente para poder obtener un hormigón geopolimérico con mejor trabajabilidad, disminuir la cantidad de aire atrapado en la mezcla, aumentar la resistencia a la compresión y reducir la cantidad de agua.

En el estudio e investigación realizado por D. Hardjito y BV Rangan fueron utilizados reductores de agua como superplastificantes, solución de hidróxido de sodio y de silicato de sodio.

Dicho lo anterior, se presenta en la Tabla 9 las respectivas dosificaciones para 1m³ de hormigón geopolimérico:

Producto	Unidad	HGHD
Ceniza Volante	Kg/m ³	408
Solución de Hidróxido de Sodio	Kg/m ³	41
Solución de Silicato de Sodio	Kg/m ³	103
Grava	Kg/m ³	277
Gravilla	Kg/m ³	1017
Arena	Kg/m ³	554
Reductor de Agua	Kg/m ³	6
Agua Extra	Kg/m ³	22,5

Tabla 9: Dosificaciones HGHD (Elaboración Propia, Información: Alborno, 2015).

A) Producción de Materias Primas y Ceniza Volante.

Al igual que en el proceso de la producción de materias primas para el hormigón convencional, se toman datos similares más la incorporación de Ceniza Volante la cual debe ser obtenida directamente del proceso de centrales termoeléctricas en base a carbón pulverizado, por ende, no se aplica a cenizas volantes acopiadas en su disposición final y

generadas por el proceso de co-combustión y las obtenidas por incineración de residuos municipales, agrícolas, forestales e industriales. A no ser que el generador de electricidad tome las medidas necesarias para hacerlas aptas, homogéneas y libre de contaminación, para usarlas en el hormigón.

Existen posibilidades en que las cenizas volantes no estén en óptimas condiciones en temas de humedad y finura, es por esto que en ocasiones es necesario un proceso de secado y tamizado previo. Lo cual no está considerado en este estudio.

La clase de ceniza utilizada dependerá de las composiciones químicas de esta. Y estas se clasifican usualmente por su uso en cementos. Estas pueden ser de Clase C (subproducto de combustión de baja calidad) y Clase F (subproducto de carbones de buena calidad), según la norma ASTM. Estas se diferencian principalmente por la concentración de Óxido de Calcio que presentan. La ceniza Clase F tiene baja concentración de esta, mientras que la Clase C posee una alta concentración. Estas diferencias de concentraciones provoca que la ceniza Clase C se endurezca con el agua, es decir sea cementicea, por otro lado la de Clase F es puzolánica de forma natural, por ende necesitaría Ca(OH)_2 (Hidróxido de Calcio) y agua para endurecer.

En este caso se obtiene una ceniza de Clase F, la cual se consigue de la Central Santa María, ubicada en la comuna de Coronel, Región del Bio Bio. Esta central utiliza como combustible principal carbón pulverizado tipo bituminoso. Sin embargo, no se obtuvo información sobre las propiedades químicas de las cenizas volantes de esta termoeléctrica, es dado a esto que se toma como referencia las Cenizas Clase F de la Central Angamos. Tras varios levantamientos de información se logró establecer que las cenizas volantes de la Central Santa María, con la Central Angamos son similares, esto porque las dos usan el mismo tipo de carbón Bituminoso.

Dado a esto es que se toma en consideración la composición de Ceniza Volante en carbón ocupado en Central Angamos.

Se presenta a continuación la Tabla 10 de composición de Ceniza Volante presente en carbón en Central Angamos, la cual será utilizada como referencia para la Central Santa María.

Composición		Unidad	Total
Silicio	SiO ₂	%	59,59
Aluminio	Al ₂ O ₃	%	18,55
Hierro	Fe ₂ O ₃	%	9,25
Calcio	CaO	%	3,08
Magnesio	MgO	%	1,53
Titanio	TiO ₂	%	0,88
Sodio	Na ₂ O	%	1,85
Potasio	K ₂ O	%	1,60
Fósforo	P ₂ O ₅	%	0,13
Manganeso	Mn ₃ O ₄	%	0,02
Azufre	SO ₃	%	2,37
Indeterminado		%	1,15
TOTAL		%	100,00

Tabla 10: Composición de Ceniza Volante Presente en Carbón Ocupado en Central Angamos, Referente para Central Santa María. (Albornoz, 2015)

Para este proceso de producción de Materias Primas y Ceniza Volante se considera una cantidad de 408 kg de Ceniza Volante para ser transportada, destinadas de la Central Santa María.

Junto a esto se considera la extracción de las materias primas como la arena, grava, gravilla, agua.

Según datos obtenidos, para el proceso de Producción de Materias Primas de 1m³ del producto Hormigón Geopolimérico se tienen los siguientes factores de liberación (salida) de kg CO₂eq:

- Producción de Grava: 1,68 kg de CO₂eq.
- Producción de Gravilla: 2,96 kg de CO₂eq.
- Producción de Arena: 1,55 kg de CO₂eq.
- Producción de Agua: 1 kg de CO₂eq

- Producción aditivo plastificante: 7,023 kg de CO₂eq.

Según resultados obtenidos, para el proceso de Producción de Materias Primas y Ceniza Volante a fin de obtener 1m³ del producto, se tiene una liberación (salida) total de **14,22 kg de CO₂eq** para la producción de Grava, Gravilla, Arena, Agua y Plastificante.

La Producción de Agua se aproxima a 1 kg de CO₂eq.

A.1) Producción de Hidróxido de Sodio.

Este proceso del NaOH se produce mediante un proceso llamado electrólisis de la salmuera. Este proceso se lleva a cabo en una celda de electrólisis, donde se pasa una corriente eléctrica a través de una solución de cloruro de sodio (sal común) en agua o más bien agua de mar, el posterior transporte, el enfriado y secado de la solución NaOH resultante, peletizado y envasado. Se considera un transporte de 200 km hacia la planta de hormigón.

En cuanto al proceso de producción del NaOH se obtiene una liberación de **22,51 kg de CO₂eq**.

A.2) Producción de Silicato de Sodio.

El silicato de sodio se produce a partir de la reacción de sílice (SiO₂) y carbonato de sodio (Na₂CO₃) en un horno a altas temperaturas. En la reacción química, la sílice y el carbonato de sodio se combinan para formar silicato de sodio, carbonato de calcio y dióxido de carbono. Para este proceso se incluye la extracción, calcinación de mezcla de sal de roca, piedra caliza y arena, para posterior fundición de mezcla, disolución y filtración de material. Se realiza importación desde el continente asiático hacia al país, debido al alza de este producto en la zona local. Se considera la importación de esta materia prima, por un despacho de 27.000 km por mar.

Para el proceso de producción del Silicato de Sodio se obtiene una liberación de **48,63 kg de CO₂eq**.

B) Transporte de Materias Primas y Ceniza Volante.

Debe considerarse el transporte de la Ceniza Volante desde la termoeléctrica hasta la central de planta, la cual será una distancia de 540 km (Central Termoeléctrica Santa María, en la región del Bio Bio, hasta la Planta Hormigonera Bio Bio en la región Metropolitana de Santiago). Junto con esto se considera el transporte de las materias primas como: Arena, Gravilla, Grava y Agua. Con una distancia de 47 km. Y el transporte de la Solución NaOH con una distancia de 200 km y la importación de la Solución de Silicato de Sodio, transportado mediante embarcadero con una distancia de 27000 km.

Los resultados obtenidos para el transporte de materias primas y ceniza volante se ven reflejadas en la tabla anexada y a continuación un punteo de ellas:

- Transporte de Grava: 1,96 kg de CO₂eq.
- Transporte de Gravilla: 7,23 kg de CO₂eq.
- Transporte de Arena: 3,93 kg de CO₂eq.
- Transporte de Ceniza Volante: 33,88 kg de CO₂eq.
- Transporte de Solución NaOH: 1,24 kg de CO₂ eq.
- Transporte de Solución Silicato: 24,67 kg de CO₂eq.

Para el proceso de transporte se obtiene una liberación total de **72,93 kg de CO₂eq.**

C) Procesamiento de Materias Primas con Ceniza Volante.

Para esta etapa no se considera el proceso de calcinación ni molienda de Cenizas Volantes puesto que ya vienen de forma pulverizadas, por ende, esta etapa no se considera en el estudio.

Teniendo todas las emisiones de cada materia prima para la elaboración de 1m³ de Hormigón Geopolimérico, se obtiene la huella de carbono asociada a la mezcla. Junto a

esto se integra el uso de combustible y energía ocupados para la estimación. La cual se presenta a continuación mediante la Tabla 11:

Proceso/ Material	Cantidad x m3	Kg CO2eq	% de HC por Proceso
Ceniza Volante	408 kg	33,88	21 %
Grava	277 kg	3,65	2%
Gravilla	1017 kg	10,19	6%
Arena	554 kg	5,49	4%
Solución NaOH	41 kg	23,75	15%
Solución Silicato	103 kg	73,30	45%
Agua extra	22,5 kg	1	0,7%
Plastificante	6 kg	7,02	4%
Diesel machine	22,69 MJ	1,96	1%
Heat, natural gas	16,6 MJ	1,26	0,8%
Electricidad SIC	4,36 kWh	0,57	0,5%
TOTAL, Kg CO2eq		162,07	100%

Tabla 11: Huella de Carbono Hormigón Geopolimérico. (Albornoz, 2015)

Cabe destacar, que a la suma total de emisiones de las etapas (158,29 kg de CO₂eq) para la elaboración de 1m³ de Hormigón Geopolimérico se le debe sumar el diesel, gas y electricidad para los requerimientos de cada proceso u etapa (3,79 kg de CO₂eq), dando así una huella de carbono total de **162,07 kg de CO₂eq** para la fabricación del hormigón Geopolimérico.

La central termoelectrica Santa Maria, en Colbun, tiene como objetivo al año 2025 lograr valorizar el 98% de las cenizas, en la cual la generacion de residuos de esta central corresponde a un 99% de cenizas (volantes y escorias). En el 2020 un 58% de esas cenizas fueron valorizadas y usada en cementeras.

A continuación se muestra la Tabla 12, la cual muestra el pesaje total de residuos generados por la termoelectrica en toneladas, donde se encuentra dentro de ella a las cenizas volantes.

Composición de los Residuos	Residuos Generados			Residuos no Destinados a Eliminación (Reciclados o Reutilizados)			Residuos Destinados a Eliminación		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Residuos Peligrosos Totales	270	262	422	0	0	0	270	262	422
Residuos No Peligrosos Totales	103.452	75.145	85.328	49.012	47.817	48.516	54.440	27.328	36.812
Cenizas	102.962	74.793	84.760	48.983	47.776	48.511	53.979	27.017	36.249
Otros Residuos	490	352	568	29	41	5	461	311	563
Residuos Totales	103.722	75.407	87.750	49.012	47.817	48.516	54.710	27.590	3.234

Tabla 12: Peso Total de Residuos Generados – Chile (en Toneladas). (Colbun, Memoria Integrada, 6.4, 2020)

Como se aprecia en la Tabla 12 existe hasta el año 2020 una suma significativa de residuos generados en cuanto a Ceniza Volante, siendo la tendencia en disminuir cada

año. No obstante, se puede interpretar que en el último año se obtuvieron 84.760.000 kg de residuos generados a partir de ceniza, esto quiere decir que, si consideramos a través del estudio un total de 408 kg de ceniza para la formación del hormigón geopolimérico, se puede expresar claramente que se puede llegar a fabricar 207.745 m³ aproximadamente de hormigón geopolimérico al año, según la disponibilidad de recursos y de ceniza en la Central Santa María.

3.5 DIAGNÓSTICO TÉCNICO AMBIENTAL PARA LA INCORPORACIÓN DE CENIZAS VOLANTES EN EL HORMIGÓN

Se realiza un diagnóstico técnico ambiental de los hormigones con el fin de evaluar la incorporación de ceniza volante al hormigón a través de los sistemas desarrollados desde una perspectiva ambiental y sostenible. Y así a partir de los antecedentes identificar carencias en aspectos técnicos o normativos para finalmente poder fomentar y facilitar el trabajo con ceniza volante o elementos geopoliméricos.

Los aspectos ambientales específicos a evaluar serán los gases de efecto invernadero.

Los impactos ambientales potenciales asociados con el hormigón convencional se pueden identificar directamente a través de sus procesos de ciclo de vida y huella de carbono, la cual se presentan de tal manera:

A) Huella de Carbono:

- Producción de materias primas (A): 7,75 kg de CO₂eq.
- Transporte de materias primas (B): 19 kg de CO₂eq.
- Producción de cemento (C): 202,33 kg de CO₂eq.
- Fabricación del producto (D): 19 kg de CO₂eq.

Los impactos ambientales potenciales asociados con la incorporación de la ceniza volante al hormigón, se pueden identificar directamente a través de sus procesos de ciclo de vida y huella de carbono, la cual se presentan de tal manera:

A) Huella de Carbono:

- Producción de materias primas y ceniza volante (A): 14,22 kg de CO₂eq.
- Producción de hidróxido de sodio (A.1): 22,51 kg de CO₂eq.
- Producción de silicato de sodio (A.2): 48,63 kg de CO₂eq.
- Transporte de materias primas (B): 72,93 kg de CO₂eq.
- Procesamiento de materias primas con ceniza volante (C): no se considera puesto que ya viene en su disposición.

Para el diagnóstico, se logra relacionar que existe en casi la totalidad del ciclo de vida del hormigón convencional una mayor huella de carbono que el hormigón geopolimérico. Se logra apreciar que para esta última unas de las actividades donde se libera más CO₂ es en la producción de las soluciones alcalinas, siendo esta un material con distintas dificultades de elaborar y no tan adentrada en su conocimiento para la formación de la tecnología en sus respectivas normas. No obstante, sin duda una de las alternativas para mitigar los impactos ambientales es la incorporación de la tecnología del hormigón geopolimérico hacia la industria cementera donde esta posee resistencia, durabilidad y propiedades mecánicas muy parecidas a la del hormigón convencional. Esto con el fin de reducir su huella de carbono y ampliar el espectro hacia nuevos horizontes sustentables como lo es la incorporación de este residuo, lo cual significaría la reducción del consumo de recursos naturales y una adecuada gestión de los residuos. Sin embargo, esta tecnología no se encuentra completamente desarrollada en el ámbito normativo y técnico por lo cual es apoyada por distintas normas chilenas relacionadas con el hormigón y el cemento. En caso contrario, si lo está el hormigón convencional que existen normas completas y han sido mantenidas en el transcurso de los años. Esto se da porque la ceniza volante y elementos geopoliméricos no están ampliamente regulados en la mayoría de los países, ya que es un material relativamente nuevo para muchos, siendo que existe hace muchos años. A pesar de que exista una norma que refiera a los requisitos de las propiedades químicas y físicas y los procedimientos de control de calidad, como lo es la norma NCh 3520:2020. Es importante que las

autoridades competentes establezcan normativas que garanticen su correcto diseño, fabricación, colocación y mantenimiento, exclusivamente para el hormigón geopolimérico.

Junto con esto potenciar las normativas ambientales locales para el correcto y ligero desarrollo de esta tecnología, estableciendo regulaciones claras y actualizadas que aborden el manejo, disposición y uso de la ceniza volante, garantizando su cumplimiento con los estándares de calidad ambiental y de salud pública.

Además, carece de incentivos fiscales, subsidios u otras políticas de fomento que promuevan el uso de la ceniza volante como material alternativo en la construcción y otras aplicaciones industriales.

Al abordar tanto los aspectos técnicos como los normativos de manera integral y colaborativa, se puede fomentar y facilitar el trabajo con ceniza volante en Chile, promoviendo su uso sostenible y contribuyendo a la reducción de residuos y la mejora de la sostenibilidad en diversas industrias y sectores.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

4.1 BALANCE DE CARBONO

Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

Según estudios, en la comparación entre hormigón convencional y hormigón geopolimérico, los rangos de valores de CO₂eq estimados a nivel internacional varían considerablemente a favor del hormigón geopolimérico. La mayoría de las estimaciones indica que el hormigón geopolimérico presenta valores de CO₂e entre 26 - 45% más bajos que los presentados por el hormigón en base a cemento portland, inclusive existen estudios en donde la variación es cercana al 80% a favor del hormigón geopolimérico. Estas variaciones son atribuibles a diferencias metodológicas en cuanto a la consideración de los procesos de extracción, procesamiento, y el transporte de materias primas, y/o a la consideración del gasto significativo de energía para la fabricación de los activadores alcalinos. (Albornoz, 2015)

La magnitud y significancia de los impactos ambientales potenciales del sistema se pueden distinguir en los procesos y el uso de recursos utilizados en cada etapa de los sistemas. Los procesos de elaboración para el hormigón geopolimérico tienden a tener un menor impacto ambiental referente a la categorización de calentamiento global, esto se da por los residuos utilizados para su conformación. El carbón pulverizado siendo empleado para la producción eléctrica a través de su proceso de quema da como resultado la ceniza volante. Al utilizar este subproducto como sustituto parcial del cemento en el hormigón, reduce o anula la cantidad de cemento necesario en la mezcla, lo que a su vez disminuye la huella de carbono asociada a la producción de hormigón. Por efecto, se puede esclarecer el potencial de calentamiento global (GWP) en la Tabla 13, la cuantificación de emisiones de los procesos de producción de la Etapa 1 y Etapa 2 del presente proyecto de título:

Procesos de Producción	Kg de CO₂eq
Etapa 1 (A, C)	210,08
Etapa 2 (A, A.1, A.2)	85,36

Tabla 13: Kg de CO₂eq Totales en los Procesos de Producción de 1m³. (Elaboración propia, 2024)

4.2 EVALUACIÓN DE INDICADORES RESPECTO DE LA HUELLA DE CARBONO E IMPACTOS AMBIENTALES

Se presenta a continuación el indicador que dará valor a los resultados obtenidos. Como se mencionó en la metodología la evaluación de estos indicadores se realizará a partir de una Escala de Likert. Evaluadas de 1 a 5, donde 1 es muy baja (muy desfavorable) y 5 muy alta (muy favorable). Los indicadores estarán conformados por dos variables desarrolladas a lo largo del documento, estos son Huella de Carbono de Ciclo de Vida e Impactos. Estos indicadores serán respaldados a través de su respectiva señalización en el documento y otros por literatura, ya evaluada a partir del requerimiento bibliográfico. Este último será evaluada en los rangos desde “Totalmente en Desacuerdo”, calificada

como 1, hasta “Totalmente de Acuerdo”, calificada como 5, A continuación, se presentan los indicadores:

- Ítem 1: Los residuos de ceniza volante y su capacidad de ser reutilizados.
Evaluación: 5, muy alta (muy favorable).
Respaldo: En la Tabla 12, se da a conocer la cantidad total de residuos generados de ceniza volante por año. Se demuestra que existe un total de 84.760 toneladas de residuo de ceniza volante en el año 2020, siendo estos casi la mitad reutilizados o reciclados y la otra mitad destinados a eliminación. Si se reutilizara la totalidad de residuos generados correspondiente a la ceniza, se podría llegar a fabricar 207.745 m³ de hormigón geopolimérico.
- Ítem 2: Las salidas de HC, para el proceso de producción del hormigón geopolimérico en comparación al hormigón convencional.
Evaluación: 5, muy alta (muy favorable).
Respaldo: En la Tabla 13, se da a conocer el potencial de calentamiento global, donde se logra interpretar los resultados desfavorables para el proceso de producción del hormigón convencional, siendo este proceso casi 3 veces más contaminante que el del hormigón con ceniza volante.
- Ítem 3: Las salidas de HC, para el proceso de transporte del hormigón geopolimérico en comparación al hormigón convencional.
Evaluación: 2, baja (desfavorable).
Respaldo: En el punto B de la Etapa 2 se aprecia el total de kg de CO₂eq para el transporte de materias la cual equivale a 72,93 kg de CO₂eq. Siendo el transporte de la ceniza volante con más repercusión, esto debido a la distancia en que se encuentra la central termoeléctrica de la planta hormigonera. En cambio, para el hormigón convencional las distancias de transportes son mas cortas, ya que se encuentran todas las materias en una misma zona y cerca de la hormigonera. Se demuestra en su descarga de HC con un total de 19 kg de CO₂eq.
- Ítem 4: Las salidas de HC, para la etapa de procesamiento de ceniza volante y materia prima del hormigón geopolimérico.

Evaluación: 5, muy alta (muy favorable).

Respaldo: Las descargas de HC generadas para la etapa de procesamiento de ceniza volante y materia prima, se presentan en el punto C de la Etapa 2. Y se deduce que para este proceso no existe una descarga de kg de CO₂eq, esto porque la ceniza volante ya viene en su disposición para ser utilizada y para este caso no es necesario algún proceso adicional para ser manejada. Dado a esto se entiende que su liberación nula del proceso es beneficioso en comparación al del hormigón convencional del punto C de la Etapa 1.

- Ítem 5: Repercusión ambiental del hormigón convencional.

Evaluación: 1, muy baja (muy desfavorable).

Respaldo: Se entiende y se da a conocer a lo largo de la presente tesis las consecuencias ambientales que trae consigo la elaboración del hormigón convencional. Tales como el agotamiento de recursos para su fabricación, los procesos por los que tienen que pasar las materias primas como lo es la piedra caliza y la arcilla, la formación del Clinker, etc. La cual libera una cantidad significativa de CO₂ al ambiente, dañando así el ecosistema y la salud de las personas.

- Ítem 6: Las salidas totales HC, del hormigón geopolimérico.

Evaluación: 4, alta (favorable).

Respaldo: En la Tabla 11, se aprecia que la salida total de emisiones de kg de CO₂eq del hormigón geopolimérico es de un total de 162,07 para 1m³ de hormigón, lo cual se considera bajo en comparación a la del hormigón convencional con un total de 248,08 kg de CO₂eq. Esto se da por la reutilización de residuos y por el ahorro energético en algunos de sus procesos.

- Ítem 7: Repercusión ambiental del hormigón geopolimérico.

Evaluación: 5, muy alta (muy favorable).

Respaldo: En el transcurso del documento se logra identificar, tanto en el marco teórico como en el desarrollo, las repercusiones ambientales que genera la elaboración del hormigón geopolimérico. Algunas de estas son las reducciones

de emisiones de CO₂, el menor consumo de recursos naturales, la durabilidad y resistencia positiva que presentan, etc.

- Ítem 8: Uso de energía del hormigón geopolimérico.

Evaluación: 4, alta (favorable).

Respaldo: El hormigón geopolimérico requiere una menor cantidad de energía en su producción en comparación con el hormigón convencional, ya que no se necesita calentar a altas temperaturas como en la fabricación del cemento Portland. Además, los materiales utilizados en la fabricación del hormigón geopolimérico suelen ser subproductos de otras industrias, lo que reduce la cantidad de energía necesaria para su obtención. Se puede apreciar en el marco teórico y comparando los de procesos de producción de los hormigones.

- Ítem 9: El coste total de los productos químicos necesarios para fabricar este hormigón geopolimérico es más barato que el coste total de una tonelada de cemento Portland.

Evaluación: De acuerdo, 4.

Respaldo: Harditoy, Rangan. 2005.

- Ítem 10: Reducción de CO₂emisiones: La ceniza volante puede reducir el CO₂ de emisiones si reduce la cantidad de clinker utilizado en el cemento y el hormigón.

Evaluación: Totalmente de acuerdo, 5.

Respaldo: Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. 2017.

- Ítem 11: Reducción del uso de material virgen: Con el uso de ceniza volante en cemento y hormigón, se reduce el uso de materias primas vírgenes como la piedra caliza y la arcilla utilizadas para producir clínker.

Evaluación: Totalmente de acuerdo, 5.

Respaldo: Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. 2017.

- Ítem 12: Reducción de residuos: La carbonatación de ceniza volante reduce la cantidad de reservas utilizables de ceniza volante.

Evaluación: De acuerdo, 4.

Respaldo: Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. 2017.

- Ítem 13: Reducción de costes: Como sustituto del clinker y como sustituto del cemento, la ceniza volante reduce los costes del cemento, ya que la ceniza volante es, en promedio, más económico que el clinker y el cemento.

Evaluación: De acuerdo, 4.

Respaldo: Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. 2017.

- Ítem 14: Mayor calidad: Las cenizas volantes en el hormigón contribuyen a las propiedades de dureza del hormigón a través de la actividad hidráulica y puzolánica.

Evaluación: Totalmente de acuerdo, 5.

Respaldo: Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. 2017.

Los resultados cuantificados obtenidos en el desarrollo de la escala de Likert corresponden a indicadores respaldados por los mismos efectos obtenidos en el documento presente. Para la suma de la evaluación numérica de 1 a 5 correspondientes a la Huella de Carbono e Impactos de los ítems del 1 al 8, se encuentra lo siguiente:

- Con una suma total de 1 punto se encuentra la evaluación “Baja (2)”. “Desfavorable”.
- Con una suma total de 1 punto se encuentra la evaluación “Muy Baja (1)”. “Muy Desfavorable”.
- Con una suma total de 4 puntos se encuentra la evaluación “Muy Alta (5)”. “Muy Favorable”.
- Con una suma total de 2 puntos se encuentra la evaluación “Alta (4)”. “Favorable”.

En cuanto a los resultados cuantificados obtenidos para los indicadores correspondientes a respaldo por literatura, es decir referencias bibliográficas, se consideró una evaluación numérica de 1 a 5 pertinentes a Impactos, referente a los ítems del 9 al 14. Dicho esto, se encuentra lo siguiente:

- Con la suma total de 3 puntos se encuentra la evaluación “Totalmente de Acuerdo (5)”.
- Con la suma total de 3 puntos se encuentra la evaluación “De Acuerdo (4)”.

Interpretación de Resultados

En efecto a los indicadores de huella de carbono e impacto de la escala de Likert y dado a los resultados cuantificados obtenidos se deduce que la huella de carbono del hormigón geopolimérico en la mayoría de sus procesos es más beneficioso para el ambiente y su desarrollo. Esto se da por su menor irradiación de gases de efecto invernadero, en comparación con el hormigón convencional cuyos procesos son más perjudiciales para el medio ambiente y junto con eso es más costoso para realizar.

En cuanto a los resultados cuantificados de los Ítems del 1 al 8 se aprecia que la evaluación con mayores puntos se encuentra en “Alta (4)”, “Favorable” y “Muy Alta (5)”, “Muy favorable” para la huella de carbono y sus impactos en referencia al hormigón con ceniza volante, por lo tanto, es beneficioso su aplicación.

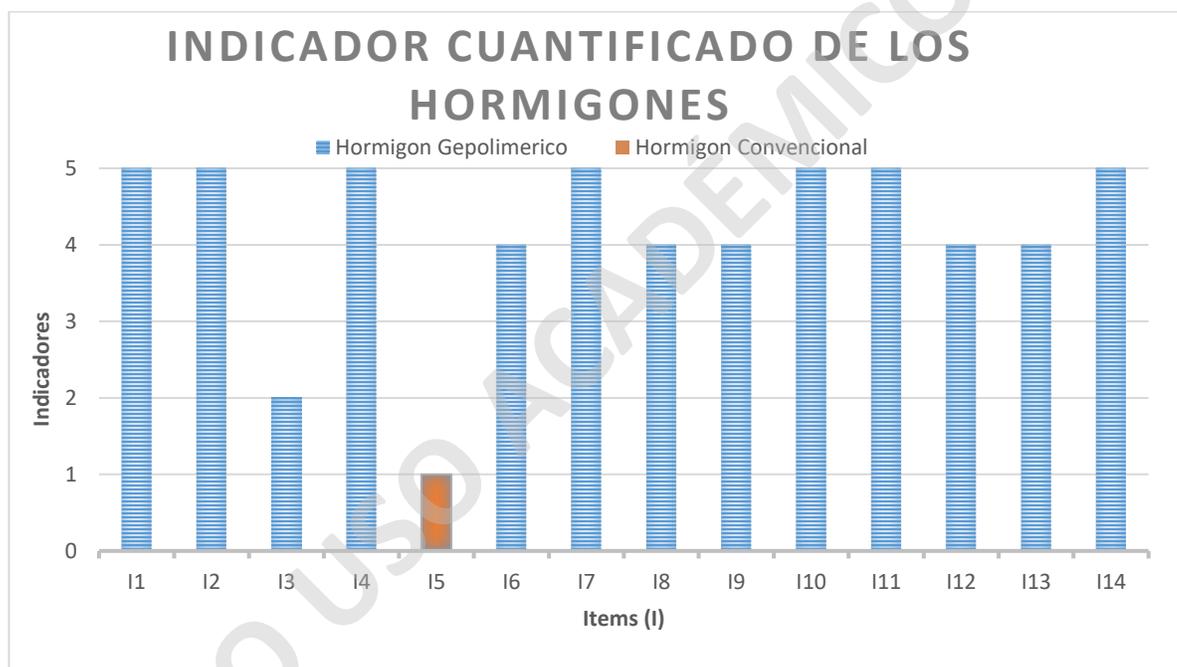
Por otro lado, los resultados cuantificados de los Ítems 9 al 14 dan a conocer que el hormigón con ceniza volante es mas bajo en costo, posee una gran resistencia, reduce los residuos y su captación de reserva utilizables. Tal como se observa en la evaluación cuantificada los indicadores desarrollados bajo literatura con mayores puntajes son “Totalmente de Acuerdo (5)” y “De Acuerdo (4)”, lo cual hace referencia al nivel de beneficio que conlleva aquel hormigón sustentable, teniendo la mayoría de los resultados a su favor.

También se destaca la gran contaminación que genera la elaboración del hormigón convencional y repercusión ambiental que tiene su ciclo de vida.

Del capítulo 4.1, se puede dar cuenta que la producción de 1m³ de Hormigón Geopolimérico (Etapa 2) descarga 124,72 kg de CO₂eq menos que el Hormigón Tradicional (Etapa 1), este último representa un 59% más de las emisiones, por ende esto quiere decir que los procesos de producción del Hormigón Geopolimérico son significativamente más provechosos puesto que está conformado por aluminosilicatos

proveniente de un segundo ciclo el cual no necesariamente requiere de un procesamiento adicional para ser aplicado. Colaborando así con la circularidad del hormigón, atesorando la capacidad de utilizar este residuo de forma continua en ciclos de producción, minimizando la generación de residuos y promoviendo la sostenibilidad en la industria de la construcción.

A continuación, se presenta las siguientes graficas donde se reflejan los resultados de cada ítem de los indicadores utilizados en la Escala de Likert:



4.3 CIRCULARIDAD

Al promover la circularidad de la ceniza volante en el hormigón, se fomenta un enfoque más sostenible en la industria de la construcción, reduciendo la dependencia de materias primas no renovables y minimizando la generación de residuos. Además, se crea un ciclo de producción más eficiente y respetuoso con el medio ambiente, contribuyendo a la economía circular y a la mitigación del cambio climático.

Junto con esto existe una iniciativa multisectorial que busca fomentar y promover una gestión sustentable en cuanto a los residuos, logrando así impulsar el crecimiento

económico sustentable, reduciendo el impacto medioambiental y un mayor desarrollo social. Donde todo lo que no le sirve a una entidad es aprovechado por otra, lo cual genera un cambio de paradigma al ser una economía basada en nuevos modelos de negocios. Generando en este caso una cadena de valor dado a la utilización de residuos de un proceso concluido a un nuevo ciclo productivo como es el caso del hormigón geopolimérico al considerar el desecho de una termoeléctrica para su elaboración. Ocasionando un nuevo valor asociado a la circularidad de los recursos. Y fomentando la reutilización y gestión de residuos para así acelerar la transformación de la industria hacia una economía y desarrollo más sostenible.

A continuación, se presenta un mapa conceptual que resume y compara la Huella de Carbono del Hormigón Geopolimérico con el Hormigón Convencional y concluye con una breve interpretación en base a la economía circular. Refiérase a la Figura 8:

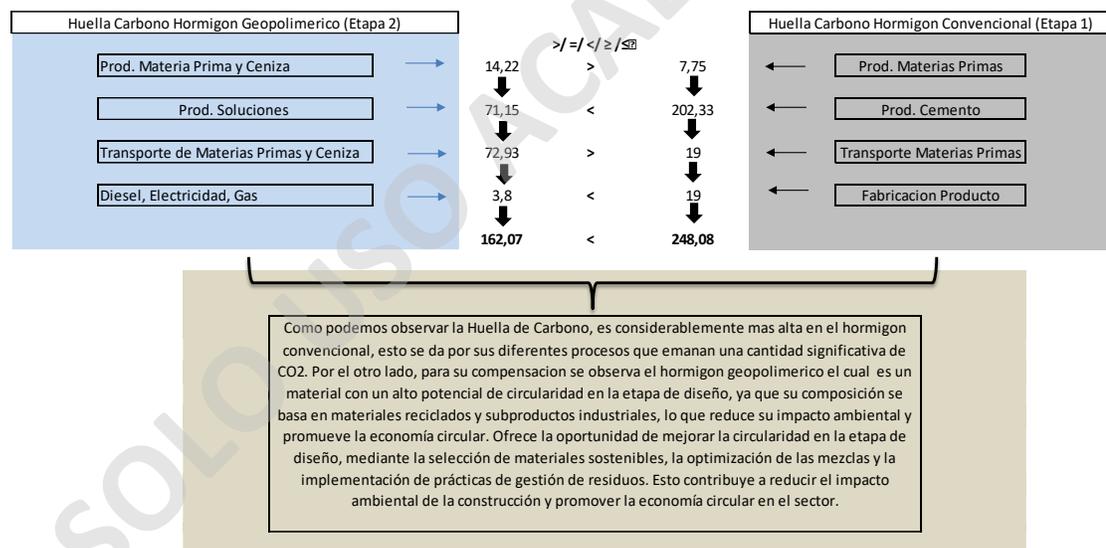


Figura 8: Huella de Carbono y Circularidad. (Elaboración Propia, 2024)

Se establece como potencial de calentamiento global (GWP) los procesos de producción de ambos hormigones, siendo el de la Etapa 1 con más repercusiones hacia el ambiente teniendo más implicancia los procesos de producciones del cemento como tal, generando una salida de 210,08 kg de CO₂eq, lo que representa un 64% más que el hormigón geopolimérico. Los detalles se aprecian en la Tabla 7.

4.4 GENERACIÓN DE RESIDUOS

En cuanto a la generación de residuos obtenidos de la central termoeléctrica se logra valorizar la mayor parte de ellas, correspondiendo estos residuos a un total de 84.760 toneladas consideradas para el año 2020. La interpretación que se realizó primitivamente en la Tabla 12 da a conocer y genera un hecho de discusión con respecto a lo relevante que es la compensación de este aluminosilicato para ayudar a contrarrestar los impactos ambientales, la degradación al ecosistema y miras a lograr una mayor conservación de los recursos naturales utilizando este subproducto. Este hecho se puede ver reflejado en el siguiente análisis con respecto a su huella de carbono:

Generación de residuos 2020 (cenizas) = 84.760 ton \rightarrow 84.760.000 kg.

1 m³ de hormigón geopolimérico usa = 408 kg de ceniza.

$84.760.000/408= 207.745$ m³ de hormigón geopolimérico al año, según disponibilidad de recursos.

Para 1m³ de hormigón convencional, como elemento principal se tiene la producción de cemento. En cuanto a salida de gases de efecto invernadero de esta, se tiene un total de 202,33 kg de CO₂eq. Siguiendo para 1m³ de hormigón geopolimérico en base a la producción de ceniza volante como elemento principal, se tiene un total de 3,8 kg de CO₂eq, liberando este último un 98% menos de CO₂eq que el hormigón convencional. La cual representa a los usos de gases, electricidad y diésel, dado a que a este subproducto se le da un segundo uso no pasa por procesos adicionales para poder ser aplicada, de modo que llegaría a reemplazar al cemento.

Teniendo estos datos y los de la Tabla 12, se puede interpretar que para 207.745 m³ de hormigón geopolimérico se obtendría una huella de carbono de 116.150,23 kg de CO₂eq. En cambio, para la ejecución de 207.745 m³ de hormigón convencional se obtendrían una liberación de 42.033.045,8 kg de CO₂eq. Esto considerando solo los procesos de producción de cemento y de ceniza volante. Entonces se puede dar cuenta que la producción del cemento para el hormigón sería casi 365 veces más contaminantes que el hormigón geopolimérico respecto a la generación de un año de residuos de cenizas volantes.

No obstante, para el proceso de transporte en la Etapa 1 se obtiene una huella de carbono de 19 kg de CO₂eq, en cambio para la Etapa 2 en el proceso de transporte se tiene una huella de carbono de 72,93 kg de CO₂eq, correspondiente a un 74% más que el del hormigón convencional. En consecuencia, se puede entender que para la Etapa 2 gran parte de los gases de efecto invernadero de las salidas tienen que ver con el transporte de las distintas soluciones que se necesitan para conformar el hormigón geopolimérico y de las distancias en la que debe recorrer la ceniza volante para poder ser utilizado en la planta.

En efecto, el hormigón geopolimérico a través de sus residuos utilizados de segundo ciclo, da la capacidad al sistema para reciclar y reutilizar estos recursos de manera continua, minimizando la generación de residuos y maximizando el valor de los materiales, reduciendo así la necesidad de extraer nuevos recursos y minimizando el impacto ambiental. Este sistema se puede asemejar con los áridos reciclados, dado que se pueden utilizar una y otra vez en diferentes aplicaciones de construcción y obras públicas. Esto significa que se puede evitar la extracción de nuevos recursos naturales y reducir la cantidad de residuos generados, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental.

Además, el uso de áridos reciclados puede reducir los costos de producción y transporte, ya que no es necesario adquirir nuevos materiales ni desechar los residuos generados. Esto también puede contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero asociados con la extracción y transporte de materiales.

4.5 ASPECTOS TÉCNICOS NORMATIVOS

En apoyo existen normativas con amplio conocimiento ya implementadas hace muchos años para la elaboración y diseño del hormigón convencional y el cemento, tales como la NCh 170, NCh 147, NCh 148, etc. Las cuales practican los aspectos técnicos y ambientales para poder ser utilizadas de forma segura en el ámbito de la construcción. No obstante, para el caso del hormigón geopolimérico existe un gran vacío en cuanto a conocimiento, se da porque esta tecnología es una implementación que se ha dado a

conocer hace muy poco tiempo, la cual hace pocos años existe la norma chilena que se está dando a saber para la implementación de la ceniza volante, esta es la NCh 3520, creada en el año 2020, la cual establece los requisitos de las propiedades químicas y físicas de las cenizas volantes para poder ser incorporadas en el hormigón. Estas son fundamentales para garantizar su calidad, durabilidad y conformidad con los estándares y regulaciones pertinentes. La consideración de estos aspectos técnicos y normativos es esencial para garantizar el éxito y la aceptación del hormigón geopolimérico como una alternativa sostenible y viable al hormigón convencional en la industria de la construcción.

5. CONCLUSIONES

El hormigón geopolimérico muestra un gran potencial técnico al ofrecer propiedades mecánicas y durabilidad comparables o incluso superiores al hormigón convencional. Su composición y capacidad para utilizar materiales geopoliméricos como subproductos industriales lo hacen altamente adaptable a diferentes aplicaciones de construcción. Es prometedor desde el punto de vista técnico y ambiental. Por lo que su implementación exitosa requerirá un enfoque integral que aborde con mayor profundidad los requerimientos técnicos y ambientales, tal como en la norma NCh 3520: 2020, garantizando su viabilidad económica, su contribución a la sostenibilidad ambiental y su conformidad con las normativas vigentes. Y así cumplir a cabalidad con los requisitos técnicos necesarios para su aplicación en la construcción de estructuras duraderas y resistentes.

Al analizar el ciclo de vida del hormigón convencional y del hormigón geopolimérico desde el punto de vista del desempeño ambiental y la eficiencia de los procesos, se puede observar que el hormigón geopolimérico presenta ventajas significativas en términos de reducción de emisiones de CO₂, consumo de recursos naturales y generación de residuos. Además, esta tecnología utiliza materiales geopoliméricos como subproductos industriales en lugar de cemento Portland. Siendo así más eficientes en términos de consumo de energía y recursos, lo que resulta en una huella ambiental

reducida en comparación con el hormigón convencional. Por lo tanto, el hormigón geopolimérico se presenta como una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en la industria de la construcción.

El hormigón geopolimérico emerge como una alternativa altamente prometedora y sostenible al hormigón convencional, gracias a su capacidad para reducir significativamente las emisiones de carbono y minimizar el uso de recursos naturales a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta sería una solución integral y sostenible para las necesidades de construcción del siglo XXI, ofreciendo beneficios ambientales, económicos y sociales significativos en comparación con el hormigón convencional. Su adopción y promoción son fundamentales para avanzar hacia una construcción más sostenible y resiliente en todo el mundo.

Después de revisar y comparar el análisis normativo de los hormigones en términos de ciclo de vida y huella de carbono, es evidente que existe una gran variabilidad en los impactos ambientales asociados con su producción y uso. Si bien los hormigones pueden ser una opción duradera y resistente para la construcción, también generan una cantidad significativa de emisiones de carbono durante su ciclo de vida. Para minimizar estos impactos, es crucial considerar el uso de agregados reciclados, cemento con menor contenido de carbono y prácticas de construcción sostenibles en general. En última instancia, es fundamental encontrar un equilibrio entre la durabilidad y la sostenibilidad ambiental al seleccionar materiales de construcción, incluidos los hormigones, para garantizar un desarrollo sostenible a largo plazo.

Al abordar varios aspectos claves de la sostenibilidad y la eficiencia en el ciclo de vida del material se deduce que respecto a la economía circular y gestión de residuos El uso de subproductos industriales, como cenizas volantes y escorias de alto horno, en la producción de hormigón geopolimérico fomenta la economía circular al reutilizar estos materiales en lugar de desecharlos y a la gestión responsable de residuos mediante la incorporación de estos subproductos industriales la cual contribuye a reducir la cantidad

de desechos enviados a vertederos, promoviendo así prácticas más sostenibles en la industria de la construcción. Por otro lado, en términos de huella de carbono y eficiencia en los ciclos de vida se concluye que la evaluación de la huella de carbono revela que el hormigón geopolimérico genera significativamente menos emisiones de CO₂ en comparación con el hormigón convencional, principalmente debido a la reducción en el uso de cemento Portland. Esta reducción en las emisiones de carbono contribuye a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de los objetivos de reducción de carbono a nivel global y local. Finalmente, en el ámbito de la eficiencia se esclarece que el análisis del ciclo de vida del hormigón geopolimérico muestra una mayor eficiencia en términos de uso de recursos naturales, energía y emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el hormigón convencional. Esta eficiencia en el ciclo de vida del material geopolimérico se traduce en beneficios ambientales tangibles, como la conservación de recursos naturales y la reducción del impacto ambiental asociado con la producción y uso del hormigón. Por consecuencia, la metodología utilizada para analizar este material se concluyó de forma satisfactoria y el alcance del proyecto logro lo cometido en cuanto a la demostración de viabilidad de esta tecnología enfocada en la reducción de gases de efecto invernadero y la gestión de los residuos, es decir su desempeño ambiental y economía circular, basada en la literatura.

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto de título se concluye de forma exitosa para la ejecución de los objetivos, principalmente para la comparación entre el hormigón convencional y el geopolimérico, que fue medida a través de una herramienta valiosa como lo es el análisis de ciclo de vida, esta metodología fue integral y transparente, permitiendo una evaluación objetiva de los impactos ambientales de ambos materiales dado a los resultados cuantitativos obtenidos. Lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la selección de materiales de construcción más sostenibles y eficientes.

Chile tiene la capacidad y la oportunidad de desarrollar y utilizar el hormigón geopolimérico como una alternativa sostenible y viable al hormigón convencional. Con

el apoyo adecuado de políticas, investigación, inversión y educación, el hormigón geopolimérico podría desempeñar un papel importante en la industria de la construcción chilena, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico del país. Si bien inicialmente puede haber ciertos costos asociados con la transición al hormigón geopolimérico, a largo plazo, sus beneficios ambientales y su menor necesidad de mantenimiento pueden traducirse en ahorros significativos para los propietarios de proyectos de construcción. Además, su adopción puede generar empleo en la industria de subproductos industriales, promoviendo así el desarrollo económico local.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Martínez, X. Hernández, M. (2022), Materiales Compuestos, Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos, Vol 6, Num 2.

Departamento de Tecnología del Hormigón del ICPA. (2014), Eficiencia Energética del Hormigón para la Construcción de Viviendas Sostenibles, Revista Vial.

Albornoz, J.F. (2015). Cálculo de la Huella de Carbono Asociada a la Elaboración de Hormigones Geopoliméricos en Chile. Tesis de Grado. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Navas, A. Reyes, R. Galvan, L. (2015), Impactos Ambientales Asociados con el Proceso de Producción del Concreto, Revista Enfoque UTE, Vol 6, Num4.

Construye 2025. (2019), Noticias: Escombros de la construcción llenarían 15 veces el Estadio Nacional para 2025 ¿Qué hacemos para evitarlo?

RCD Economía Circular, Hoja de Ruta RCD. (2020), Economía Circular en Construcción 2035.

Instituto de la Construcción. (2021). Áridos Reciclados Disminuirían Fuertemente los Residuos en Construcción.

Acuña, Easton, Ramos, Torres. Fundamenta 45 CChC. (2019). El Sector de la Construcción Ante el Desafío Climático Global.

Anefa. (2004), Explotaciones de Áridos y Medio Ambiente.

Tungsteno, Rubio. (2021), Hormigón para Reducir la Huella de Carbono.

Hormigón al Día. (2020). Entrevista: Áridos Reciclados de Residuos de la Construcción: Hacia una Economía Circular del Hormigón.

Campos A. (2023), Blog: Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de Edificios: que es y como calcularlo.

González. (2021), 7 Grupos de Materiales para la Construcción Utilizados en la Arquitectura Moderna.

Structuralia. (2022), Fibras Minerales en la Construcción: Ventajas y Desventajas.

Symonds Group. (1999), Construction and Demolition Waste Management Practices, and their Economic Impacts. p-3.

Instituto Nacional de Normalización. (2020), Cenizas Volantes para Hormigón-Requisitos.

Preston, Lehne Wellesley. (2019), Energy, Environment and Resources Department. An Inclusive Circular Economy.

O'Reily, Diaz, Bancrofft. (2012)

Molina O. (2008), La Influencia de las Cenizas Volantes como Sustituto Parcial del Cemento Portland en la Durabilidad del Hormigón.

Segui P. (2019), El Hormigón: El Material más Destructivo de la Tierra.

Ramos J. (2017), Evaluar el Potencial de Reciclaje de los Materiales de Construcción de Edificios en Chile.

Oficemen. (2017). El Proceso de Producción

Punto Sustentable. (2023), 15 Materiales Sustentables y Reciclados de Construcción.

Diaz P. (2012), Estudio de Factibilidad de Obtención de Hormigones Geopoliméricos a Partir de Desechos Minerales.

Ortiz J. (2021), Hormigón en Base a Residuos de Termoeléctricas: Un Ahorro Ambiental.

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2022), Compendio Tecnología del Hormigón. 07 – Dosificación de Hormigones.

Hardjito D, Rangan B. (2005), Curtin University of Technology. Development and Properties of Low – Calcium Fly Ash – Based Geopolymer Concrete.

DEFRA (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales)

Gcca. (2021). Asociacion Mundial de Cemento y Hormigón.

GHG Protocol. (2001), Estándar de Contabilidad e Informes Corporativos.

Alberici S, Beer J, Hoorn I, Staats M. (2017), Fly Ash and Blast Furnace Slag for Cement Manufacturing.

Chile Cubica. (2022), Dosificación de Hormigón por Metro Cúbico.

Colbun. (2020), Memoria Integrada. 6.4 Gestion de Residuos.

IDIEM Universidad de Chile, CDT, Fundación Chile, CORFO, Gobierno de Chile. (2015), ECOBASE Construcción.

<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ECOBASE%20Construcci%C3%B3n%201.pdf>

Albornoz, JF. (2015), Herramienta para el Cálculo de la Huella de Carbono del Hormigón Geopolimérico.

<https://www.dropbox.com/scl/fi/jt86971w4bct1ytj28moh/CO2eq-Hormig-n-Geopolim-rico-OFCV.xlsm?rlkey=6mrgmmt5tt6ucz5vf2et2ragc&st=qbkzyyzf&dl=0>

Greenhouse Gas Protocol. (2015), Mobile Combustion GHG Calculation Tool.

<https://www.dropbox.com/scl/fi/gu4mbmew7pk198azgt1e3/Transport Tool v2 6-HMC.xlsx?rlkey=oxg6z7gifixabgr1nft3umpmp&st=q4pysflv&dl=0>

ANEXOS

7.1 TABLA DE CALCULO HORMIGON CONVENCIONAL

5.2 HORMIGÓN

5.2.1 PROCESO

Unidad Declarada:

- Hormigón premezclado H30 (según resistencia): 1 m3 de hormigón.
- Hormigón premezclado H40: 1 m3 de hormigón.
- Mortero: 1 m3 de mortero.

a. Producción de Áridos: Comprende la extracción de material pétreo de distintos tamaños, el chancado, hameado, selección y acopio. Se habla entonces de árido tratado en contraposición al árido usado desde su estado natural. Los productos intermedios son grava, gravilla, y árido fino (arenas).

b. Producción de Cemento: el cemento se produce con la pulverización del clinker, más la adición de una o más formas de yeso y aditivos. Comprende la extracción de materias primas, homogeneización de materiales y dosificación, producción clinker a través de proceso de calcinación en horno, molienda de clinker y adición final de yeso. El producto intermedio es cemento Portland

c. Mezcla de Hormigón: Consiste en el proceso de mezcla y amasado del agua, grava, gravilla arena y cemento, en las proporciones específicas para cada producto.

5.2.2. IMPACTOS PRIORITARIOS

Impacto Cambio Climático por Proceso para cada producto de Hormigón

Producto	Unidad	TOTAL	PROCESOS		
			Producción Áridos	Producción Cemento	Mezcla para formar Hormigón / Mortero
Cambio Climático	Hormigón premezclado H30	229,1	7,75	202,33	19,00
	1 m3	%	100,0%	3,4%	88,3%
	Hormigón premezclado H40	293,24	7,59	266,67	18,97
	1 m3	%	100,0%	2,6%	90,9%
	Mortero 1 m3	237,98	7,69	222,56	7,72
		%	100,0%	3,2%	93,5%

Tabla N° 11 Cambio Climático para productos de Hormigón.

ECOBASE Construcción 65

7.2 TABLA DE CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO PARA PROCESO DE TRANSPORTE DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL



Total GHG Emissions, exclude Biofuel CO2 (metric tonnes CO2e)	0,019
Biofuel CO2 Emissions (metric tonnes)	0

Activity Data

The default emission factors are sourced from the US EPA Climate Leaders program or from the UK DEFRA (for air travel only).

Status	Source Description	Region	Mode of Transport	Scope	Type of Activity Data	Activity Data				
						Vehicle Type (For air transport, see footnote)	Distance Travelled	Total Weight of Freight	# of Passenger	Units of Measurement
	Transporte de Arena	Other	Road	Scope 1	Weight Distance (e.g. Freight Transport)	Road Vehicle - HGV - Rigid - Engine Size >17 tonnes	47	0,585		Tonne Kilometer
	Transporte de Gravilla	Other	Road	Scope 1	Weight Distance (e.g. Freight Transport)	Road Vehicle - HGV - Rigid - Engine Size >17 tonnes	47	1,145		Tonne Kilometer
	Transporte de Agua	Other	Road	Scope 1	Weight Distance (e.g. Freight Transport)	Road Vehicle - HGV - Rigid - Engine Size >17 tonnes	47	0,2		Tonne Kilometer

7.3 TABLAS DE CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Ceniza volante	408 Kg	33,8872
Ceniza volante sin procesar	408 kg	0

Diesel, burned in building machine {GLO} market for ECOBASE	5,9973 MJ	0,5187
Heat, district or industrial, natural gas {RoW} production, at industrial furnace >100kW ECOBASE	0,5304 MJ	0,0404
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW}	220,32 tkm	33,3280

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Grava	277 Kg	3,6509
Producción Grava	1,6815 CO2-eq	1,6815
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} ECOBASE	13,019 tkm	1,9694

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Gravilla	1017 Kg	10,1936
Producción Gravilla	2,9630 CO2-eq	2,9630
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} ECOBASE	47,799 tkm	7,2306

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Arena	554 Kg	5,4926
Producción Arena	1,5538 CO2-eq	1,5538
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} ECOBASE	26,038 tkm	3,9388

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Solución NaOH	41 Kg	23,7591
Sodium hydroxide, concentration 14M, without water, {RoW} chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell	17,7012 Kg	22,5134
Agua, {CL} v1 ECOBASE	23,2988 Kg	0,0053
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RoW} ECOBASE	8,2 tkm	1,2404

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Solución Silicato	103 Kg	73,3071
Sodium silicate, without water, in 37% solution state {RoW} production, furnace liquor	55,9908 Kg	48,6243
Agua, {CL} v1 ECOBASE	47,0092 Kg	0,0106
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for ECOBASE	2781 tkm	24,6722

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Plastificante	6 Kg	7,0238
Polycarboxylates, 40% active substance {RoW} production	6 Kg	7,0238

Proceso/Material	Cantidad	Kg CO2-eq
Agua Extra	23 Kg	0,0052
Agua, {CL} v1 ECOBASE	23 Kg	0,0052

7.4 TABLA PESO TOTAL DE RESIDUOS GENERADOS EN CHILE POR TONELADAS.

Peso total de residuos generados – Chile (en toneladas) - (306-3, 306-4, 306-5)

	Residuos generados			Residuos no destinados a eliminación (reciclados o reutilizados)			Residuos destinados a eliminación		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
<i>Composición de los residuos</i>									
Residuos peligrosos totales	270	262	422	0	0	0	270	262	422
Residuos no peligrosos totales	103.452	75.145	85.328	49.012	47.817	48.516	54.440	27.328	36.812
Cenizas	102.962	74.793	84.760	48.983	47.776	48.511	53.979	27.017	36.249
Otros residuos	490	352	568	29	41	5	461	311	563
Residuos totales	103.722	75.407	85.750	49.012	47.817	48.516	54.710	27.590	37.234

SOLO USO ACADÉMICO