

Proyecto Erasmus+ 2022-1-NO01-KA220-HED-000087893

Este proyecto Erasmus+ ha sido financiado con el apoyo de la Comisión Europea. La Comisión Europea y las Agencias Nacionales Erasmus+ no se hacen responsables del uso que pueda hacerse de la información aquí difundida.

Proyecto de construcción BIM-

LCA Informe de estudio de caso

Hormigón geopolímero: Un hormigón de futuro

TESIS DE LICENCIATURA

Hormigón geopolímero: Un hormigón de futuro

B23B02

15.05.2023

Departamento de Ingeniería - Ingeniería Civil

Christian Janshaug

Sindre Andreas Johansen Melgaard

Frederik Toverød

Simon Hauk Vold





Informe de tesis

Categoría de tesis: <i>laierial scimce</i>
Número de créditos: *0
Campo de estudio: <i>Civ'if Ingeniería - estructural y ci iironrrietitol</i>

De libre acceso



Disponible previo acuerdo Con la **bateadora** colaboradora



Título del informe: <i>Æ eopol yzrier Æoncreie.'4 fyW hormigón reorientado</i>	Fecha: <i>1 J.UJ.*j23</i>
	Número de páginas slurl: <i>13</i>
	Número de páginas: / GJ
	Número de archivos adjuntos: <i>2J</i>
	El número total de páginas de este tes es: <i>14/</i>
Autores: <i>Christian Janshaug"</i>  <i>'Simon Hand l'old, G</i>  <i>Fraferik To'erad.'</i> <i>'Sindre .Andrea.s.Johansen ñelgaard.'f</i>	Supervisors: <i>1) . Susana García .Sanfeli.</i> <i>2) Hairik Caer</i> <i>3) Mariw Birkeland</i>
Departamento / Programa de estudios: <i>Deparimen t oJ.F.rigineering / Civil F.ngineer</i>	Número de tesis: <i>fi2JfiG2</i>

Realizado en colaboración con: <i>Joine Eieiidom y Selvaag Boliy F.iasmis</i> +	Persona de contacto ai el socio collahcrating: <i>Espeii C'hrisii'in Aiidreseii</i>
---	--

Esta tesis investiga la durabilidad y las propiedades del hormigón geopolímero de desarrollo propio, comparando sus emisiones de CO₂ con las del hormigón tradicional. El estudio hace hincapié en el hormigón geopolímero como alternativa sostenible, destacando sus menores emisiones y sus excelentes propiedades. La investigación utiliza modelos BIM y análisis UA para evaluar su impacto medioambiental y su idoneidad para aplicaciones prefabricadas. En conjunto, el estudio contribuye al conocimiento del hormigón polímero y fomenta la concienciación sobre las emisiones en el sector de la construcción.

3 palabras clave

Hormigón polímero
LCA

Prefacio

En este prefacio, nuestro objetivo es resumir el recorrido completo de nuestros tres años de estudios de ingeniería civil, que abarcan desde 2020 hasta 2023. Hemos adquirido amplios conocimientos en disciplinas relacionadas con la construcción, la resolución de problemas y el trabajo en proyectos a lo largo de estos tres años, que han estado llenos de emoción, desafíos y altibajos intrigantes. En general, este viaje nos ha formado y preparado en gran medida como futuros ingenieros civiles, ofreciéndonos experiencias de un valor incalculable.

La participación en el proyecto piloto BIM-LCA a través del taller Erasmus+ en Cartagena UPCT ha sido una experiencia esclarecedora, que ha servido como pistoletazo de salida para esta tesis de licenciatura, proporcionando valiosos conocimientos y sentando las bases para futuras exploraciones.

En primer lugar, expresamos nuestra más sincera gratitud a Susana García Sanfélix por su inestimable ayuda en los estudios del hormigón, los aspectos químicos y su orientación a lo largo de todo el recorrido de nuestra tesis de licenciatura. Su experiencia y apoyo han contribuido enormemente a nuestro crecimiento y comprensión en estas áreas.

Además, hacemos extensivo nuestro sincero agradecimiento a Marius Birkeland y Henrik Røer por sus importantes contribuciones al componente BIM y al tema de la construcción explorado en esta tesis.

Además, nos gustaría expresar nuestra gratitud principalmente a Espen Andresen, de Jotne Eiendom, y también a Selvaag Bolig por proporcionarnos un edificio de referencia y valiosos conocimientos sobre el proyecto FMV-Vest.

Por último, nuestro agradecimiento a Bernt Kristiansen por sus valiosos consejos, a Mahdi Kioumarsí por sus comentarios constructivos, a Lars Gunnar Furelid Tellnes por las cuestiones relacionadas con el ACV, a Rudi Yi Xu por las pruebas de carbonatación, a Rino Nilsen por el equipo de impresión 3D, a Arne Johan Østenby por la configuración eléctrica de la prueba de cloruro, a Jane Mælen por su valiosa información sobre los elementos prefabricados y a Parham Shoaí por su apoyo en los procedimientos relacionados con el laboratorio y sus excelentes comentarios.

Resumen

Esta tesis, titulada "Hormigón geopolímero: Un hormigón orientado al futuro", aborda el objetivo de investigar la durabilidad y las propiedades de un hormigón geopolímero de desarrollo propio. El estudio también incluye una comparación de las emisiones de CO₂ entre la fase de producción del hormigón geopolímero y el hormigón tradicional, con el objetivo de concienciar sobre las emisiones en la industria de la construcción y la ingeniería mediante la aplicación de las metodologías BIM y LCA.

La tesis se centra principalmente en el geopolímero como solución prometedora para una transición ecológica en la industria de la construcción y la ingeniería. Los componentes clave del estudio incluyen la modelización BIM y el análisis de ACV. El análisis de ACV revela un balance positivo de CO₂, lo que indica menores emisiones para el hormigón geopolímero en comparación con el hormigón tradicional, aunque también destaca un aspecto negativo relativo al consumo de energía.

Las exhaustivas pruebas de laboratorio llevadas a cabo por el grupo demuestran que el hormigón geopolímero presenta excelentes propiedades, mejorando tanto su durabilidad como su vida útil. Como resultado, se concluye que el hormigón geopolímero es adecuado para aplicaciones prefabricadas. El estudio subraya la necesidad de seguir explorando posibles mejoras para normalizar el uso de hormigones no tradicionales.

En general, esta tesis contribuye al conocimiento y la comprensión del hormigón geopolímero como alternativa sostenible, al tiempo que destaca la importancia de la concienciación sobre las emisiones y la promoción de prácticas respetuosas con el medio ambiente en la industria de la construcción y la ingeniería.

Contenido

Prefacio.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de cuadros.....	xi
Símbolos.....	xii
1 Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Limitaciones.....	3
1.3 Método de investigación.....	4
2 Teoría.....	5
2.1 Hormigón tradicional.....	5
2.1.1 Cemento.....	6
2.1.2 Proceso de hidratación.....	7
2.1.3 Aditivos.....	9
2.1.4 Aditivos.....	15
2.1.5 Proporción de masa.....	16
2.1.6 Áridos.....	16
2.2 Hormigón geopolímero.....	17
2.2.1 Proporción de masa de GPC, L/GB.....	17
2.2.2 Geopolímero como aglutinante.....	17
2.2.3 Activadores alcalinos.....	22
2.2.4 Condiciones de curado.....	23
2.2.5 Propiedades autocurativas de la GPC.....	23
2.2.6 La GPC en la actualidad.....	24

2.3 Teoría relacionada con la metodología	27
2.3.1 Elaboración de la receta.....	27
2.3.2 Tamaño de los áridos	27
2.3.3 Mezclado y curado del hormigón	28
2.4 Teoría relacionada con el procedimiento de ensayo	28
2.4.1 Contenido de agua en el agregado	28
2.4.2 Distribución granulométrica en el agregado.....	28
2.4.3 Capacidad calorífica específica	28
2.4.4 Calorimetría isotérmica de conducción	29
2.4.5 Tiempo de fraguado inicial y final - VICAT.....	29
2.4.6 Trabajabilidad	30
2.4.7 Contenido de aire	32
2.4.8 Densidad	32
2.4.9 Resistencia a la compresión.....	32
2.4.10 Intrusión de cloruro.....	33
2.4.11 Carbonatación	35
2.5 Durabilidad y refuerzo	36
2.5.1 Cubierta de hormigón	37
2.5.2 Refuerzo mínimo	39
2.6 BIM, Modelado de información para la construcción	40
2.6.1 Usuarios de BIM.....	40
2.6.2 Norma BIM.....	40
2.6.3 Revit	40
2.6.4 Beneficios	41
2.7 LCA.....	42
2.7.1 Usuarios de la ECV.....	42

2.7.2 Norma LCA	43
2.7.3 SimaPro	43
2.7.4 Beneficios	44
2.7.5 GWP - Potencial de calentamiento global	44
3 Marco.....	46
4 Método.....	48
4.1 Elaboración de la receta	52
4.1.2 Tamaño de los áridos	53
4.1.3 Mezclado y curado del hormigón	53
4.2 Procedimientos de prueba	54
4.2.1 Contenido de agua en el agregado	54
4.2.2 Distribución granulométrica de los áridos.....	55
4.2.3 Prueba calorimétrica TAM	57
4.2.4 Tiempo de fraguado inicial y final de la pasta de cemento, VICAT	60
4.2.5 Prueba de asentamiento.....	61
4.2.6 Prueba de fluidez.....	63
4.2.7 Contenido en aire	64
4.2.8 Densidad	65
4.2.9 Prueba de resistencia a la compresión.....	65
4.2.10 Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros	67
4.2.11 La profundidad de carbonatación	70
5 Resultados.....	73
5.1 Geopolímero.....	73
5.2 Uso potencial del hormigón geopolímero, revisión BIM	80
5.3 Estudio LCA	84
5.4 Fuentes de error y debate	91

6 Conclusión	92
7. Sugerencias para futuros trabajos	93
8 Referencia	95
9 Anexo.....	106

Lista de cifras

Figura 1: Emisiones mundiales de CO ₂ por sectores (Ali, 2020, p. 12).....	1
Figura 2: SEM de CH y C-S-H, mezcla 8 (Armentrout y Belkowitz, 2009)	8
Figura 3: Resistencia a la compresión del mortero que contiene SF (Muwashee & Al-Jameel, 2021)10	
Figura 4: Proporción de OPC, resistencia a la compresión con % de FA (Abushad & Sabri, 2017).....	12
Figura 5: La imagen a) muestra la imagen SEM de las partículas de escoria, mientras que la imagen b) muestra la imagen SEM de las partículas de cenizas volantes (Verma & Dev, 2021).....	21
Figura 6: 1 de los 33 paneles GPC prefabricados (WAGNERS, s.f.)	24
Figura 7: Plano de pavimentación/pista, Aeropuerto BWW (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).	25
Figura 8: Sección transversal de diseño de pavimento de hormigón de alta resistencia (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).	25
Figura 9: Planta de lotes gemelos de geopolímeros (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015). 26	
Figura 10: El proceso de hidratación (Wadsö, 2005).....	29
Figura 11: Trabajabilidad (Maage, 2015, p. 181).....	30
Figura 12: Máquina de ensayo de compresión (EPOXY TILE FLOORING, 2021)	33
Figura 13: Sección transversal de columna reforzada (Anre, 2020)	37
Figura 14: Fases del ciclo de vida del producto (Evaluación del ciclo de vida, 2020)	42
Figura 15: Principio de estructura de la ECV (BNP Media, 2021).....	44
Figura 16: Diagrama de flujo del desarrollo de la GPC	51
Figura 17: Hormigonera del tipo ZK 50 HE (Pemat).....	53
Figura 18: Aparato TAM.....	57
Figura 19: Tasa frente a extensión del proceso (Wadsö, 2005)	59
Figura 20: Aparato automático de grabación Vicatronic (MATEST, s.f.).....	60
Figura 21: Tabla de pruebas de asentamiento (Mishra, s.f.)	61

Figura 22: Flujo de asentamiento en la creación.....	62
Figura 23: Diferencial de flujo (Standard Norge, 2019)	63

Figura 24: Herramienta de medición del contenido de aire, control del contenido de aire del hormigón fresco (Vegdirektoratet, 2014).....	64
Figura 25: Configuración de la prueba real, RCPT	67
Figura 26: Configuración de la prueba, RCPT (Nordtest, 1999)	67
Figura 27: Ilustración de la medición de la profundidad de penetración del cloruro (Nordtest, 1999).....	69
Figura 28: La profundidad de penetración del cloruro empieza a ser visible después de utilizar el AgNO ₃	69
Figura 29: La superficie carbonatada	71
Figura 30: Principio de medición de la carbonatación acelerada, (Atiş, 2003).....	71
Figura 31: Proceso de endurecimiento de GP5.2 y CEMII/A-S 42.5 R.....	77
Figura 32: Foto de un moldeado de acero estándar, que muestra cómo la GPC se adhiere al acero.	79
Figura 33: Fotografía del moldeado de plástico utilizado para los cilindros de ensayo de migración de cloruros.....	79
Figura 34: Modo de fallo de GP5.2.....	79
Figura 35: Foto tras el desmoldeo de la receta GP5.2	79
Figura 36: "Modellageret" hoy.....	80
Figura 37: Imagen de impresión realista de la pared del módulo.....	80
Figura 38: Relación entre la cubierta de hormigón y el W/C (Maage, 2015, p. 220)	81
Figura 39: Sección transversal de la pared del módulo	81
Figura 40: Dibujo conceptual del refuerzo	82
Figura 41: "Modellageret" con una pared sustituida por la pared del módulo GPC	83
Figura 42: CEM-II /A-S 42.5N Red del ciclo de vida del hormigón	87
Figura 43: Red del ciclo de vida GP5.2.....	88
Figura 44: Consumo de energía.....	89
Figura 45: Emisiones de CO ₂ del ACV	90

Lista de cuadros

Cuadro 1: Los 4 minerales principales de la OPC (Maage, 2015, p. 83).....	7
Cuadro 2: Clases de aditivos (SINTEF, 2010).....	15
Tabla 3: Composición química de la escoria y el AF.....	19
Tabla 4: Clases de asentamiento (Standard Norge, 2004).....	30
Tabla 5: Clases de asentamiento (Standard Norge, 2013, p. 28).....	31
Tabla 6: Clases de flujo (Standard Norge, 2013, p. 27).....	31
Tabla 7: Factores de modificación en la conversión de la resistencia de las probetas de hormigón (Building Research Institute, s.f.).....	32
Cuadro 8: Normas utilizadas.....	47
Cuadro 9: Receta y peso real de GP5.2.....	52
Cuadro 10: Cantidad mínima de muestra de la granulometría superior.....	54
Cuadro 11: Cantidad medida de áridos.....	56
Cuadro 12: Valores de la capacidad calorífica.....	58
Cuadro 13: Tensión y duración de la prueba (Nordtest, 1999).....	68
Tabla 14: Criterios de clasificación de la resistencia al cloruro para el hormigón (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, p. 13).....	70
Cuadro 15: Resultados GP5.2.....	74
Cuadro 16: Propiedades endurecidas.....	77
Tabla 17: Profundidad de carbonatación acelerada (mm) del hormigón comparable (Atiş, 2003).	78
Tabla 18: Relación cemento-escoria de la receta comparada (Kopeckó & Balázs, 2017).....	84
Tabla 19: Receta utilizada para el estudio de ACV (Kopeckó y Balázs, 2017).....	85
Tabla 20: Valores clave utilizados en el estudio de ACV.....	86

Símbolos

Abreviaturas

ASR- Reacción álcali-sílice

BFS- Escoria de alto horno

BIM- Modelado de información para la construcción

Hormigón respetuoso con el medio ambiente

EPD- Declaración medioambiental

de producto FA- Cenizas volantes

GGBFS- Escoria granulada de alto

horno GPC- Hormigón geopolímero

ACV- Evaluación del ciclo de vida

OPC- Cemento Portland ordinario

PCR- Normas de categoría de productos

HAC- Hormigón autocompactante

SF- Humo de

sílice **Abreviaturas**

químicas AgNO_3 - Nitrato de

plata

Al- Aluminio

Al_2O_3 - Óxido de

aluminio $\text{C}_2\text{O}_3\text{H}_4$ -

Dibenzalacetona C2S- Silicato

dicálcico

C3A- Aluminato tricálcico

C3S- Sílice tricálcica

C4AF	- Aluminoferrita tetracálcica
Ca	- Calcio
Ca(OH) ₂	- Hidróxido de calcio
CaSiO ₃	- Silicato de calcio
CH	- Hidróxido de calcio / Portlandita
CH ₄	- Metano
CO	- Monóxido de carbono
CO ₂	- Dióxido de carbono
Fe	- Hierro
H ₂ O	- Agua
K	- Potasio
K ₂ O	- Óxido de potasio
K ₂ SiO ₃	- Silicato de potasio
KOH	- Hidróxido de potasio
Li	- Litio
MgO	- Óxido de magnesio
Na	- Sodio
Na ₂ O	- Óxido de sodio
Na ₂ SiO ₃	- Silicato de sodio
NaCl	- Cloruro sódico
O	- Oxígeno
Si	- Silicio

1 Introducción

Cada año que pasa, el clima cambia. Las mediciones han demostrado que la temperatura aumenta, los glaciares se derriten, el nivel del mar sube y hay más fenómenos meteorológicos extremos impredecibles. Esto se debe al aumento de los gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera (FN-Sambandet, 2023). Sólo el sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 38% de las emisiones mundiales (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021). De este 38%, la producción de hormigón representa un significativo 10% de las emisiones (Saeed, et al., 2022, pp. 5-9). Debido a sus excelentes propiedades, como

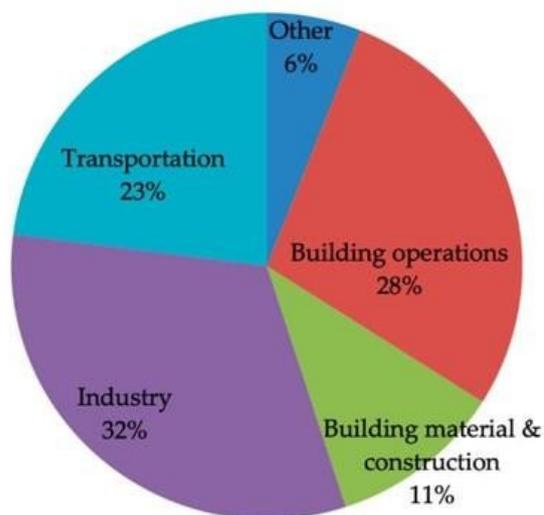


Figura 1: Emisiones mundiales de CO₂ por sectores (Ali, 2020, p. 12)

Las emisiones actuales de gases de efecto invernadero deben reducirse al mínimo para evitar el colapso de la sociedad y preservar el medio ambiente (FN-Sambandet, 2023). Esto significa que todos los actores de las distintas industrias deben contribuir, incluido el sector de la construcción (FN-Sambandet, 2023).

La visión de este grupo es llevar a cabo un examen exhaustivo del hormigón geopolímero, para ver si el hormigón tradicional es sustituible - utilizando herramientas técnicas que se utilizan en la industria de la construcción.

resistencia a la compresión, durabilidad, resistencia al fuego y resistencia a otros esfuerzos mecánicos, el hormigón se ha convertido en el material más utilizado en la industria de la construcción. Se estima un consumo anual de 12.500 millones de metros cúbicos en 2021 (Seehusen, 2021). El hormigón se utiliza mucho en elementos prefabricados y estructuras moldeadas in situ, ya que tiene una gran flexibilidad para adoptar formas difíciles.

manteniendo las propiedades deseadas.

1.1 Planteamiento del problema

En el marco del programa Erasmus+ y en asociación con la Escuela Universitaria de Østfold, el grupo ha participado en un proyecto internacional de construcción BIM-LCA. Como parte del mismo, se ha escrito la tesis de licenciatura en colaboración con Jotne Eiendom y Selvaag Bolig. Se centra en el desarrollo del área urbana FMV-Vest en Fredrikstad, principalmente hacia una construcción llamada "Modellageret". Esta construcción tiene una vida útil prevista de 10 años antes de que entre en funcionamiento el nuevo plan regulador.

Por ello, el grupo ha optado por iluminar la transición ecológica en el sector de la construcción abordando el siguiente planteamiento del problema:

El objetivo de esta tesis es investigar la durabilidad y las propiedades de un hormigón geopolímero de desarrollo propio, así como comparar las emisiones de CO₂ de la fase de producción frente al hormigón tradicional, con el fin de promover la concienciación sobre las emisiones en la industria de la construcción y la ingeniería utilizando BIM y LCA.

1.2 Limitaciones

Dadas las limitaciones de tiempo para la tesis de licenciatura, conviene establecer las siguientes limitaciones para garantizar que los resultados sean lo más útiles posible:

Hormigón geopolímero

- Sólo se tienen en cuenta las propiedades del material y no el diseño estético.
- Los aspectos económicos no se evaluarán ni se incluirán en la base de la toma de decisiones.
- Las propiedades de los materiales se probarán en el laboratorio de la Escuela Universitaria de Østfold y se limitarán al equipo disponible.
- Limitaciones relativas a la mezcla de una cantidad suficiente de muestras.
- La comparación con el hormigón tradicional se limita a la literatura y las normas.

Uso potencial del hormigón geopolímero, revisión BIM

- Esta tarea no se centra en las fuerzas y la estática que influyen en el diseño del muro del módulo, *sino* en el uso potencial del hormigón geopolímero.
- La solución de anclaje de la pared del módulo no se tendrá en cuenta, pero se discutirá brevemente ya que la reutilización es un objetivo.

Estudio de ACV

- Los valores para el estudio de ACV se extraen de la base de datos de SimaPro y los consumos de energía son en parte supuestos y no un valor definitivo.
- El estudio del ACV se limita a la fase de producción del hormigón premezclado.

1.3 Método de investigación

Durante la realización de la tesis de licenciatura, el grupo utiliza diversos métodos de investigación, como se muestra en los puntos siguientes:

- Viaje a Cartagena y talleres relacionados con herramientas técnicas.
- Búsqueda bibliográfica y recopilación metódica de información relacionada con el tema.
- Programación de proyectos y seguimiento del progreso en Microsoft Project.
- Diagrama de flujo de mezcla y elaboración de recetas en Microsoft Visio.
- Recogida de información oral de los socios colaboradores y supervisores.
- Pruebas relacionadas con la fundición y el laboratorio.
- Modelado en Revit.
- Evaluación del ciclo de vida en SimaPro.
- Informes de resultados en Excel.

2 Teoría

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo y desempeña un papel crucial en la industria de la construcción y la ingeniería (Gregory & Logan, 2021).

Históricamente, el hormigón se ha utilizado en diversas formas durante miles de años, y el desarrollo del hormigón moderno a base de cemento Portland se remonta al siglo 19th (Kontrollrådet, 2018). Hoy en día, el hormigón sigue siendo un material de construcción popular debido a sus propiedades versátiles, pero la producción de hormigón tiene un impacto medioambiental significativo con grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono (Gregory & Logan, 2021).

En 1978, se introdujo por primera vez el geopolímero como alternativa al cemento Portland ordinario, OPC (Parshwanath, Nataraja, & Lakshmanan, 2011). El geopolímero se basa en minerales menos procesados con silicatos de aluminio. Las materias primas adecuadas para el geopolímero pueden ser cenizas volantes, escoria de hierro o incluso arcilla (Betongfokus, 2019). Para determinar si el geopolímero es un material respetuoso con el medio ambiente y duradero, el lector debe basarse en la literatura y las pruebas basadas en la investigación que se presentan a continuación, incluidos BIM y LCA.

2.1 Hormigón tradicional

El hormigón es un material de ingeniería versátil compuesto por una sustancia cementante hidráulica, normalmente OPC, áridos, agua y, a menudo, cantidades controladas de aire arrastrado. Inicialmente, el hormigón es una mezcla plástica y manejable que puede moldearse en diversas formas. La resistencia se desarrolla durante la reacción de hidratación entre el cemento y el agua. Los productos, principalmente silicatos de calcio, aluminatos de calcio e hidróxido de calcio, son relativamente insolubles y aglutinan los áridos en una matriz endurecida (Jahren, 2012, p. 11). La masa de hormigón actúa como un fluido homogéneo, en el que la fase de matriz rodea a la fase de partículas (Maage, 2015, p. 143).

2.1.1 Cemento

La definición de cemento se utiliza generalmente para describir una sustancia seca que aún no se ha activado. El tamaño de las partículas oscila entre 0,5 y 80 μm , y el color suele ser gris, debido a que las materias primas contienen hierro (Fe). Estas materias primas consisten principalmente en piedra caliza, yeso y otros materiales que contienen altos niveles de cal y sílice. Entre ellos se encuentran el cuarzo, la pizarra, la arena o la arcilla (Jahren, 2012, p. 16).

En la producción de cemento, la piedra caliza se quema con, por ejemplo, cuarzo y esquisto. La mezcla se tritura y se calienta en hornos rotatorios a unos 1450°C. Se obtiene así el clínker, que se muele junto con el yeso y se convierte en cemento (Heidelberg Materials, Alemania). El resultado es el clínker, que se muele junto con el yeso y se convierte en cemento (Heidelberg Materials, s.f.). La piedra caliza se compone principalmente de carbono y oxígeno y, cuando se calienta, se inicia el proceso de calcinación, en el que la piedra caliza se descompone en óxido de calcio (CaO) y se libera dióxido de carbono (CO_2), lo que provoca grandes emisiones de CO_2 (Heidelberg Materials, s.f.).



Se calcula que cada año se utilizan unas 3 toneladas de hormigón por ser humano (Gagg, 2014, p. 1).

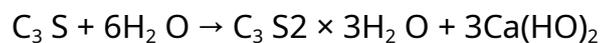
2.1.2 Proceso de hidratación

El OPC se compone principalmente de cuatro minerales, a saber, silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y ferrita de aluminato tetra cálcico (C₄AF). El CaO no ligado es el mineral más importante para las propiedades, además del óxido de magnesio (MgO), el yeso, el óxido de potasio (K₂O) y el óxido de sodio (Na₂O). La proporción entre estos cuatro minerales describe las propiedades exotérmicas, de resistencia, durabilidad y curado del cemento (Maage, 2015, p. 83).

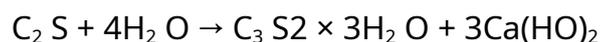
Nombre	Fórmula química	Símbolo
Silicato tricálcico	$3CaO \times SiO_2$	C3S
Silicato dicálcico	$2CaO \times SiO_2$	C2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \times Al_2 O_3$	C3A
Ferrita de aluminato tetra cálcico	$4CaO \times Al_2 O_3 \times Fe_2 O_3$	C4AF

Cuadro 1: Los 4 minerales principales de la OPC (Maage, 2015, p. 83)

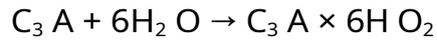
Fórmula del proceso de hidratación del C₃S:



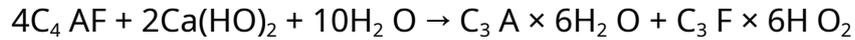
Fórmula del proceso de hidratación del C₂S:



Fórmula del proceso de hidratación de C_3A :



Fórmula del proceso de hidratación del C_4AF :



(Saleh & Eskander, 2020)

La hidratación es un proceso exotérmico que libera mucha energía. El proceso se conoce como hidráulica latente, y la reacción de hidratación puede continuar incluso cuando está totalmente sumergida, en ausencia de aire. La reacción se ve retardada por una pequeña cantidad de yeso que debe descomponerse para que se inicie el proceso de hidratación. Esto garantiza la trabajabilidad de la mezcla de hormigón durante aproximadamente 2 a 3 horas (Maage, 2015, p. 57). Según el modelo de Powers, los productos de reacción son el silicato de calcio hidratado (C-S-H), y la portlandita (CH), así como la etringita. Sin embargo, no es posible alcanzar el 100% de hidratación, aproximadamente tres cuartas partes estarán hidratadas al cabo de 1 año. El C-S-H crea los poros de gel, que es la fuente principal de lo que da a la pasta de cemento sus propiedades de resistencia y endurecimiento (Maage, 2015, pp. 58-59).

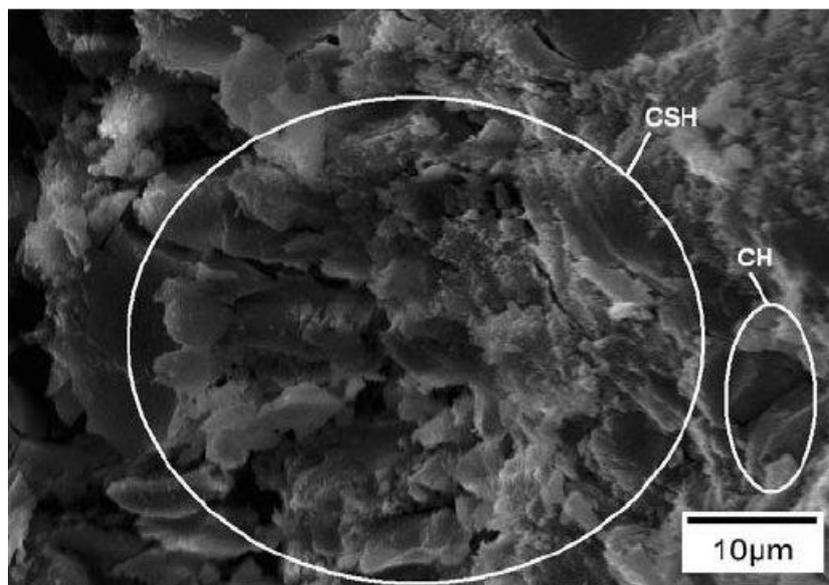


Figura 2: SEM de CH y C-S-H, mezcla 8 (Armentrout y Belkowitz, 2009)

2.1.3 Aditivos

Los aditivos se dividen en puzolanas y materiales hidráulicos latentes y tienen como objetivo sustituir al cemento Portland. En función de las propiedades deseadas, los distintos materiales pueden dosificarse en porcentajes variables en relación con el cemento Portland (Maage, 2015, pp. 92-93). Los materiales puzolánicos son un término colectivo para los materiales que reaccionan con el producto de reacción hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) (Maage, 2015, p. 93).

Humo de sílice, 0,01-1 μm

El humo de sílice, SF, es un subproducto de la producción de silicio y ferrosilicio metálico. El humo de sílice es de grano muy fino y sus partículas son del orden de 1/100 del tamaño de las partículas de cemento. En Europa, el SF debe cumplir la norma *NS-EN 13263-1 "Humo de sílice para hormigón, Parte 1. Definiciones, requisitos y criterios de conformidad": Definiciones, requisitos y criterios de conformidad* (Maage, 2015, pp. 93-99).

Impacto en el hormigón fresco (Maage, 2015, pp. 95-96):

- El SF contribuye a que el hormigón sea ligeramente más rígido y reduce el riesgo de segregación.
- La viscosidad y la tensión de cizallamiento del hormigón con SF son mayores, por lo que siempre se utilizan agentes plastificantes.
- Contribuye a un desarrollo más lento de la fuerza y a una menor generación de calor.

Impacto sobre el hormigón curado y las propiedades mecánicas (Maage, 2015, pp. 96-98):

- La reacción puzolánica del SF está más influenciada por la temperatura - menor resistencia inicial a bajas temperaturas en comparación con el hormigón normal y viceversa.
- El hormigón SF es más resistente a las altas temperaturas de curado, ya que desarrolla productos menos porosos que el hormigón tradicional.
- El SF puede mejorar la resistencia a la compresión, la adherencia y la resistencia a la abrasión del hormigón que en el hormigón sin él.

Influencia en la durabilidad (Maage, 2015, pp. 98-99):

- El SF reduce el potencial de reacción álcali-sílice, ASR, ya que las puzolanas ligarán los álcalis en el hormigón, haciéndolos inasequibles para una reacción posterior con los áridos reactivos.
- La adición de SF da lugar a una estructura de poros más fina en el hormigón, lo que se traduce en un hormigón más denso.
- La entrada de cloruros se reduce significativamente utilizando SF.

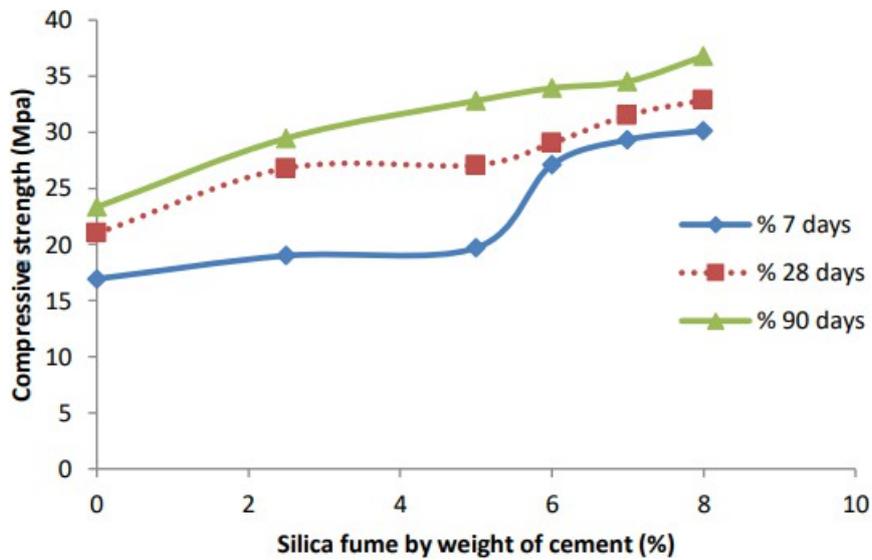


Figura 3: Resistencia a la compresión del mortero con SF (Muwashee & Al-Jameel, 2021)

Cenizas volantes, 1-100 μm

Las cenizas volantes son un subproducto de la depuración de los gases de combustión en las centrales térmicas de carbón. *La norma NS-EN 197-1* hace referencia a dos tipos de AF: una que contiene silicato y otra que contiene calcio. El AF suele contener algo de carbono residual, lo que se refleja en el color ligeramente más oscuro del hormigón (Maage, 2015, p. 101). El uso de AF en Europa está sujeto a la norma *NS-EN 450-1: "Fly ash for concrete, Part 1: Definición, especificaciones y criterios de conformidad"* (Maage, 2015, pp. 101-103).

Influencia en el hormigón fresco (Maage, 2015, p. 102):

- Las partículas de AF son esencialmente esféricas y su tamaño es similar al del OPC. Esto mejora la trabajabilidad del hormigón.
- El AF tiene menor densidad que el cemento. Esto puede contribuir a un mayor volumen de la matriz, lo que puede mejorar la trabajabilidad del hormigón.
- FA contribuye a una buena estabilidad.

Impacto sobre el hormigón endurecido y las propiedades mecánicas (Maage, 2015, pp. 102-103):

- El AF reacciona más lentamente que el cemento, lo que se compensa moliendo el cemento a un estado más fino.
- A largo plazo, la reacción puzolánica contribuirá a que el hormigón con AF desarrolle una mayor resistencia que el hormigón sin ella.
- La adhesión se ve afectada positivamente utilizando AF.

Impacto en la durabilidad (Maage, 2015, p. 103):

- El AF tiene el mismo impacto en la durabilidad que el SF y la resistencia a la lixiviación, al ataque por sulfatos y al ataque por ácidos se ve influenciada positivamente utilizando AF.
- La carbonatación puede propagarse más rápidamente en el hormigón al aumentar la cantidad de AF.
- La penetración de cloruros se reduce considerablemente y la resistencia eléctrica aumenta con el contenido de AF.

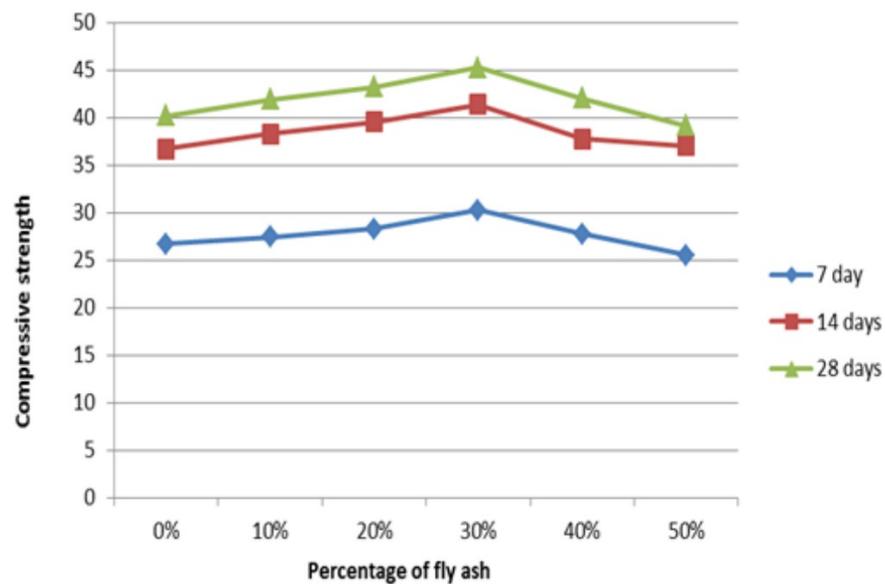


Figura 4: Relación OPC, resistencia a la compresión con % FA (Abushad & Sabri, 2017).

Escoria

La escoria, o escoria de alto horno, BFS, es un subproducto de la producción de hierro bruto. Los residuos recogidos se componen inicialmente de partículas relativamente grandes y deben triturarse y molerse hasta alcanzar una granulometría similar a la del cemento. La escoria granulada de alto horno, GGBFS, es un subproducto de la industria del hierro y el acero que se produce mediante el enfriamiento rápido y la molienda de escoria de alto horno, y se utiliza comúnmente como material cementante suplementario en la producción de hormigón (GCP, s.f.). El GGBFS se conoce comúnmente como escoria en la terminología del hormigón, y es un material "hidráulico latente", lo que significa que puede reaccionar químicamente sin combinarse con el cemento si el nivel de pH es lo suficientemente alto. Se compone de un 30-50% de CaO, un 30-40% de óxido de silicio o sílice (SiO_2), un 10-25% de óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3), así como de otros óxidos (Maage, 2015, pp. 103-105). La utilización de escorias reducirá las emisiones asociadas al hormigón y disminuirá la cantidad de residuos en la industria siderúrgica (Samferdsel og infrastruktur, 2019). En Europa, la norma utilizada es la *NS-EN 15167-1: "Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout, Part 1. Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad"* (Maage, 2015, p. 105).

Impacto en el hormigón fresco (Maage, 2015, p. 105):

- El hormigón con cemento de escoria suele presentar mejores propiedades de trabajabilidad y una segregación reducida en comparación con el hormigón que sólo contiene OPC.
- La escoria de cemento en el hormigón no tiene por qué reducir el desarrollo de calor.

Impacto sobre el hormigón endurecido y las propiedades mecánicas (Maage, 2015, p. 105):

- La escoria reacciona lentamente y la resistencia será menor en los primeros días que si se hubiera utilizado OPC. Esto puede ajustarse en cierta medida moliendo el cemento de escoria hasta dejarlo más fino.
- La reacción del cemento de escoria dura más tiempo. Esto significa que el hormigón con cemento de escoria alcanzará una mayor resistencia que el hormigón con OPC.

Impacto en la durabilidad (Maage, 2015, p. 105):

- La escoria contribuye a reducir la entrada de cloruros, ya que con el tiempo se forman productos C-S-H.
- El sistema de poros del hormigón se vuelve más fino, lo que da lugar a un hormigón más denso, por lo que el aumento de la resistencia a las reacciones alcalinas y a los ataques de sulfatos se ve influido positivamente por el uso de escoria.
- El hecho de que la absorción de agua en el sistema de poros aumente significativamente significa que el hormigón con cemento de escoria tendrá una menor resistencia a las heladas.

2.1.4 Aditivos

A continuación se muestra una tabla con los aditivos más aplicados:

Class of admixtures	Description of the substance's mode of action in concrete
Water – reducing or plasticizing	Reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency or increase the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Highly water – reducing or super plasticizing	Significantly reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency, or significantly increases the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Air – entraining	The admixture adds a controlled amount of small, uniformly distributed air bubble during mixing that remain in the mixture after hardening.
Setting accelerators	Reduces the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Hardening accelerators	Causes faster development of early strength in concrete, with or without affecting the setting time.
Setting retarders	Increases the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Water – repellent	Reduces the capillary water absorption in curing concrete.
Admixture for reduced water separation	Reduces water loss by reducing water separation <Bleeding>.
Setting – retarding and water – reducing	Provides combined effect of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).
Setting – retarding and high – range water-reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting accelerating admixture (secondary function).
Accelerating setting and water reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).

Cuadro 2: Clases de aditivos (SINTEF, 2010)

2.1.5 Proporción de masa

La relación de masa depende del agua y el cemento, además de los aditivos, junto con su respectivo factor k (Maage, 2015, p. 100). La relación de masas es el factor que más influye en las propiedades de endurecimiento, como la resistencia y la durabilidad. Además, los aditivos y aditivos utilizados afectarán a las demás propiedades (Maage, 2015, p. 13).

Fórmula para la relación de masas (Maage, 2015, p. 155):

$$m = \frac{v}{c} = \frac{v}{(c + \sum k * p)}$$

Dónde:

- m- Relación de masas
- v- Cantidad de agua
- c- Cantidad de cemento
- p- Cantidad de aditivos
- k- Factor de eficacia

2.1.6 Áridos

Principalmente, los áridos del hormigón se dividen en gruesos y finos. Una fracción de árido se define por la designación d/D, que representa la granulometría nominal mínima y máxima. La granulometría nominal superior no representa la granulometría real máxima, lo que significa que siempre habrá un cierto número de partículas sobredimensionadas (Maage, 2015, p. 133). La distribución granulométrica se documenta mediante análisis granulométrico de acuerdo con la *norma NS-EN 933-1* (CEN, 2012).

2.2 Hormigón geopolímero

El hormigón geopolímero, GPC, ha ganado mucha atención en los últimos años y es un material de construcción relativamente nuevo. Al igual que el hormigón ordinario, el GPC también se fabrica con un aglutinante, un líquido y áridos. La principal diferencia es que el aglutinante no contiene OPC, y el líquido consiste principalmente en activadores alcalinos. La otra gran diferencia entre el hormigón OPC y el GPC es que la utilización de materiales de desecho es mucho mejor en el GPC, lo que reduce sustancialmente las emisiones de CO₂. También se considera bastante rentable, ya que proporciona una infraestructura de larga vida útil y un bajo consumo de energía (Ahmed, et al., 2022).

2.2.1 Proporción de masa de GPC, L/GB

En 2.1.5 Relación de masa, el concepto de relación de masa, como se ha mencionado, también abarca la relación líquido-aglutinante, que representa la relación de masa entre la cantidad total de agua libre y el agua contenida dentro de las soluciones alcalinas, así como la masa total de los sólidos geopoliméricos, incluyendo FA, GGBFS, gránulos de hidróxido de potasio (KOH) y sólidos de silicato de sodio (Na₂SiO₃). Se sugiere que esta relación tiene un efecto similar a la relación agua-cemento (W/C) para el agua y el cemento (Pilehvar, et al., 2018). Sin embargo, el término "líquido" de la propuesta se utiliza para englobar la cantidad total de soluciones alcalinas, agua adicional, superplastificantes y aglutinantes geopoliméricos, que incluyen FA y GGBFS (Pilehvar, et al., 2018). Mediante estas dos propuestas, el grupo se decantó por utilizar la última proporción, ya que el grupo ha definido la totalidad de la solución alcalina, el superplastificante y el agua como *líquido*.

2.2.2 Geopolímero como aglutinante

Existe un consenso cada vez mayor en que el aglutinante a base de piedra caliza se considera el cemento de primera generación, el OPC como el de segunda generación y el cemento geopolímero suele denominarse material cementante de tercera generación (Singh, Ishwarya, Gupta y Bhattacharyya, 2015). En los últimos años se le ha prestado mucha atención debido a su temprana resistencia a la compresión, su buena resistencia química, su baja permeabilidad y sus propiedades ignífugas. La palabra "geopolímero" es un término general que se utiliza comúnmente para referirse al aluminosilicato alcalino amorfo, ya que amorfo describe como un sólido que no exhibe una estructura cristalina

(Mavračić, Mocanu, Deringer, Csányi, & Elliott, 2018). Además, también se les conoce con otros nombres como "geocementos", "cementos activados con álcali", "polímeros inorgánicos", "cerámica ligada con álcali", "hidrocerámica", entre otros (Singh, Ishwarya,

Gupta y Bhattacharyya, 2015). Estos términos diferentes describen materiales que utilizan una química comparable, a pesar de la variedad de la terminología.

El compuesto químico consiste generalmente en una unidad repetitiva de monómero de sialato. El monómero es un tipo de conexión química, donde las moléculas reaccionan dentro de sí mismas para crear moléculas más grandes, dadas las condiciones adecuadas (Helseth, 2021). Los monómeros de sialato son una forma abreviada de silicio-oxo-aluminato alcalino, donde los álcalis son sodio (Na), potasio (K), litio (Li) y calcio (Ca). Se caracterizan por su composición, que incluye átomos de silicio (Si), aluminio (Al) y oxígeno (O), junto con cationes de metales alcalinos como Na o K. Estos materiales, que se han utilizado como materias primas en geopolímeros, comprenden el feldespato, la caolinita y los residuos sólidos industriales. Entre ellos se encuentran la FA, los residuos mineros y las escorias metalúrgicas. Lo que describe la reactividad son características como la composición química, la morfología, la fase vítrea, la finura y la composición mineralógica de estas fuentes de aluminosilicatos. Los factores comunes que desarrollan los atributos del geopolímero incluyen materiales que poseen suficiente contenido vítreo reactivo, alto estado amorfo, demanda insignificante de agua y capacidad para liberar aluminio fácilmente (Singh, Ishwarya, Gupta y Bhattacharyya, 2015).

El proceso de geopolimerización consiste generalmente en los siguientes pasos (Cong & Cheng, 2021):

1. Disolución del precursor
2. Formación del gel inicial
3. Formación de una estructura de red de gel de silicato

Al igual que con el OPC, la selección de las materias primas y la proporción entre ellas influyen enormemente en las propiedades del geopolímero, como la durabilidad, el desarrollo del calor, la resistencia potencial, el desarrollo de la resistencia (Maage, 2015, pp. 83-87). Como se utiliza escoria y FA como aglutinante, se discutirá la composición mineral de los materiales. La Tabla 3 a continuación, muestra la composición de los aditivos que se han utilizado en este proyecto. Además, el valor Blaine, o superficie específica, y la finura de las partículas representan la eficacia de un material puzolánico (Taffase & Espinosa-Leal, 2023, p. 2).

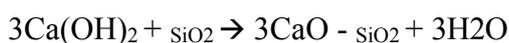
MERIT		FA from Norcem	
	Slag		FA F
H2O	0,18	H2O	0,54
CO2	1,41	CO2	1,25
Na2O	0,55	Na2O	0,86
MgO	12,79	MgO	1,24
Al2O3	11,82	Al2O3	21,13
SiO2	32,12	SiO2	60,59
SO3	2,69	SO3	0,66
K2O	0,96	K2O	2,65
CaO	34,25	CaO	2,04
TiO2	2,15	TiO2	1,10
V2O5	0,11	V2O5	0,05
Cr2O3	0,01	Cr2O3	0,02
MnO	0,51	MnO	0,09
Fe2O3	0,21	Fe2O3	7,13
CuO	0,01	CuO	0,02
Rb2O	0,00	Rb2O	0,01
SrO	0,06	SrO	0,06
Y2O3	0,01	Y2O3	0,01
ZrO2	0,04	ZrO2	0,06
Nb2O5	0,00	Nb2O5	0,00
BaO	0,07	BaO	0,12
	99,94		99,61

Tabla 3: Composición química de la escoria y el AF

Escoria o GGBFS en geopolímero

La escoria se activa con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sulfatos y álcalis (Maage, 2015, p. 105). En la escoria, la gran cantidad de CaO y SiO_2 , asegura la propiedad hidráulica de reaccionar con monóxido de hidrógeno (H_2O), además de poder curar totalmente sumergida. El SiO_2 , y el Al_2O_3 , es un material amorfo, por lo que tiene propiedades puzolánicas. Cuando el pH es ≥ 11 el Al_2O_3 y el SiO_2 se vuelven solubles, permitiendo una reacción puzolánica (Singh, Siddique, & Singh, 2022, pp. 1-29). El SiO_2 debe estar en estado amorfo para participar en la reacción puzolánica (Maage, 2015, p. 101). El SiO_2 y el CaO formarán metasilicato de calcio (CaSiO_3), así como productos C-S-H, al reaccionar el SiO_2 con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Maage, 2015, p. 94).

Reacción puzolánica (Setina, Gabrene, & Juhnevica, 2013, p. 1006):



FA (tipo F) en Geopolímero

El AF se compone principalmente de SiO_2 y Al_2O_3 y, al igual que la escoria, genera una reacción puzolánica. La finura del polvo de AF afecta en gran medida al curado y al desarrollo de la resistencia. El AF ultrafino disminuye la porosidad, generando un hormigón más duradero, pero también disminuye el tiempo de fraguado (Deb & Sarker, 2016, pp. 1-5). La trabajabilidad mejora debido a la forma esférica y a las pequeñas proporciones de las partículas (Maage, 2015, p. 101). Además, reduce la porosidad y, en consecuencia, disminuirá la sorptividad del agua. Aumentará entonces la resistencia a la difusión del cloruro, debido a la reducción de los poros permeables (Saha, 2018, pp. 25-31). Sin embargo, debido al bajo contenido de CaO , y al alto nivel de sílice amorfa, el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión será menor, y a largo plazo será mayor. Además, el AF contribuye gradualmente a que se reduzca la contracción por secado, ya que tiene una cantidad significativamente menor de cal (Saha, 2018, pp. 25-31).

La razón por la que la FA tipo F es tan eficaz para contribuir a una menor permeabilidad y una mayor resistencia a la mitigación de iones cloruro, se debe a la reducción de principalmente dos métodos de transporte (Saha, 2018, pp. 25-31):

- Vacíos de interconexión en el hormigón.
- Iones hidroxilo (HO) libres.

Con la mayor finura del FA, la interconexión disminuirá, dificultando así el desplazamiento de los iones a través del hormigón. Como el FA tipo F también reduce la ASR, además liga los iones HO en la solución de los poros. Por lo tanto, estos dos factores son puntos fuertes para hacer un hormigón más duradero, especialmente debido a la reducción de la permeabilidad al cloruro (Saha, 2018, pp. 25-31).

Relación entre FA y GGBFS

Con una mayor proporción de FA en el GGBFS, el tiempo de fraguado inicial disminuye debido a la reacción del Ca que se encuentra en el GGBFS. La trabajabilidad de la mezcla se incrementa en GPC con el aumento de la cantidad de AF debido a su pequeño tamaño y forma de partícula. Debido a la finura y al alto valor Blaine del AF, la reactividad puzolánica aumenta y los poros capilares se colapsan (Ahmed, et al., 2022). Esto genera menor porosidad y mayor resistencia y densidad, ya que más material llena los poros que podrían llenarse con aire o agua. Aumentando la proporción de GGBFS, disminuye la trabajabilidad, ya que las partículas tienen una forma más angular que las de FA. El desarrollo de la resistencia es inicialmente más lento, pero la resistencia aumenta hasta los 180 días (Ahmed, et al., 2022). La proporción de GGBFS a FA de 20 a 80 es óptima según Ahmed. También se sugiere una proporción de 25 a 75 de GGBFS y FA para obtener las mejores propiedades mecánicas (Patil, Karikatti, & Chitawadagi, 2018).

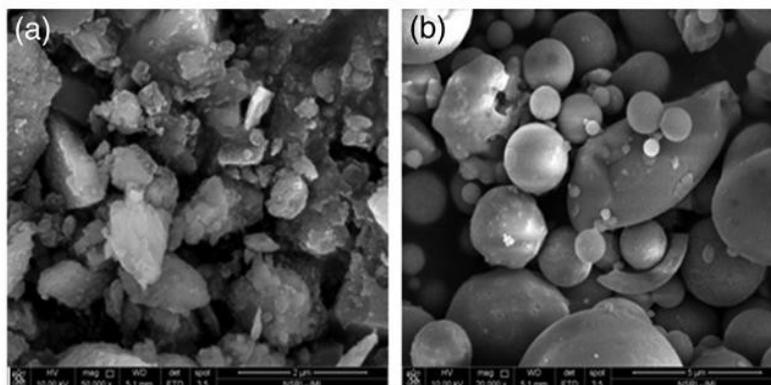


Figura 5: La imagen a) muestra la imagen SEM de las partículas de escoria, mientras que la imagen b) muestra la imagen SEM de las partículas de

cenizas volantes (Verma & Dev, 2021).

2.2.3 Activadores alcalinos

Los activadores que se utilizan para fabricar GPC son KOH, hidróxido sódico (NaOH), silicato potásico (K_2SiO_3) y Na_2SiO_3 . Éstos se utilizan para activar las sustancias de aluminosilicato y producir los productos de hidratación, C-S-H, CH y ettringita. El proceso de geopolimerización consta generalmente de tres etapas consecutivas (Cong & Cheng, 2021):

1. Disolución de materiales de aluminosilicato por los activadores alcalinos.
2. Reacción de condensación del hidroxilo de alúmina y sílice para formar gel geopolímero.
3. Se condensa aún más para formar una red tridimensional.

Cuando se compara el NaOH con el KOH, el KOH muestra un mayor contenido de alcalinidad, sin embargo, el NaOH parece mostrar una mayor capacidad para liberar monómeros de silicato y aluminato (Singh, Ishwarya, Gupta, & Bhattacharyya, 2015). Una mayor molaridad de los activadores alcalinos, como el NaOH, proporciona una mayor resistencia a la compresión, aunque una menor trabajabilidad (Ahmed, et al., 2022). Asimismo, el KOH posee una mayor resistencia a la compresión con una mayor concentración, hasta 14M (Hardjito & Tsen, 2008).

Relación entre los activadores

Para adquirir la mayor resistencia a la compresión, Detphan y Chindaprasirt, fabricaron GPC de ceniza de cáscara de arroz y AF, que se activó mediante una solución de NaOH y Na_2SiO_3 . La relación óptima entre la masa de Na_2SiO_3 y la de NaOH fue de 4:1 (Saeed, et al., 2022). Otras fuentes afirman que la proporción entre las dos soluciones alcalinas debe ser $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 2,5$ (Ketana, Reddy, Rao, & Shrihari, 2021). El grupo se ha decantado por una proporción no demasiado alejada de estos resultados, aunque estos dos difieren mucho, 2,5:1 y 4:1. 1,5:1 es lo que el grupo tendrá en cuenta. La tasa de trabajabilidad y el tiempo de fraguado, es lo que cambiará la proporción de los activadores alcalinos (Saeed, et al., 2022).

2.2.4 Condiciones de curado

Las condiciones óptimas de curado de la GPC basada en FA, es el curado en horno en el rango de 40°C a 100°C y 20 horas se consideró la duración óptima de curado en horno (Fadhil, Haruna, Mohammed, & Sha'aban, 2017, p. 32). Esto se debe a la mayor actividad del geopolímero a temperaturas más altas que la temperatura ambiente. La unión entre la pasta y los áridos se incrementa, creando un aumento general de la resistencia y la durabilidad. La activación mecánica y la tasa de desintegración de las partículas de AF y la transformación morfológica mejoran a medida que aumenta la temperatura de curado (Fadhil, Haruna, Mohammed, & Sha'aban, 2017, p. 32).

2.2.5 Propiedades autocurativas de la GPC

La principal causa de los fallos de algunas estructuras de hormigón es la corrosión de las armaduras (Rodríguez, Ortega y Casal, 1997). Además, una razón común y esencial para la corrosión de las armaduras son las grietas en el hormigón. Dado que la principal preocupación en cuanto a la vida útil de una estructura de hormigón depende de su capacidad para sellar y proteger las armaduras, esta propiedad de autorreparación es rudimentaria. Las grietas no son infrecuentes, y se desarrollarán debido al calor de curado, la contracción por secado, la contracción plástica, el deterioro y las fuerzas aplicadas (Maage, 2015, p. 407). Estos permiten la entrada de productos químicos e iones en el hormigón, a través de la sorción y difusión del agua. Esto desestabilizará la capa de óxido y las barras de acero empezarán a corroerse. Además, esto conducirá tanto a la disminución del área de la sección transversal de las barras de refuerzo, como a la disminución de la capacidad de carga, y a la expansión del volumen de las barras de refuerzo (Maage, 2015, pp. 218-227). Esto se debe a que el producto de la corrosión crea una tensión de tracción interna que agrieta el hormigón.

FA tipo F, tal como se utiliza, ha demostrado propiedades de autocuración. El alcance de la curación depende del daño del hormigón (Ross, Genedy, Juenger, & van Oort, 2022). El FA tipo F tiene autocuración "autógena", y el proceso de reparación ocurre debido a la incorporación de polímeros. El mecanismo de curación se inicia debido a la formación de productos de reacción de aluminosilicato amorfo, así como una deposición de calcita. La capacidad de cerrar grietas, para detener aún más la penetración, es lo que determina una buena capacidad de autocuración (Ross, Genedy, Juenger, & van Oort, 2022). Las

mencionadas propiedades beneficiosas del AF en la GPC pueden prolongar la vida útil de la estructura.

2.2.6 La GPC en la actualidad

Un factor que contribuye a la lentitud del paso a la GPC es el entorno peligroso creado por los activadores alcalinos. Debido a que los alcalinos son sosa altamente cáustica, las soluciones son peligrosas para los operadores de la mezcla de GPC, así como para los trabajadores de la colada (National Center for Biotechnology Information, 2023). Además, al crear una solución de NaOH o KOH a partir de gránulos con agua, la reacción entre los dos componentes, es decir, NaOH y H₂O, es gravemente exotérmica. Casi alcanzará la temperatura de ebullición del agua (BYJU's Learning, 2023). Esto significa que la manipulación de grandes cantidades de este líquido, y su mezcla, deben hacerse con sumo cuidado y de forma estricta. Además, la GPC se está utilizando en una variedad de proyectos con diferentes aplicaciones, como las siguientes:

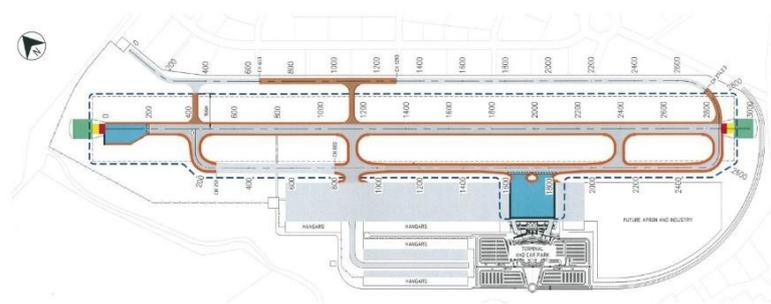
Universidad de Queensland GCI (Global Change Institute)

Los australianos han investigado la GPC durante un largo periodo y ya han incorporado, como los primeros del mundo, la GPC con fines estructurales, como las placas prefabricadas del edificio Global Change Institute, GCI, de la Universidad de Queensland. Se trata de una construcción de 4 plantas, en 3 de las cuales se utilizan 33 paneles prefabricados de GPC. Los paneles prefabricados se fabrican con GPC a base de escoria/FA, llamado Earth Friendly Concrete, EFC, y fue diseñado por Wagners Australia (WAGNERS, s.f.).



Figura 6: 1 de los 33 paneles GPC prefabricados (WAGNERS, s.f.)

Aeropuerto de Brisbane West Wellcamp

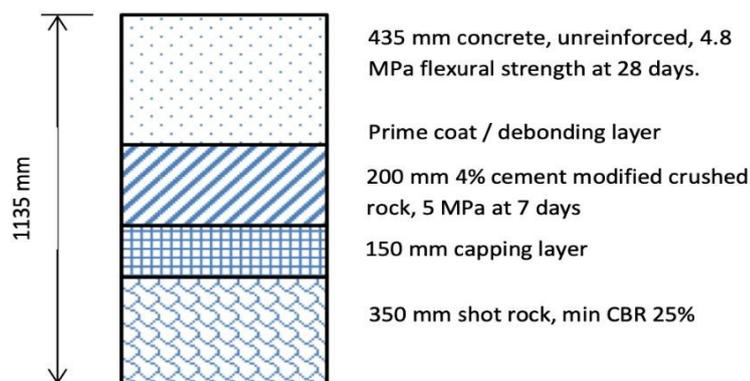


(pavement plan - excerpt from ACG Engineers drawings)

Figura 7: Plano de pavimentación/pista, Aeropuerto BWW (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).

El aeropuerto de BWW entró en pleno funcionamiento con vuelos comerciales en 2014. Wagner's Australia suministró al proyecto aproximadamente 40 000 m³ de hormigón geopolímero, lo que lo convirtió en la mayor aplicación de esta clase de hormigón en el mundo en ese momento. El CEF era muy adecuado para el proyecto debido a su alta resistencia a la tracción por flexión, baja contracción y características de trabajabilidad (Glasby, Day, Genrich y Aldred, 2015).

EFC fue suministrado por Wagners Australia para la construcción de las pistas de alta resistencia de 435 mm de espesor, como se muestra en la figura 8, en las zonas de giro de los aviones. Había tres zonas de pistas de geopolímero, incluido el nodo de giro en el extremo norte de la pista, la calle de rodaje en el lado oeste de la pista y los hangares en el lado este de la pista (Glasby, Day, Genrich y Aldred, 2015).



(pavement design by ACG Engineers)

Figura 8: Sección transversal de diseño de pavimento de hormigón de alta resistencia (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).

La mezcla de GPC utilizada en este proyecto fue desarrollada durante un periodo de 10 años, por los Wagner para crear un hormigón comercial que pudiera ser producido y manipulado de forma similar al hormigón convencional. El parámetro de mezcla resumido de este GPC (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015):

- Ligante total de alúmina-silicato compuesto de escoria + FA, 415 kg/m^3 .
- Relación agua: aglutinante: 0,41.
- Tamaño máximo nominal del árido de 40 mm, conforme con 28 mm según AS 2758.1 (3).
- Activador químico, 37 kg/m^3 contenido en sólidos.
- Aditivo reductor de agua patentado.

El hormigón utilizado en el Aeropuerto BWW se produjo en una planta móvil doble de mezcla húmeda por lotes establecida en el emplazamiento del proyecto, con una capacidad máxima de suministro de $120 \text{ m}^3 / \text{hr}$, como se muestra en la Figura 9 (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).



Figura 9: Planta de doble lote de geopolímeros (Glasby, Day, Genrich y Aldred, 2015)

2.3 Teoría relacionada con la metodología

Para determinar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, el grupo ha utilizado diversas teorías asociadas al método. En este capítulo se describirá la teoría en la que se basan los métodos utilizados.

2.3.1 Elaboración de la receta

El diseño de una mezcla de hormigón se dosifica en función de las propiedades deseadas del hormigón. La regla principal es que la composición de la matriz controla las propiedades del hormigón endurecido, mientras que las composiciones de los áridos controlan las propiedades del hormigón fresco (Maage, 2015, p. 156).

Se trata de una regla aproximada, lo que significa que aún es posible ajustar las propiedades del hormigón fresco modificando ligeramente las propiedades de la matriz sin cambiar simultáneamente las propiedades del hormigón endurecido (Maage, 2015, p. 156).

2.3.2 Tamaño de los áridos

El tamaño de las partículas afecta en gran medida sobre todo a las propiedades del hormigón fresco, pero también al endurecido (Maage, 2015, p. 119). Normalmente, las fracciones utilizadas en la producción de hormigón premezclado y prefabricado se dividen en fracciones de 0-8 mm, 8-16 mm y 16-22 mm en la producción de hormigón premezclado (Maage, 2015, p. 130). Los áridos finos tienen la propiedad de "efecto de relleno" que rellena los huecos con material en lugar de aire. Esto genera una trabajabilidad ligeramente menor, pero aumenta la estabilidad al tiempo que disminuye el sangrado, aumenta la resistencia a la compresión y se mejora el grado de compactación (Diagne, Ibrahima, & Gueye, 2021).

Para conseguir una alta resistencia a la compresión, Neville y Aïtcin sugieren fracciones del tamaño 10- 14 mm para el hormigón de alto rendimiento, HPC (Neville & Aïtcin, 1998). Para el HPC, es importante seleccionar cuidadosamente el tamaño de los áridos. La razón por la que las fracciones más pequeñas son beneficiosas se debe a dos parámetros. En primer lugar, las tensiones diferenciales en la interfaz agregado-pasta de cemento, probablemente causarán microfisuras, y esto puede evitarse con fracciones más pequeñas. En segundo lugar, debido a la trituración de las rocas, también se reducen los grandes defectos, por lo que los áridos más pequeños son más resistentes que los más grandes

(Neville y Aïtcin, 1998).

Los áridos angulares también presentan ventajas frente a los redondos, ya que poseen una mayor resistencia a la compresión, debido a la mayor acción de enclavamiento entre los áridos angulares (Nitka & Tejchman, 2020). Debido a la recomendación de

máximo de 10-14 mm (Neville & Aïtcin, 1998), se optó por una reducción del 25% de las fracciones de 8-16 mm a 0-8 mm, en lugar de la proporción entre la distribución original 50-50.

2.3.3 Mezclado y curado del hormigón

Pequeños cambios en la composición de la mezcla de hormigón pueden tener diferencias significativas en las propiedades de trabajabilidad y resistencia. Por lo tanto, se utilizan mezclas de prueba y se ajusta la mezcla en función de las propiedades deseadas (Maage, 2015, p. 165).

El curado estándar del hormigón es el almacenamiento de agua a 20°C (Heidelberg Materials). Las temperaturas más altas, por encima de 40°C, dan lugar a una rápida hidratación y, por tanto, a un rápido desarrollo de la resistencia y viceversa. Por otro lado, las temperaturas de curado elevadas pueden dar lugar a una menor resistencia final y pueden causar fisuración (Maage, 2015, pp. 323-324).

2.4 Teoría relacionada con el procedimiento de ensayo.

Para determinar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, el grupo ha utilizado diversas teorías asociadas al procedimiento de ensayo. En este capítulo se describe la teoría en la que se basa el procedimiento de ensayo utilizado.

2.4.1 Contenido de agua en el agregado

El contenido de agua en el árido se comprueba para medir el agua libre total presente en una muestra de árido. El agua puede proceder de la superficie del árido y del agua disponible en los poros de las partículas del árido (Pavement Interactive, s.f.).

2.4.2 Distribución del tamaño de las partículas en el agregado

La distribución granulométrica es una medida del porcentaje en peso de diferentes tamaños de partículas en materiales granulares y áridos. La distribución granulométrica es importante para determinar las propiedades técnicas del hormigón y se expresa en forma de curva granulométrica (Thue, 2019).

2.4.3 Capacidad calorífica específica

La capacidad calorífica específica, c , indica la cantidad de energía necesaria para calentar 1 kg de material en 1 K. También indica del mismo modo cuánto calor se libera cuando el material se enfría. La capacidad calorífica específica se expresa en J/(kgK) (CBI Norge, s.f.).

2.4.4 Calorimetría de conducción isotérmica

Con el uso del calorímetro isotérmico de conducción, el calor de hidratación de los materiales cementosos se mide directamente monitorizando el flujo de calor de la probeta cuando tanto la probeta como el ambiente circundante se encuentran en condiciones aproximadamente isotérmicas. La calorimetría isotérmica es una buena forma de seguir y documentar todas las etapas del proceso de hidratación (Wadsö, 2005):

- I. Proceso inicial rápido
- II. Periodo de latencia
- III. Periodo de aceleración
- IV. Periodo de retardo
- V. Reacciones a largo plazo

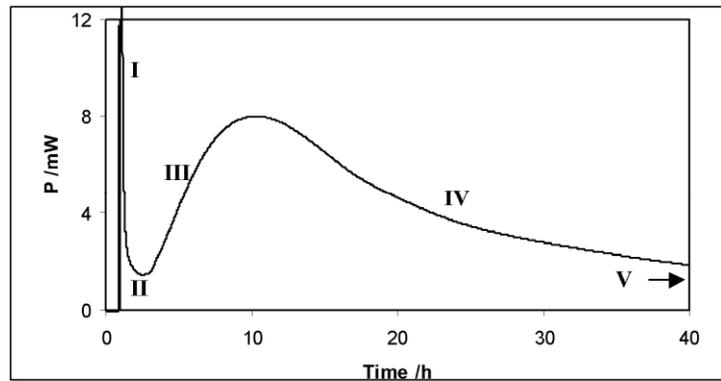


Figura 10: El proceso de hidratación (Wadsö, 2005)

2.4.5 Tiempo de fraguado inicial y final - VICAT

La transición en la que el mortero pasa de ser un material líquido/plástico a una sustancia sólida se denomina tiempo de fraguado. Tras el fraguado, la masa se vuelve rígida, mientras que el desarrollo de la resistencia aún no ha comenzado correctamente. El tiempo de fraguado del hormigón se determina según *la norma NS-EN 480-2* como la edad del hormigón a la que la resistencia a la penetración alcanza 3,5 MPa desde un pistón, aunque también puede determinarse a partir de la curva de evolución térmica (Meyer, 2021).

2.4.6 Trabajabilidad

En la terminología del hormigón, el término trabajabilidad se divide en tres ramas: estabilidad, movilidad y compresibilidad. Lo que tienen en común es que describen cualitativa y en parte cuantitativamente el comportamiento del hormigón fresco (Maage, 2015, p. 181).

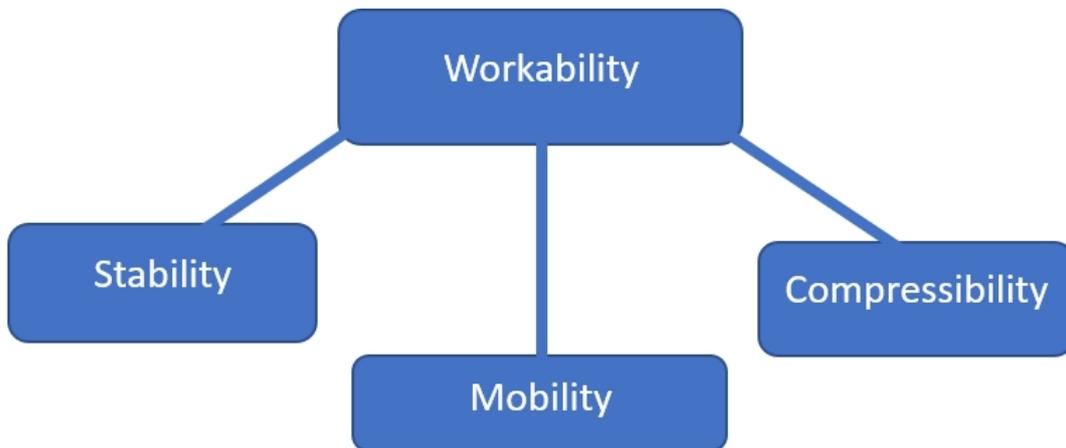


Figura 11: Trabajabilidad (Maage, 2015, p. 181)

Uno de los métodos más utilizados para clasificar la trabajabilidad del hormigón es el ensayo de asentamiento. El rango de aplicación del método de ensayo de asentamiento se extiende desde el hormigón muy rígido al muy fluido.

Table 3 — Slump classes

Class	Slump tested in accordance with EN 12350-2 mm
S1	10 to 40
S2	50 to 90
S3	100 to 150
S4	160 to 210
S5 ^a	≥ 220
^a See Note 1 to 5.4.1.	

Tabla 4: Clases de asentamiento (Standard Norge, 2004)

La tabla 3 Clases de asentamiento de la norma NS-EN 206:2013+A2+NA ha sido reproducida por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" bajo licencia de Standard Online AS May 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

Cuando el asentamiento es superior a 250 mm, otras diferencias dan variaciones insignificantes en las propiedades de trabajabilidad del hormigón.

Para el hormigón con un asentamiento superior a 250 mm, es natural utilizar mediciones de extensión (Maage, 2015, p. 187). Con ayuda de la medición de la dispersión, se puede clasificar la clase de consistencia del hormigón.

Table 6 — Slump-flow classes

Class	Slump-flow ^a tested in accordance with EN 12350-8 mm
SF1	550 to 650
SF2	660 to 750
SF3	760 to 850
^a The classification is not applicable to concrete with D_{max} exceeding 40 mm.	

Tabla 5: Clases de asentamiento (Standard Norge, 2013, p. 28)

La tabla 6 Clases de asentamiento y fluidez de la norma NS-EN 206:2013+A2+NA ha sido reproducida por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

También es natural realizar una prueba de diámetro de flujo para clasificar la clase de flujo. Esto se hace según el método de ensayo NS-EN 12350-5.

Table 5 — Flow classes

Class	Flow diameter tested in accordance with EN 12350-5 mm
F1 ^a	≤ 340
F2	350 to 410
F3	420 to 480
F4	490 to 550
F5	560 to 620
F6 ^a	≥ 630
^a See Note 1 to 5.4.1.	

Tabla 6: Clases de flujo (Standard Norge, 2013, p. 27)

La tabla 5 Clases de fluidez de la norma NS-EN 206:2013+A2+NA está reproducida por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

2.4.7 Contenido en aire

El hormigón es un material poroso que contiene 120-180 l/m³ de poros en el hormigón. Una gran parte de estos poros, especialmente en la superficie, se llena de agua cuando el hormigón se expone al agua libre durante intervalos cortos o largos. Cuando el agua de estos poros se congela, el hielo se expande, lo que puede dañar el hormigón (Maage, 2015, p. 227). Hoy en día, la cantidad de contenido de aire en el hormigón se controla mediante un procedimiento estándar, explicado en el capítulo 4.2.7 Contenido de aire.

2.4.8 Densidad

La densidad, o densidad másica, se expresa en kg/m³ y es la relación entre la masa de una determinada muestra de hormigón y su volumen.

2.4.9 Resistencia a la compresión

Shape of Test Specimen	Size in mm	Modification Factor
Cube	100 x 100 x 100	0.8
	150 x 150 x 150	0.8
	200 x 200 x 200	0.83
Cylinder	150Φ x 300	1.0
	100Φ x 200	0.97
	200Φ x 500	1.05
Square Prism	150 x 150 x 450	1.05
	200 x 200 x 600	1.05

Tabla 7: Factores de modificación en la conversión de la resistencia de las probetas de hormigón (Building Research Institute, s.f.)

La resistencia a la compresión se define como el valor medio de la carga máxima de varias probetas de ensayo normalizadas que se cargan hasta el fallo. La carga máxima se convierte en tensión nominal (Maage, 2015, p. 195).

La norma EN 206 /4/ define la resistencia a la compresión del hormigón en clases de resistencia con la designación B y un número de dos cifras, por ejemplo, B25, que representa la medida de la resistencia característica en cilindros tras un curado estándar de 28 días (Maage, 2015, p. 195). Esto significa que al hormigón se le asigna una clase de resistencia en función de los requisitos de la resistencia característica en cilindros, f_{ck} , aunque la resistencia característica en cubos $f_{ck,cube}$, sea superior. Factores de modificación que figuran en el cuadro 7 pueden utilizarse cuando ensayo de resistencia del cubo para presentar la resistencia característica del cilindro.

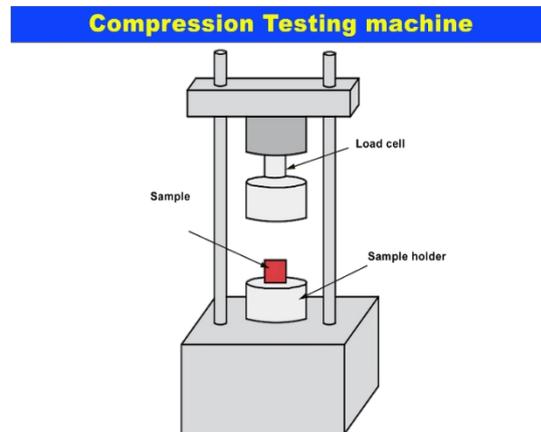


Figura 12: Máquina de ensayo de compresión (EPOXY TILE FLOORING, 2021)

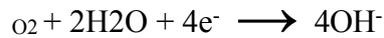
2.4.10 Intrusión de cloruro

Cuando una cantidad suficiente de cloruros entra en contacto con el acero de refuerzo, la capa de óxido pasivante se destruye y puede producirse corrosión aunque el valor del pH sea alto. Este tipo de corrosión suele tener una progresión más rápida que cuando el proceso se inicia por carbonatación (Maage, 2015, p. 42). La corrosión resultante de la entrada de cloruros se considera "más peligrosa" que la carbonatación, ya que la progresión se produce en zonas más delimitadas de la superficie del acero en las que se destruye la capa de óxido. Esto conduce a un deterioro más rápido del acero, que puede compararse al "cutting" de la armadura, denominado "pitting" (Maage, 2015, p. 224).

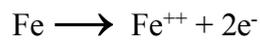
El valor límite de una cantidad suficiente de cloruros para iniciar la corrosión no es un rango definido, sino que viene determinado por factores como el nivel de pH, la estructura de los poros, la porosidad, la humedad, etc. del hormigón (Maage, 2015, p. 221). En el hormigón están presentes tanto cloruros libres como ligados. Los cloruros libres están disueltos en el agua de los poros, mientras que algunos estarán química o físicamente ligados a productos de reacción. Sólo los cloruros libres crean problemas de corrosión. La

proporción de cloruros libres y ligados no depende significativamente de la proporción de masa o del nivel de humedad, sino más bien del tipo de cemento, la cantidad de SF y el nivel de pH en el hormigón.

El proceso catódico, el "engine" de la corrosión (Maage, 2015, p. 223):



Proceso anódico, el acero se corroe (Maage, 2015, p. 223):

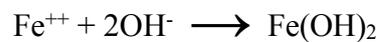


El proceso de corrosión se produce de la siguiente manera:

1. Durante el proceso de iniciación, no se produce corrosión ni hay signos de degradación.
2. Tras el proceso de iniciación, es impredecible cuándo se hace visible el daño por corrosión.

El proceso anódico, tal como se ha descrito químicamente más arriba, es una reacción en el acero en la que el hierro se desintegra. Los electrones viajan de un lugar del acero a otro, donde hay suficiente O y H₂O para iniciar el proceso catódico. Cuanto mayor sea la relación cátodo/ánodo, más rápido será el proceso de corrosión (Maage, 2015, p. 223).

Proceso de corrosión u "oxidación" (Maage, 2015, p. 224):



2.4.11 Carbonatación

En principio, el hormigón es un material de construcción muy alcalino con un nivel de pH de alrededor de 13,5 - 14,0 (Maage, 2015, p. 219). Esto se debe al producto de reacción Ca(OH)_2 , que se forma durante el proceso de endurecimiento del hormigón, así como a pequeñas cantidades de compuestos alcalinos como Na_2O y K_2O . La combinación de estos componentes da lugar a la formación de iones en el agua de los poros, y se forma una capa de óxido en la superficie del acero de refuerzo - la corrosión no puede ocurrir (Maage, 2015, p. 219).

Cuando el CO_2 penetra en el hormigón y reacciona químicamente con los componentes mencionados, se produce el proceso de carbonatación (Maage, 2015, p. 219):



En el hormigón carbonatado, el valor del pH se reducirá a aproximadamente 8,3, y el acero de refuerzo dejará de estar protegido por la película de óxido. Este proceso depende de la humedad relativa y se detiene completamente por debajo de aproximadamente el 50% de humedad, ya que no hay suficiente contenido de agua en los poros del hormigón para que se produzca la reacción química (Maage, 2015, p. 219).

2.5 Durabilidad y refuerzo

⁽¹⁾ La durabilidad describe la capacidad de una estructura para alcanzar la vida útil prevista y cumplir los requisitos de usabilidad, resistencia y estabilidad, sin una reducción significativa de su utilidad ni la necesidad de un mantenimiento exhaustivo imprevisto (Standard Norge, 2004, p. 45).

El capítulo 4 - 4.1 Generelt (1) de la norma NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 ha sido reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" bajo licencia de Standard Online AS May 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

⁽¹⁻²⁾ Para alcanzar la vida útil de diseño, debe tenerse en cuenta el diseño, la selección de materiales, los detalles de construcción, la ejecución, el control de calidad, la inspección y la documentación durante la fase de diseño (Standard Norge, 2004, p. 47).

Capítulo 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) y (2) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

Las estructuras de hormigón suelen ser duraderas y suelen cumplir su función durante más tiempo del previsto, siempre que se diseñen y construyan correctamente. Sin embargo, se han observado diversas formas de deterioro. Las causas del deterioro son relativamente bien conocidas (Maage, 2015, p. 217).

Si se observan los diferentes tipos de daños que sufren las estructuras de hormigón tanto en Noruega como en la mayoría de los demás países en la actualidad, se observa rápidamente que los daños están relacionados en gran medida con la corrosión de las armaduras. Para evitar que se inicie la corrosión, el recubrimiento de hormigón es crucial (Maage, 2015, pp. 217-226).

2.5.1 Cubierta de hormigón

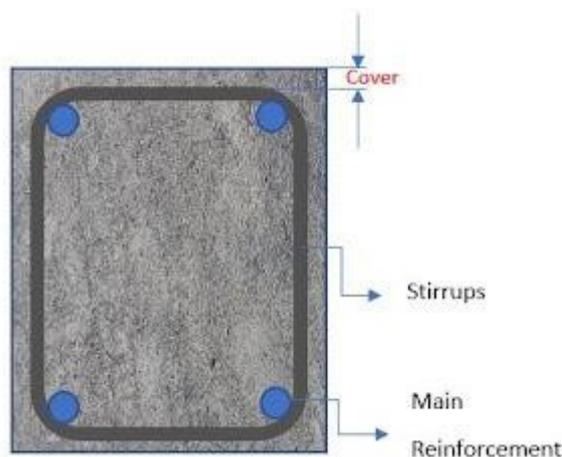


Figura 13: Sección transversal de columna reforzada (Anre, 2020)

(1-2) Para alcanzar la vida útil prevista de una estructura de hormigón, deben tomarse medidas para proteger los distintos componentes de la estructura frente a los factores ambientales pertinentes (Standard Norge, 2004, p. 47).

Capítulo 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) y (2) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: A future-oriented concrete" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

(1) El recubrimiento de hormigón es la distancia entre la superficie de las armaduras más externas y la superficie más cercana del hormigón (Standard Norge, 2004, p. 47).

(2) Al diseñar estructuras de hormigón según la norma NS-EN 1992-1-1, el recubrimiento nominal, C_{nom} , se define como un recubrimiento mínimo, C_{min} , más una desviación ΔC_{dev} que debe tenerse en cuenta en el diseño (Standard Norge, 2004, p. 47).

Capítulo 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) y (2) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

(1-2) El recubrimiento mínimo del hormigón, C_{min} , tiene por objeto garantizar la transferencia segura de fuerzas mediante la adherencia, la protección del acero contra la corrosión y una resistencia satisfactoria al fuego (Standard Norge, 2004, p. 48).

Capítulo 4 - 4.4.1.2 Sobredimensionamiento mínimo C_{min} (1) y (2) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

(1) Para obtener la cobertura nominal, se añade a la cobertura mínima el valor absoluto de la desviación negativa permitida, ΔC_{dev} (Standard Norge, 2004, p. 51).

Capítulo 4 - 4.4.1.3 Tillatte avvik, hensyn ved prosjekteringen (1) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

(2) Cubierta nominal para armadura (Standard Norge, 2004, p. 47):

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Dónde:

C_{min} - Cubierta mínima, mm

ΔC_{dev} - Desviación admisible, mm

C_{nom} - Cubierta nominal, mm

Capítulo 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) y (2) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

2.5.2 Refuerzo mínimo

⁽³⁾ El área mínima de refuerzo, A_s, \min , se especifica para evitar modos de fallo frágiles, grandes grietas y para absorber las fuerzas que surgen de las acciones impuestas (Standard Norge, 2004, p. 151).

El capítulo 9 - 9.1 Generelt (3) de la norma NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 ha sido reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

⁽¹⁾ Cuando se refuerza hormigón en estructuras de edificios, la sección transversal (Standard Norge, 2004, p. 151):

$$A_s, \min = 0,26 * \frac{f_{ct,m}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0,0013 * b_t * d$$

Dónde:

$f_{ct,m}$ - Valor medio de la resistencia a la tracción

axial del hormigón f_{yk} - Límite elástico característico

de la armadura b_t - Anchura media de la zona de tracción

d- Espesor efectivo de la sección transversal, distancia desde la línea central del refuerzo de tracción hasta el borde de compresión.

Capítulo 9 - 9.2.1.1 Minste og største armeringsareal (1) de NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

2.6 BIM, Modelado de información para la construcción

Building Information Modeling, BIM, es un proceso digital utilizado en la industria de la construcción y la ingeniería. Un modelo BIM es un modelo preciso y detallado de un edificio o infraestructura. Los modelos BIM pueden contener toda la información relevante para un proyecto de construcción, incluidas dimensiones, materiales, funciones y ubicación. Los modelos BIM también pueden incluir información sobre el consumo de energía, los costes, el tiempo de construcción, el funcionamiento y el mantenimiento (Autodesk, s.f.).

2.6.1 Usuarios de BIM

Todos los grupos profesionales implicados en un proyecto de construcción pueden utilizar BIM. Los usuarios típicos son arquitectos, ingenieros, contratistas y propietarios de edificios. BIM permite agilizar la colaboración y puede contribuir a que el proyecto sea más preciso y el producto final mejor. Los arquitectos diseñan, los ingenieros calculan, los diseñadores de interiores visualizan espacios y mobiliario, los contratistas realizan cálculos cuantitativos, planifican la logística y ejecutan el proyecto según lo previsto, mientras que los propietarios de los edificios utilizan BIM para tener la supervisión y el control durante toda la fase de construcción (Nordic BIM Group, s.f.).

2.6.2 Norma BIM

NS-EN ISO 19650 es una norma internacional y proporciona una descripción de los principios para la gestión de la información mediante BIM. Se trata de un marco de administración e intercambio de información, incluido el control de versiones y la organización, para todas las partes interesadas que participan en un proyecto de construcción (Standard Norge, 2022).

2.6.3 Revit

Revit es un software BIM utilizado por arquitectos e ingenieros para crear edificios e infraestructuras de alta calidad. Revit tiene varias aplicaciones diferentes, pero puede utilizarse para modelar formas, estructuras y sistemas en 3D con exactitud paramétrica, precisión y facilidad (Autodesk, s.f.).

2.6.4 Beneficios

Algunas de las ventajas de utilizar modelos BIM en el sector de la construcción son (McKenna Group, s.f.):

- Mejor comunicación y trabajo en equipo.
- Visualización del resultado en la fase de diseño.
- Los conflictos entre disciplinas se detectan con mayor eficacia y facilidad.
- Puede minimizar los incidentes de salud y seguridad. Señalando las zonas y fases de construcción de alto riesgo.
- Un control presupuestario mejor y más fiable.
- Construcciones más ecológicas, gracias a un control más preciso de los materiales.

2.7 LCA

El Análisis del Ciclo de Vida, ACV, es un método sistemático para evaluar los impactos ambientales y sobre los recursos a lo largo del ciclo de vida de un producto o sistema. El ACV también se utiliza como base para elaborar Declaraciones Ambientales de Producto, DAP (LCA Norge, s.f.).

La ECV se divide en dos categorías principales: "Cradle-to-Grave" (de la cuna a la tumba) y "Cradle-to-Cradle" (de la cuna a la cuna), siendo preferible esta última. La metodología de la ECV examina todas las fases implicadas en un producto, desde la extracción de la materia prima, el transporte, la fase de uso, hasta la eliminación o el reciclaje (LCA Norge, s.f.).



Figura 14: Fases del ciclo de vida del producto (Evaluación del ciclo de vida, 2020)

Una EPD describe el impacto medioambiental de un producto o sistema y se documenta en un

informe conciso. Las EPD pretenden proporcionar una mejor base para evaluar los impactos medioambientales, promover el desarrollo medioambiental y son una herramienta importante para el desarrollo de productos innovadores. Deben estar a disposición del público, aprobadas por un tercero, comparables y aditivas para su uso en proyectos de mayor envergadura (LCA Norge, s.f.).

2.7.1 Usuarios de la ECV

El ACV puede utilizarse en el sector de la construcción para contabilizar el impacto ambiental de diferentes opciones de diseño o alternativas técnicas y comparar el impacto de las mismas. Esto se hace para encontrar las soluciones más respetuosas con el medio ambiente durante un proyecto o para documentar cualquier impacto ambiental tras la entrega del producto final (Multiconsult, s.f.).

2.7.2 Norma LCA

El marco y la norma utilizados para realizar un ACV completo son *la norma NS-EN ISO 14040*, y la metodología para el análisis en sí se divide principalmente en 4 componentes:

- Inventario - cálculo de emisiones
- Clasificación - categorización de las emisiones
- Caracterización - cálculo del impacto ambiental
- Mejora : análisis de cómo puede mejorarse el ciclo de vida del producto. mejorado/optimizado (LCA Norge, s.f.).

La norma europea para la elaboración de DAP para edificios y construcción, *NS- EN 15804*, define el modo en que una empresa debe elaborar declaraciones medioambientales. La norma proporciona directrices claras sobre cómo las empresas del sector de la construcción deben realizar el ACV en las DAP. La norma garantiza que todos los grupos de productos utilicen los mismos métodos de ACV para comparar las DAP (LCA Norge, s.f.).

Las normas de categoría de producto, PCR, se desarrollan como complemento de *la norma NS-EN 15804* y contienen normas y condiciones adicionales para categorías de productos específicas. El principio fundamental de una PCR es determinar qué procesos y materiales debe abarcar el análisis y qué debe definirse como unidad declarada para el producto. Esto se hace para que los fabricantes deban declarar el contenido de sustancias con un impacto ambiental significativo en los productos pertinentes, con el fin de facilitar la comparación de las huellas ambientales de varios productos dentro de la misma categoría (LCA Norge, s.f.).

2.7.3 SimaPro

SimaPro es una herramienta de software innovadora utilizada para realizar la ECV de productos y servicios. SimaPro es una de las principales soluciones de software de ACV del mundo y es utilizada por empresas, consultores y universidades de más de 80 países (SimaPro, s.f.). El programa cuenta con una vasta biblioteca de datos e información científica necesaria para recopilar, analizar y monitorear datos de sostenibilidad de productos y servicios. Esto facilita la modelización de los ciclos de vida de forma sistemática, al tiempo que permite editar y personalizar los distintos productos que ya se encuentran en la base de datos.

El programa incluye una amplia gama de funciones que ayudan a los usuarios a identificar y estimar el impacto ambiental de un producto, desde la extracción de las materias primas hasta la gestión de los residuos.

Esto la convierte en una herramienta útil en la industria de la construcción y la ingeniería, ya que puede ayudar a las empresas a comprender y mejorar su desarrollo sostenible (SimaPro, s.f.).

2.7.4 Beneficios

Cuando se utiliza el ACV en las primeras fases del desarrollo conceptual de sistemas o productos, permite evaluar el impacto ambiental de varias alternativas. Esto proporciona una forma sistemática de documentar e identificar las soluciones más respetuosas con el medio ambiente y rentables para el concepto en cuestión. A continuación se ilustra el principio de un ACV.

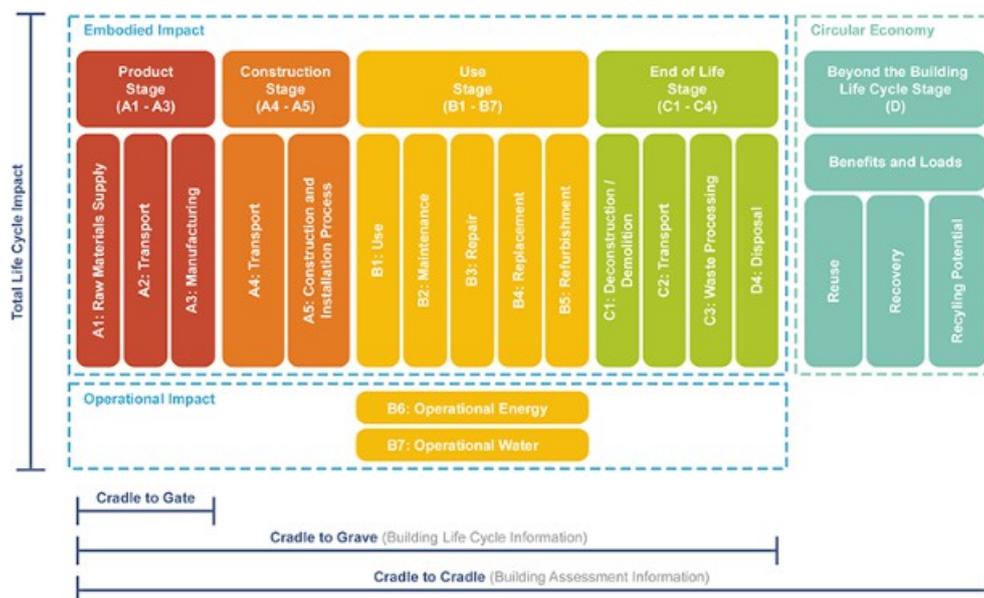


Figura 15: Principio de estructura de la ECV (BNP Media, 2021)

2.7.5 GWP - Potencial de calentamiento global

Al realizar el estudio de ACV en SimaPro, se utiliza el valor de GWP100. Esto se refiere al efecto de calentamiento acumulado en relación con las emisiones de CO₂ durante un período de 100 años.

El GWP suele dividirse en 4 indicadores diferentes:

GWP Total: la suma de la transformación fósil, biogénica y terrestre.

GWP Fósil: El indicador GWP fósil considera el GWP para las emisiones y secuestro de gases de efecto invernadero en todos los medios resultantes de la oxidación o reducción de combustibles fósiles o

sustancias fósiles que contienen carbono. También incluye el secuestro o las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de materiales inorgánicos, como la carbonatación del cemento.

GWP Biogénico: En resumen, se refiere al CO_2 almacenado en el material/producto, indicando la cantidad de CO_2 absorbido de la atmósfera durante el crecimiento de la biomasa y las emisiones biogénicas al aire a través de la oxidación o descomposición de la biomasa, por ejemplo, la quema de biomasa.

GWP Transformación de la tierra: Este es el indicador de las emisiones y secuestros de gases de efecto invernadero CO_2 , monóxido de carbono (CO), tetrahidruro de carbono (CH_4) que surgen de los cambios en las reservas de carbono especificadas como resultado del uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra.

(LCA, s.f.)

3 Marco

Para elaborar esta tesis se han utilizado los siguientes manuales y normas:

Normas	Descripción
HB R210 (Vegdirektoratet, 2014)	Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser consta de descripciones de métodos para análisis de laboratorio realizados en la Administración de Carreteras Públicas de Noruega (Statens Vegvesen). HB R210 se basa en las normas vigentes.
NS-EN 206 (Standard Norge, 2013)	La norma NS-EN 206 especifica los requisitos para la composición del hormigón y las reglas para verificar las propiedades esperadas.
NS-EN 1992-1-1, EC 2 (Norma Norge, 2004)	El Eurocódigo 2 establece las bases para el diseño de estructuras de hormigón, así como los requisitos de capacidad, capacidad de servicio, durabilidad y resistencia al fuego.
NS-EN ISO 14040 (Standard Norge, 2006)	NS-EN ISO 14040 describe los principios y el marco de la evaluación del ciclo de vida (ECV), su finalidad y su ámbito de aplicación.
NS-EN 12350 (Standard Norge, 2019)	Comprobación de las propiedades del hormigón fresco
ASTM C 1679 - 09 (Norma Norge, 2022)	Medición de la cinética de hidratación de mezclas cementosas hidráulicas mediante calorimetría isotérmica

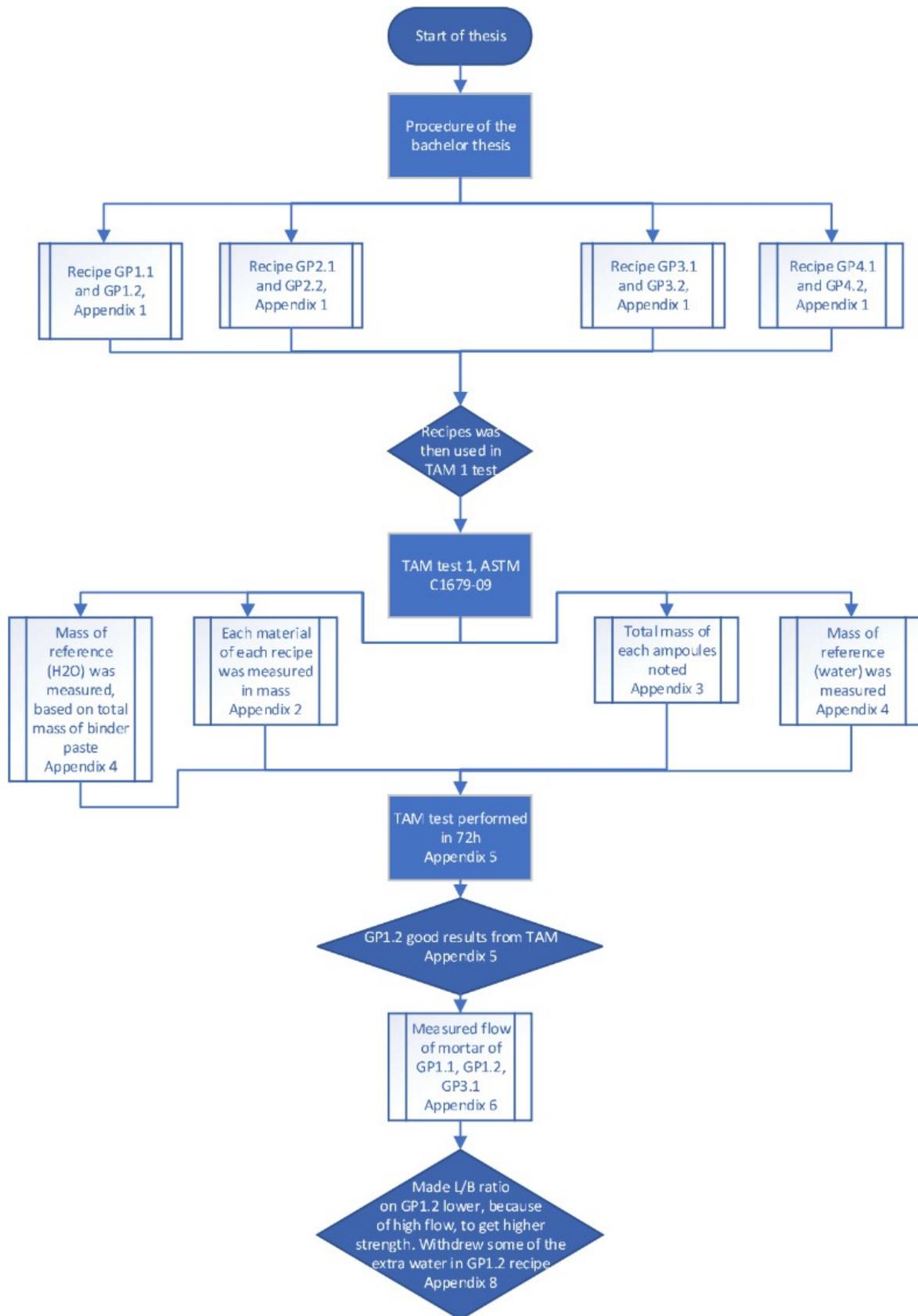
<p>NS-EN 196-3:2016 (Standard Norge, 2016)</p>	<p>Métodos de ensayo del cemento. Parte 3: Determinación de los tiempos de fraguado y de la solidez.</p>
<p>NT Build 492 (Nordtest, 1999)</p>	<p>Hormigón, mortero y materiales de reparación a base de cemento: Coeficiente de migración de cloruros a partir de experimentos de migración en estado no estacionario</p>

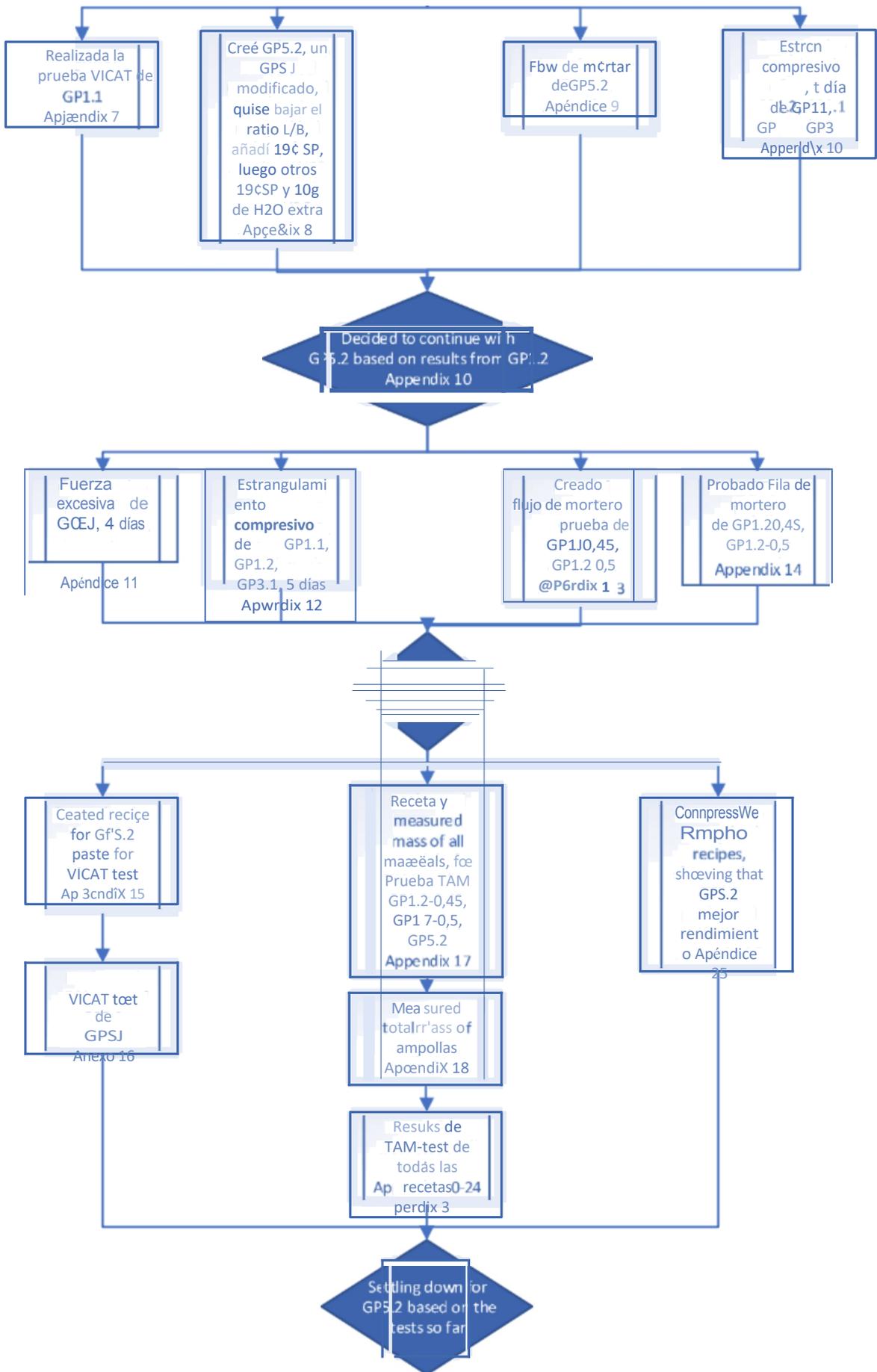
Cuadro 8: Normas utilizadas

4 Método

Para que los resultados sean comparables y reproducibles, el grupo ha utilizado pruebas y métodos estandarizados que se basan en normas internacionales oficiales. Éstos describirán la calidad y las propiedades de la receta de GPC desarrollada por el grupo. En este capítulo, se describirán los métodos y procedimientos utilizados y se incluirán imágenes de los procedimientos de ensayo reales. El siguiente diagrama de flujo ilustra el proceso de desarrollo de la receta final y la extracción de los resultados:

Diagrama de flujo de la elaboración de recetas





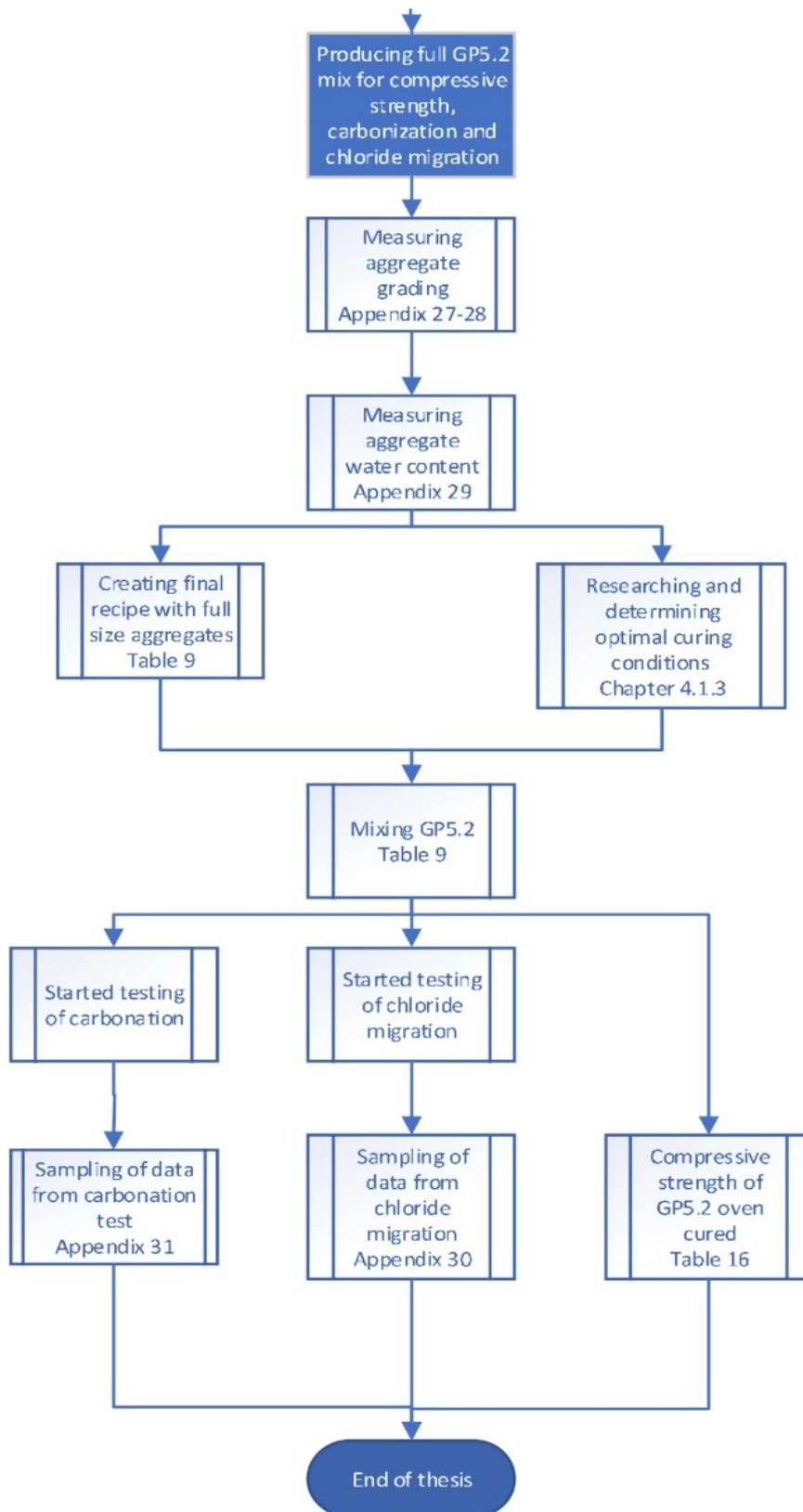


Figura 16: Diagrama de flujo del desarrollo de la GPC

4.1 Elaboración de la receta

Hay muy pocas normas disponibles sobre recetas de hormigón geopolímero. El consejero de este grupo disponía de una receta prefabricada, mezclada entre dos recetas existentes, que podía probarse con distintas molaridades de las soluciones alcalinas, así como la trabajabilidad de los diseños de mezcla y, por último, la resistencia.

Durante aproximadamente un mes, el grupo trabajó en el desarrollo de una receta de geopolímero. Este proceso dio lugar a 11 recetas diferentes que el grupo utilizó para experimentos posteriores. El grupo utilizó los resultados de las pruebas calorimétricas para eliminar 8 de las 11 recetas. De estas 3 recetas restantes, el grupo tenía claro que la receta de hormigón con la mayor resistencia temprana a la compresión y la mejor trabajabilidad era en la que se centraría el proyecto, la GP5.2.

GP5.2, L/GB = 0,55				
Material	Recipe weight	Actual weight, batch 1	Actual weight, Batch 2	$\frac{kg}{m^3}$
FA	5,472kg	5,472kg	5,472kg	243,2kg
GGBFS	3,648kg	3,646kg	3,648kg	162,1kg
Na ₂ SiO ₃	2,736kg	2,736kg	2,736kg	121,6kg
KOH	1,824kg	1,824kg	1,824kg	81,1kg
Free water	0,3045kg	0,3045kg	0,3045kg	13,5kg
SP	0,177kg	0,177kg	0,177kg	7,9kg
Aggregate 0/8	21,703kg	21,702kg	21,702kg	964,5kg
Aggregate 8/16	17,001kg	17,002kg	17,002kg	755,7kg
L/GB ratio	$\frac{121,6 + 81,1 + 13,5 + 7,9[kg]}{243,2 + 162,1[kg]} = 0,55$			

Cuadro 9: Receta y peso real de GP5.2

4.1.2 Tamaño de los áridos

El grupo eliminó la fracción de 16-22 mm y se conformó con las de 0-8 mm y 8-16 mm, como se indica en la teoría, 2.3.2 Tamaño de los áridos. Como una de las fracciones estándar es 8-16 mm, el grupo la eligió en lugar de crear una serie de fracciones propia. También se eligió la reducción del 25% de 8-16 mm a 0-8 mm, para acercarse más al tamaño de árido sugerido de 10-14 mm.

4.1.3 Mezclado y curado del hormigón

Durante la producción de hormigón, el grupo optó por seguir el procedimiento descrito en *HB R210 411, "Produsering av betong i laboratorium"*. Se utilizó una mezcladora forzada de tipo (ZK 50 HE), y el grupo optó por dividir la mezcla deseada en dos lotes. Estos lotes se mezclaron el mismo día, y se supone que las desviaciones son pequeñas. Tras la mezcla, se midió la temperatura del lote y se realizaron las siguientes pruebas, 4.2 Procedimientos de prueba y colada de probetas.



Figura 17: Hormigonera del tipo ZK 50 HE (Pemat)

El colado de las piezas de prueba se realizó de acuerdo con la norma *HB R210 416, "Støping av Prøvestykker"*, con una pequeña desviación. Como ya se ha indicado, las condiciones óptimas de curado del GPC se sitúan entre 40-100°C durante 20 horas. Por tanto, el grupo optó por desviarse del almacenamiento con plástico durante 16 horas y, en su lugar, someter el hormigón fresco a 80°C y 20 horas, y después en condiciones

ambientales a 20°C en una estricta sala de temperatura controlada. Al moldear

la mezcla GP5.2 deseada, se moldearon un total de 4 cubos para las pruebas de carbonatación, 4 cilindros para las pruebas de penetración de cloruros y 12 cubos para las pruebas de resistencia a la compresión a 1, 7 y 28 días, con la mitad de ellos curados en horno y el resto a temperatura ambiente, 20°C. Transcurridas 24 horas, se desmoldaron los cubos y se sellaron las muestras en un recipiente hermético.

4.2 Procedimientos de ensayo

Los siguientes ensayos se eligen para determinar el comportamiento del GPC en estado fresco y curado. Hay que señalar que se dispone de un tiempo limitado para realizar todos los ensayos necesarios para establecer una proposición definitiva del comportamiento del producto final de hormigón.

4.2.1 Contenido de agua en el agregado

Para determinar el contenido de agua en los áridos, el grupo sigue la *norma HB R210, 121 "Vanninnhold i tilslag"*.

Esto se hace midiendo un tazón de agregado húmedo que se va a probar después de que se haya pesado una cierta cantidad mínima como se muestra en, la Tabla 10.

Granulometría superior (D) (mm)	Cantidad mínima de muestras (kg)
< 1	0,2
4	0,8
8	1,6
16	3,2
22	4,4

Cuadro 10: Cantidad mínima de muestra de la granulometría superior

La muestra húmeda se pesa y se introduce en una estufa de secado hasta obtener una masa constante. Una vez seca la muestra, se vuelve a medir la masa.

Fórmula para el contenido de humedad:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100$$

Dónde:

w- contenido de agua en %

M₁ - masa de la muestra húmeda en

gramos + bol M₂ - masa de la muestra seca en

gramos + bol M₃ - masa del cuenco en gramos

4.2.2 Distribución granulométrica de los agregados

Para determinar la distribución granulométrica de los agregados, el grupo siguió el método de la norma HB R210, 131 "Sikteanalyse (tørrsikting av vasket materiale)" de Statens Vegvesen.

Para ello, se mide una cantidad de árido como se indica en el cuadro 11.

Granulometría superior (D) (mm)	Cantidad de muestras (kg)
90	80
63	40
45	20
32	10
22	5

16	2,6
11	1,4
8	0,6
≤4	0,2

Cuadro 11: Cantidad medida de áridos

El agregado se tamiza a través de tamices con aberturas cuadradas durante 10 minutos. Los tamices se pesan antes y después de la prueba.

Los resultados se registran calculando el residuo de cada prueba de tamizado, R_1, R_2, \dots, R_n , en función de la cantidad total de muestra (M_1), y sumándolos a continuación.

El valor porcentual para cada granulometría se obtiene mediante la siguiente fórmula y se aplica a todos los áridos hasta 0,063 mm:

$$X_i = \frac{R_i}{M_1} * 100$$

Dónde:

R_i - masa en gramos de cada fracción
 M_1 - masa seca total de la muestra

La granulometría inferior a 0,063 mm (áridos finos) se determina mediante la fórmula siguiente:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

Dónde:

M_1 - la masa seca total de la muestra
 M_2 - granulometría superior a 0,063 mm después del lavado
P- material tamizado que queda en la cubeta inferior

4.2.3 Prueba calorimétrica TAM

El comportamiento de la matriz, principalmente el tiempo de fraguado y curado, y el nivel de hidratación, se determina mediante una prueba calorimétrica. El objetivo de la calorimetría es nivelar la temperatura del calor emitido por las muestras y calcular la energía producida. Las muestras se ajustan a una masa individual de referencia, m_{ref} , con una capacidad calorífica específica fija, c . A continuación, se registra en qué momento se libera la energía y la cantidad de energía (Wadsö, 2005).



Figura 18: Aparato TAM

Al realizar la prueba calorimétrica, el grupo calculó la masa exacta de cada probeta utilizando la fórmula de la capacidad calorífica específica.

La fórmula para la capacidad calorífica específica es (The Engineering Toolbox, s.f.):

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T}$$

Dónde:

- c- capacidad calorífica específica, J/(kgK)
- m- peso de la masa, kg
- ΔT - velocidad de cambio de

temperatura, K Q- energía, J

Para calcular la masa de referencia de las ampollas se utilizaron los siguientes valores de capacidad calorífica, facilitados por uno de los consejeros:

Capacidad calorífica	Valor(J/Kg*K)
Cslag	1,05
CFA	0,72
Cpw	4,18
CNa ₂ SiO ₃	0,92
CNaOH	0,7
CKOH	1,174

Cuadro 12: Valores de la capacidad calorífica

A continuación, el grupo midió el agua para las ampollas de referencia y mezcló la pasta de cemento para el geopolímero en las ampollas de muestra, las selló e inició la prueba TAM. La masa de las ampollas se calculó en unos 6 g para simplificar la rutina de la prueba.

El proceso TAM incluyó un total de 11 modificaciones diferentes del geopolímero y estuvo procesando información durante 72 horas. A continuación, el grupo obtuvo los resultados del ordenador conectado a la cámara, en forma de diagrama. Los diagramas ilustraban la producción de calor a lo largo del tiempo.

Como muestra la figura siguiente, **P** refleja el **ritmo** del proceso, **Q** refleja el **alcance** del proceso.

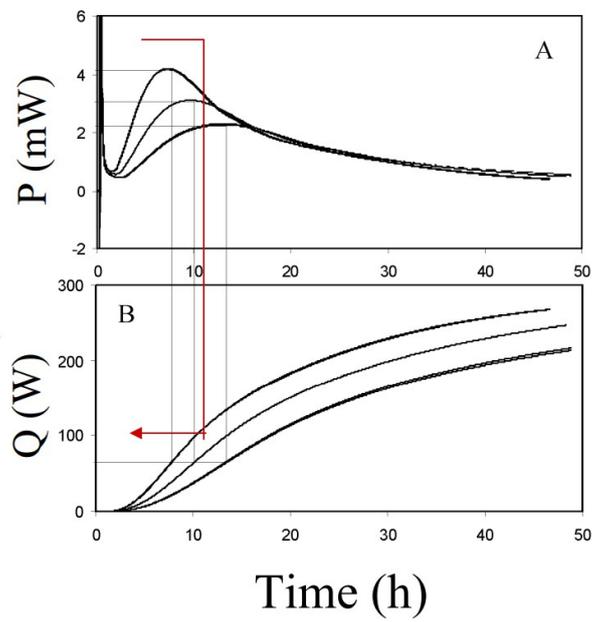


Figura 19: Tasa frente a extensión del proceso (Wadsö, 2005)

4.2.4 Tiempo de fraguado inicial y final de la pasta de cemento, VICAT

Con el uso de la máquina automática Vicat, "Vicatronic Automatic Vicat Recording Apparatus", se consigue determinar el tiempo de fraguado inicial y final de la pasta geopolimérica.



Figura 20: Aparato automático de grabación Vicatronic (MATEST, s.f.)

Siguiendo el procedimiento de ensayo descrito en *la norma NS-EN 196-3*, el requisito para la sala es de $(20^{\circ}\text{C} \pm 2)$, y no menos del 90% de humedad relativa. La sonda se sentó a caída libre, y los siguientes parámetros se sentó durante la prueba (MATEST, n.d.):

- Tiempo de intervalo: 5 min
- Tiempo total: 420 min
- Calibración: 0 mm y 40 mm

4.2.5 Prueba de asentamiento

Siguiendo el procedimiento descrito en *HB R210, 412 Konsistens; synkmål*, el grupo determinó la consistencia del hormigón geopolímero fresco. La prueba de asentamiento mide la distancia entre la parte superior del cono de asentamiento y el punto más alto del hormigón después de levantar el cono y apartarlo, como se muestra en la figura 21.

Se humedece la base y se rellena el cono con tres capas de grosor aproximadamente igual mientras se mantiene contra la base. Cada capa se compacta con 25 impactos de una varilla de acero antes de rellenar la siguiente capa. Una vez compactada la tercera capa, se rellena el hormigón de modo que quede nivelado con la superficie del cono.

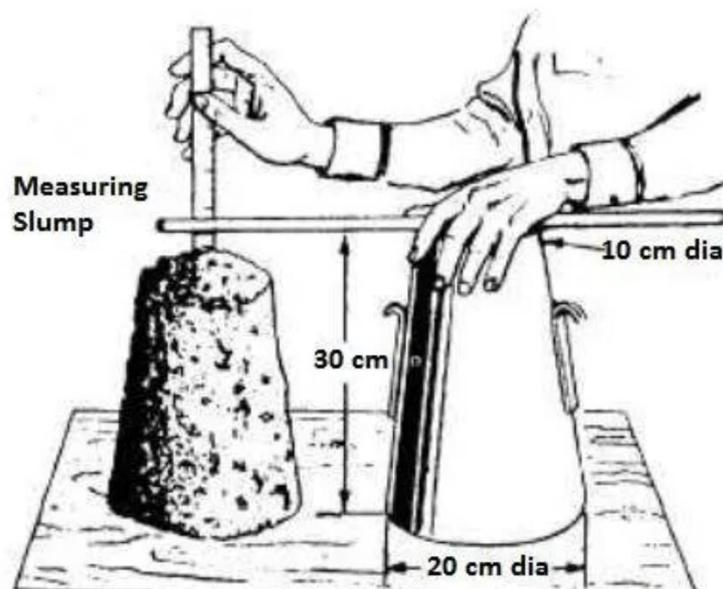


Figura 21: Tabla de pruebas de asentamiento (Mishra, s.f.)

El grupo ha realizado la prueba de asentamiento y se han derivado las mediciones. La prueba de asentamiento se muestra en la Figura 22 a continuación.



Figura 22: Flujo de asentamiento en la creación

4.2.6 Prueba de fluidez

Simultáneamente a la prueba de asentamiento, el grupo también midió la extensión de la mezcla de geopolímeros. Para ello se siguió el procedimiento descrito en *la norma NS-EN 12350-8: Ensayo de hormigón fresco, Parte 8. Hormigón autocompactante: Hormigón autocompactante - Ensayo de asentamiento*. El GPC desarrollado por el grupo se clasifica como hormigón autocompactante, SCC, debido a la adición de superplastificante.

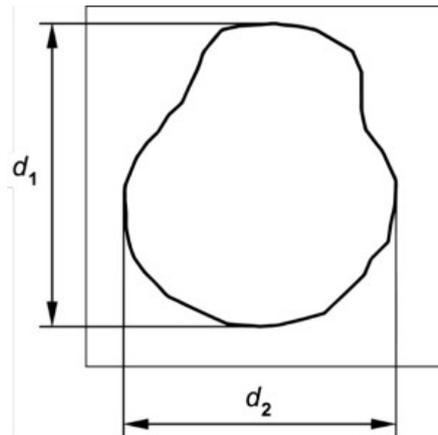


Figura 23: Diferencial de flujo (Standard Norge, 2019)

Figura 4 Komprimeringsstøter de NS-EN 12350-5:2019 es reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

El asentamiento es la media de d_1 y d_2 , expresada con una aproximación de 10 mm, dada por la fórmula (Standard Norge, 2019):

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Dónde:

SF- es el flujo de desprendimiento; mm

d_1 - es el mayor diámetro de dispersión del

flujo; mm d_2 - es la dispersión del flujo a 90°

con respecto a d_1 ; mm

El capítulo 8 Prøvningsresultat formel og tekst de la norma NS-EN 12350-5:2019 ha sido reproducido por B23B02 en la tesis "Geopolymer Concrete: Un hormigón orientado al futuro" bajo licencia de Standard Online AS Mayo 2023. Standard Online no garantiza la exactitud de la reproducción. Véase www.standard.no

4.2.7 Contenido en aire

Para determinar el contenido de aire en la GPC, se sigue el método 415 "Luftinnhold, trykkmetoden", descrito en *HB R210* por Statens Vegvesen. Para ello se utiliza un medidor de aire calibrado, como se muestra en la figura 24.



Figura 24: Herramienta de medición del contenido de aire, control del contenido de aire del hormigón fresco (Vegdirektoratet, 2014).

Durante el procedimiento, se añaden tres capas de hormigón al contenedor, y cada capa se trabaja con 25 impactos de una barra de acero. El material sobrante se retira del contenedor y, cuando la parte superior está montada, se abren las válvulas de bola. Se añade agua a una de las válvulas de bola hasta que salga por la válvula opuesta, sin burbujas de aire. El calibrador se mantiene ligeramente inclinado para permitir que salga el aire de debajo de la tapa, y se añade agua según sea necesario.

La válvula de ajuste se cierra antes de bombear la presión y el manómetro se ajusta a cero. A continuación, se cierran las válvulas de bola y se lee el contenido de aire de la GPC cuando el manómetro se ha estabilizado. El contenido de aire se expresa en porcentaje con un decimal (Vegdirektoratet, 2014).

4.2.8 Densidad

En el método de ensayo *HB 210, 422 Densitet*, se determina la densidad del hormigón endurecido tras la inmersión en agua. Debido al curado ambiental y al curado térmico del hormigón geopolímero, el grupo ha optado por determinar la densidad seca midiendo la masa y el volumen. La densidad, ρ , se define como la relación entre la masa de una determinada muestra de hormigón y su volumen, y se expresa según el Statens Vegvesen (Vegdirektoratet, 2014):

$$\rho = \frac{m1}{V}, \text{ redondeado a los 10 kg/m}^3 \text{ más próximos.}^3$$

ρ - densidad, (kg/m)³
m1- peso, (kg)
V- volumen, (m)³

4.2.9 Prueba de resistencia a la compresión

El método de ensayo *I*, de *14.631* en *HB-R210 Laboratorieundersøkelser*, describe el procedimiento que el grupo lleva a cabo para el ensayo de resistencia a la compresión de probetas fundidas. El objetivo de este método de ensayo es determinar la resistencia a la compresión (f_c) de las probetas correspondientes.

Durante la ejecución de las pruebas de resistencia a la compresión se respetan las siguientes directrices y normas:

- *NS-EN 12390-3: Ensayo de hormigón endurecido - Parte 3: Resistencia a la compresión de las probetas.*
- *NS-EN 12390-1: Ensayo de hormigón endurecido - Parte 1: Forma, dimensiones y otros requisitos para probetas y moldes.*

La resistencia a la compresión describe la capacidad del hormigón para resistir las tensiones que provocan grietas y/o deformaciones.

En el procedimiento de ensayo, las probetas correspondientes se sacan del baño de agua/recipiente de moldeo al menos media hora antes del ensayo y se secan para eliminar el agua libre de la superficie. A continuación, se miden la densidad en seco y las

dimensiones de las muestras de ensayo con un

pinza deslizando.

Es importante verificar el ángulo entre los bordes laterales de la superficie de presión utilizando una escuadra. El ensayo de compresión se realiza cuando las probetas están húmedas en la superficie y se colocan centradas en el aparato de ensayo de compresión.

La probeta se somete continuamente a una carga aplicada centralmente con un aumento de presión de $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa}$, de acuerdo con la norma *NS-EN 3668*. La resistencia a la compresión por probeta es entonces registrado. Este procedimiento se repite al cabo de 1, 7 y 28 días para documentar el desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón correspondiente.

En el caso de las probetas coladas, la superficie de compresión se calcula a partir de las dimensiones nominales del molde si las dimensiones medidas de la probeta no difieren en más de $\pm 1,0\%$. La resistencia a la compresión se indica en MPa con un decimal.

La resistencia a la compresión (f_c) del hormigón se expresa en MPa, con un decimal, y se calcula mediante la fórmula (Vegdirektoratet, 2014):

$$f_c = \frac{F}{a}$$

Dónde:

a- la superficie de presión de la muestra ,
mm² F- fuerza céntrica aplicada, N

4.2.10 Prueba rápida de permeabilidad a los cloruros

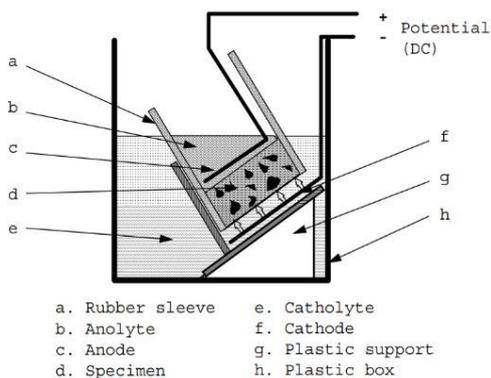


Figura 25: Configuración de la prueba real, RCPT

Figura 26: Configuración de la prueba, RCPT (Nordtest, 1999)

De acuerdo con la *NT Build 492*, el ensayo de permeabilidad rápida al cloruro (RCPT) se realiza para comprobar la resistencia a la penetración del cloruro, indicando así la esperanza de vida de una muestra de hormigón. La muestra de hormigón se moldea en forma cilíndrica o se perfora con un diámetro de 100 mm y un espesor mínimo de 160 mm si se moldea y de 100 mm si se perfora. A continuación, se corta el cilindro con un grosor de 50 mm y se aplica epoxi en las paredes laterales del cilindro. Esto se hace para que los líquidos sólo entren por los extremos del cilindro. A continuación, se monta un manguito de goma en el cilindro, de modo que el borde quede enrasado con la superficie de la muestra.

Catolito y anolito:

- El catolito consiste en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10% (100 g de NaCl en 900 g de agua destilada).
- El anolito consiste en una solución de NaOH 0,3 N (12 g de NaOH en 1 l de agua destilada), Apéndice 30.

A continuación, las soluciones se almacenan a una temperatura fija de 20-25°C.

El cátodo se coloca sobre un soporte de plástico dentro de una caja de plástico. A continuación, la muestra con el manguito se sumerge en el catolito y se coloca en el soporte de plástico impreso en 3D. A continuación, se vierte el anolito en el interior del manguito de goma, con una carcasa cilíndrica de PVC. A continuación, el cátodo y el ánodo se conectan a una tensión continua, con una constante de 10 V y una corriente

de 0,22 Ah durante 24 horas, como se observa en la tabla siguiente.

Table 1. Test voltage and duration for concrete specimen with normal binder content.

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Cuadro 13: Tensión y duración de la prueba (Nordtest, 1999)

A continuación, las muestras se someten a dos líquidos, el anolito y el catolito, a saber, NaCl y NaOH, durante un período de 24 horas. Tras el periodo de 24 horas, el grupo corta, limpia y seca la superficie de la muestra, y espera 15 minutos antes de pulverizar el nitrato de plata sobre el corte central fresco del cilindro. El nitrato de plata ($AgNO_3$) dejará una línea brillante de color blanco en el geopolímero, que especifica dónde ha penetrado el cloruro en la muestra. Esto indicará el nivel de penetración, y a qué nivel debe estar la cubierta de hormigón, para proteger suficientemente las armaduras metálicas. La figura siguiente muestra el procedimiento de medición de la penetración del cloruro. El grupo mide las profundidades de x_{d1} a x_{d7} .

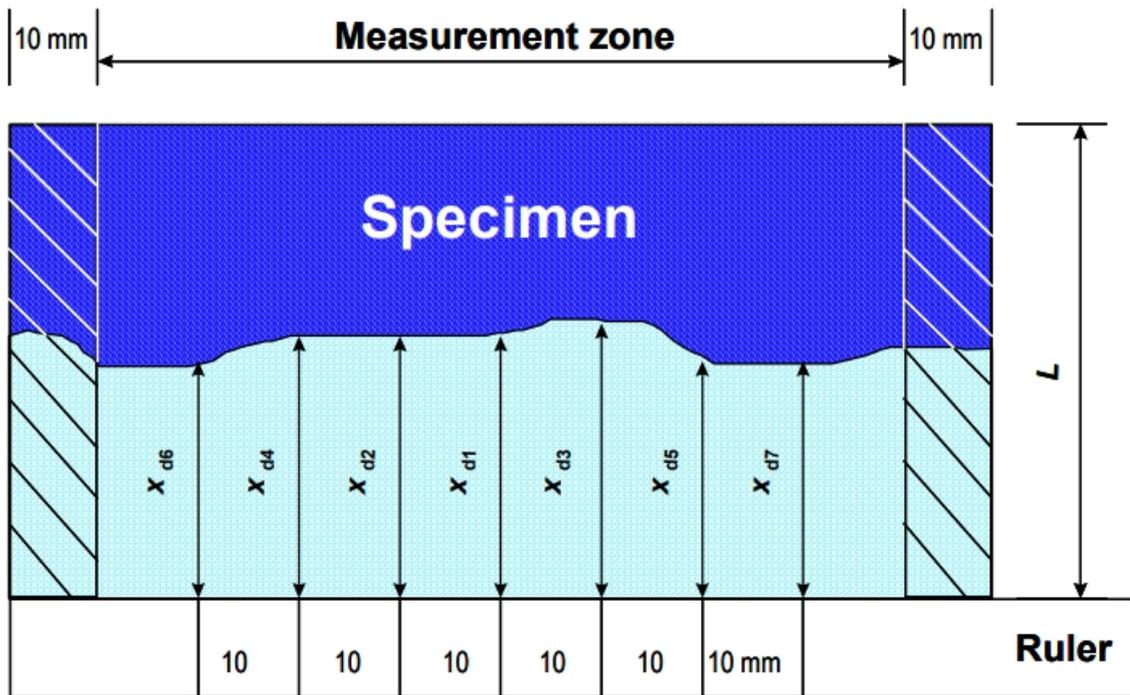


Figura 27: Ilustración de la medición de la profundidad de penetración del cloruro (Nordtest, 1999)

La siguiente imagen muestra la probeta utilizada en el ensayo empezando a mostrar la línea blanca que indicaba la profundidad de penetración del cloruro:



Figura 28: La profundidad de penetración del cloruro empieza a ser visible después de usar el $AgNO_3$

El coeficiente de migración en estado no estacionario, D_{nssm} , se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$D_{nssm} = 0,0239 \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}}$$

Dónde:

D_{nssm} - Coeficiente de migración en estado no estable, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^2$

U - Valor absoluto del potencial externo aplicado entre los dos electrodos ,

V T- Valor medio de las temperaturas inicial y final en el anolito, $^{\circ}\text{C}$.

L- Espesor de la probeta, mm

x_d - Valor medio de las profundidades de

penetración, mm t- Duración del ensayo,

horas

Dado que aún no existen criterios de aceptación para el coeficiente de difusión de cloruros, se ha desarrollado un conjunto de valores sugeridos como directriz sobre el coeficiente de migración de cloruros, D_{nssm} , medido mediante el ensayo RCM. Estos valores se basan en el desarrollo de Tang y Nilsson en 1992, que fue normalizado por la NT Build 492 de NORD en 1999. Los siguientes valores son entonces una sugerencia basada en los dos últimos desarrollos, desarrollados en 2013 (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, p. 7).

Category	Wenner Resistivity (k Ω cm)	Total charge passed (Coulombs)	Non-steady state migration coefficient x 10^{-12} (m^2/s)
Excellent	> 50	<1000	<8
Good	10-50	1000-2000	8-16
Moderate	10-50	2000-4000	16-24
Poor	<10	>4000	>24

Tabla 14: Criterios de clasificación de la resistencia al cloruro para el hormigón (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, p. 13)

4.2.11 La profundidad de carbonatación

Antes de comprobar la profundidad de carbonatación, o de determinar el frente de carbonatación, la probeta de hormigón se almacena en un nivel concentrado de CO_2 utilizando la incubadora de laboratorio Sanyo modelo MCO-17AIC. El período de

almacenamiento en CO₂ se fijó en 14 días, con un nivel de CO₂ de aproximadamente el 5% a una temperatura de 30°C. Esto se hizo para acelerar la carbonatación del espécimen de hormigón y obtener un resultado utilizable.

Debido a una fuga en la incubadora mencionada, el tiempo se agotaba y el grupo decidió una solución de reserva: calcular la cantidad de hielo seco, CO₂ en estado sólido, que podría sustituir el nivel de CO₂ controlado manualmente suministrado a través de la ventilación utilizando la ley de los gases ideales y almacenar los especímenes en una nueva incubadora sin ventilación, la *Votsch VCL 4003*.

Los nuevos parámetros para almacenar el espécimen de hormigón son: 14 días, aproximadamente un 5% de CO₂, un 20% de humedad y una temperatura de 20°C.

Cálculo de la cantidad de CO₂ equivalente al 5% en la nueva incubadora sin respiradero de suministro de gas CO₂ utilizando la ley de los gases ideales:

$$pV = nRT$$

Dónde:

p- presión, 101 kPa

V - Volumen, litro/m³

n- cantidad de sustancia, mol

R- constante del gas, R=0,082058

(L*atm)/(K*mol) T- temperatura, K

Una vez transcurridos los 14 días de carbonatación, se retiraron las muestras del equipo. Después de partir los cubos, se sometieron a un indicador de pH, la fenolftaleína. El indicador de pH consistió en 1% de fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄), en agua. A continuación, se roció el indicador sobre la superficie dividida de la muestra, generando una zona de color púrpura brillante para trazar una línea entre la GPC carbonatada y la no carbonatada. A continuación, el grupo midió la profundidad con el siguiente método (Atiş, 2003):

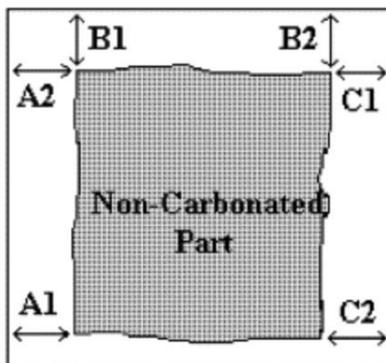


Figura 30: Principio de medición de la carbonatación acelerada, (Atiş, 2003).

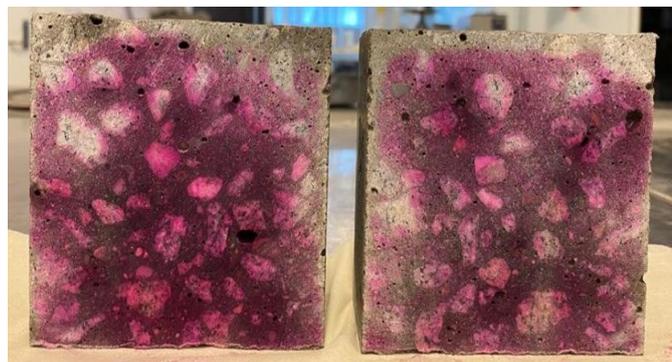


Figura 29: La superficie carbonatada

La profundidad de carbonatación D se calcula mediante:

$$D = \frac{A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2}{6}$$

Dónde:

D- la media de las 6 zonas medidas.

Existen muy pocas pruebas estandarizadas que traten sobre las pruebas de carbonatación acelerada y cómo deben documentarse los resultados. Por lo tanto, el grupo opta por comparar los resultados de su propio ensayo realizado con los resultados de ensayos documentados en (Atiş, 2003), centrándose en CEM-II/A- S 42.5N debido a sus similitudes con la receta de geopolímero desarrollada por ellos mismos (Atiş, 2003).

5 Resultados

Al revisar las propiedades de GP5.2, el grupo se centró principalmente en el lote endurecido en horno, debido a la diferencia significativa en las propiedades endurecidas basadas en el estudio de la literatura.

Los resultados se analizan en las siguientes subsecciones.

5.1 Geopolímero

El grupo ha desarrollado en total 11 recetas, aunque, fue una receta la que se utilizó para el resto de la investigación, la Tabla 9. Esta receta se ha probado en diferentes aspectos, tanto en estado fresco como curado. La durabilidad también se ha probado con ensayos de cloruro y carbonatación. La tabla siguiente, Tabla 15, muestra los resultados de la receta elegida por el grupo. El GP5.2 se fabricó en dos lotes, 22.03.23.

Resultados GP5.2 (curado en horno, 80°C, 20 horas)		
Propiedades frescas		
Procedimiento de ensayo	Valor	Apéndice/número de tabla
Relación L/GB	0,55	
Desplome	260mm	
Flujo	555mm	
Temperatura	34,3°C	
TAM		<i>Apéndice 20-24</i>

Vicat	Tiempo de ajuste inicial: 2h Tiempo de ajuste final: 3h	<i>Anexo 16</i>
Contenido en aire	2,9%	
Tamaño de los áridos	0-8 mm y 8-16 mm	<i>Teoría capítulo 2.3.2 tamaño de los agregados</i>
Contenido de agua	Arena = 0,25%. Grava = 0%	<i>Anexo 29</i>
Granulometría de los áridos	<p>Fracción de grava:</p> <p><8 mm = 6%. <10mm = 18% <12,5mm = 26% <16 mm = 33 <20 mm = 16%. <25mm = 0% <25mm = 0%</p> <p>Fracción de arena:</p> <p><0,125 mm = 5%. <0,25mm = 12%. <0,5mm = 25% <1 mm = 23%. <2mm = 15% <4 mm = 8%. <8 mm = 8%. >8 mm = 3%.</p>	<i>Las curvas de tamizado se presentan en: Apéndice 28 para la grava Apéndice 27 para la arena</i>

Cuadro 15: Resultados GP5.2

Al investigar las propiedades en fresco del hormigón geopolímero, el grupo utilizó métodos de ensayo normalizados basados en los empleados para el hormigón tradicional.

Este enfoque puede dar lugar a discrepancias desconocidas, ya que por el momento no existen métodos normalizados para ensayar el hormigón geopolímero. Sin embargo, se supone que las posibles discrepancias no son significativas.

Examinando únicamente la relación de masas del GP5.2, sus propiedades corresponden a las de un hormigón clasificado como B30, M60 (Maage, 2015, p. 156). La resistencia característica de este hormigón es de 30 MPa, que es significativamente inferior a la resistencia alcanzada por el GP5.2.

Las propiedades de trabajabilidad son cruciales cuando se investigan las propiedades en fresco del hormigón, incluyendo su capacidad para fluir y llenar encofrados y moldes. En las pruebas de GP5.2, el resultado de la prueba de asentamiento es S5, como se muestra en la Tabla 4, y los resultados de la prueba de fluidez en SF1, como se muestra en la Tabla 5.

Estos resultados indican que la GP5.2 consigue buenas propiedades de trabajabilidad.

Como se desprende de los resultados de la prueba Vicat en el Apéndice 16, el tiempo de fraguado inicial del GP5.2 es de 2 horas, y el tiempo de fraguado final es de 3 horas. Esto se debe a la alta temperatura de GP5.2 durante el colado. Cuando se cura el GP5.2 en un horno, hay una diferencia significativa en el desarrollo de la alta resistencia temprana en comparación con el GP5.2 curado en ambiente ambiente.

Al evaluar los resultados de la calorimetría isotérmica, el grupo examina la relación entre la tasa (P) y la extensión (Q) del proceso. Durante la primera ronda de pruebas TAM, el grupo seleccionó la GP1.2 basándose en el mejor resultado con el valor Q más alto y un valor P simultáneamente alto pero retrasado, tal y como se indica en la prueba calorimétrica TAM 4.2.3, que se muestra en el Apéndice 5. A través de una receta modificada basada en la GP1.2, para lograr una mayor resistencia temprana, el grupo se conformó con la receta GP5.2 - con una relación L/GB más baja e incluyó SP, que satisface las propiedades deseadas, Apéndice 8.

En el hormigón normal, el contenido de aire sin material L suele rondar el 2 %. Sin embargo, es práctica común aumentar el contenido de aire a $5 \pm 1,5\%$ para proteger el hormigón de la degradación debida a la exposición a las heladas (Maage, 2015, p. 111). Basándose en esto, el grupo llegó a la conclusión de que GP5.2 con un contenido de aire del 2,4% satisface el contenido de aire típico, pero los agentes de arrastre de aire pueden ser necesarios para aumentar la resistencia a las heladas del hormigón.

A la hora de desarrollar geopolímeros, las propiedades de endurecimiento también son un factor importante que afecta a sus aplicaciones, y los resultados de los ensayos sobre estas propiedades se analizarán en la siguiente sección.

Propiedades endurecidas, (Curado en horno 80°C, 20hrs)		
Especificación del cubo	Densidad seca	Valor
1 día, cubo 1 23.03.23	$2365,3 \frac{kg}{m^3}$	$81,4 \frac{N}{mm^2}$
1 día, cubo 2 23.03.23	$2393,1 \frac{kg}{m^3}$	$84,5 \frac{N}{mm^2}$
7 días, cubo 1 29.03.23	$2371,0 \frac{kg}{m^3}$	$91,3 \frac{N}{mm^2}$
7 días, cubo 2 29.03.23	$2388,2 \frac{kg}{m^3}$	$88,3 \frac{N}{mm^2}$
28 días, cubo 1 19.04.23	$2325,6 \frac{kg}{m^3}$	$90,2 \frac{N}{mm^2}$
28 días, cubo 2 19.04.23	$2382,4 \frac{kg}{m^3}$	$90,3 \frac{N}{mm^2}$
Prueba rápida de migración de cloruros	D_{nssm} , coeficiente de migración en estado no estacionario	Apéndice número
Cilindro 1, 100 mm de diámetro, 50,6 mm de altura	$15,39 * 10^{-12} \frac{m^2}{s}$	30

Prueba rápida de carbonatación	Densidad seca	Profundidad de carbonatación	Apéndice número
28 días, cubo 1 (CO ₂)	$2375,3 \frac{kg}{m^3}$	2.946mm	31
28 días, cubo 2 (CO ₂)	$2376,5 \frac{kg}{m^3}$	4.833mm	31

Tabla 16: Propiedades endurecidas

Como se muestra en la Figura 31 y en la Tabla 16, la resistencia temprana del GP5.2, cuando se cura en horno, es relativamente alta, pero el desarrollo de la resistencia está muy estancado. Como se observa en el Apéndice 26, la resistencia del hormigón GP5.2 después de 1 día de curado en ambiente ambiente era la más baja,

12,9 MPa, mientras que el hormigón GP5.2 curado en horno alcanzó el valor más bajo, 81,4 MPa. Esto se debe a que la velocidad de hidratación depende en gran medida del nivel de temperatura, 2.3.3 Mezclado y curado del hormigón, y al cambio en la distribución granulométrica del AF a temperaturas elevadas, 2.2.2 Geopolímero como ligante.

El índice de endurecimiento comparado de GP5.2 comparado con CEM - II/A-S 42.5R (Cemmac, s.f.):

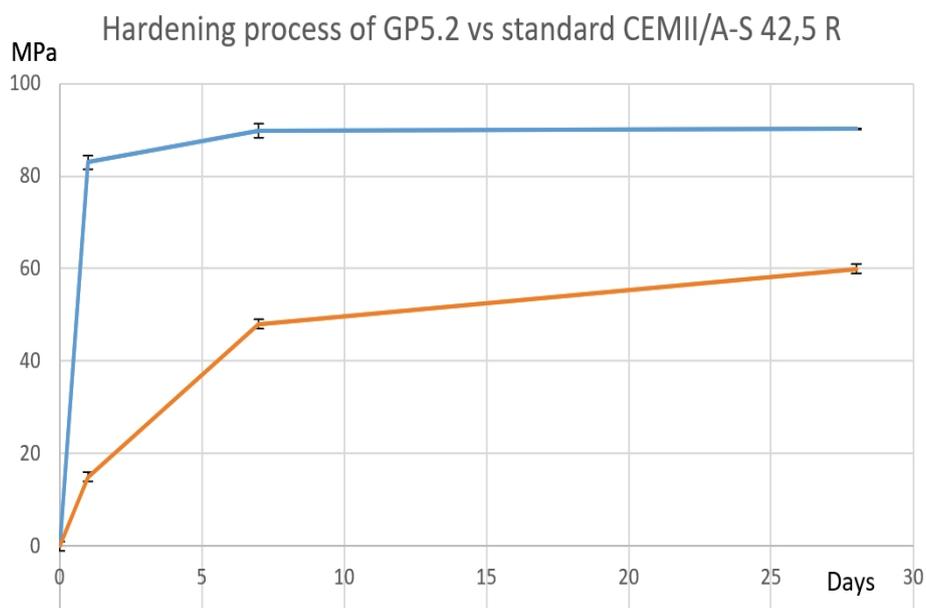


Figura 31: Proceso de endurecimiento de GP5.2 y CEMII/A-S 42.5 R

La capacidad de GP5.2 para resistir la penetración de cloruros se muestra como un valor D_{nssm} , calculado en $15,39 * 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$, Apéndice 30, y su profundidad media de penetración de cloruros de x_d de 12,4

mm. Este resultado se considera "bueno", lo que indica que el GP5.2 puede ser un hormigón adecuado.

para clases de exposición exigentes, Tabla 14. Esto es muy deseable ya que los "Modellageret", a los que estaba destinada la pared del módulo mencionada en, 5.2 - están expuestos a cloruros aéreos procedentes del agua de mar en Glomma.

Durante la prueba de profundidad de carbonatación en GP5.2, se midieron las profundidades de carbonatación en 2 especímenes. Una de las probetas alcanzó una profundidad calculada (D) de 2,95 mm, mientras que la otra alcanzó una profundidad de 4,83 mm (Apéndice 31 y Figura 29). Comparando estos resultados de, Tabla 17, a continuación, el grupo puede concluir que los peores resultados de GP5.2 para la resistencia a la carbonatación es mejor que los diseños de mezcla M0-M4 (Atiş, 2003), RH=65%, 20°C, basado en el hecho de que la prueba se llevó a cabo en condiciones ideales. También se realizó una comparación con el mismo diseño de mezcla, pero con HR=100%. En este caso, GP5.2 obtiene mejores resultados que M0-M3 en su peor resultado, pero sólo peores que M4 con su mejor resultado. Esto sugiere que una mayor HR da como resultado una mejor resistencia a la penetración de la carbonatación.

Table 5. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 100% RH with 20 °C

Mix Name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.10	7.40	4.50	3.30
M1	13.30	10.90	6.50	4.60
M2	13.80	11.70	7.30	5.00
M3	8.70	8.40	3.20	1.80
M4	9.60	7.50	2.10	1.60

Table 4. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 65% RH with 20 °C

Mix name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.60	8.50	6.50	5.00
M1	14.10	12.80	10.40	8.40
M2	14.90	13.40	11.30	8.90
M3	10.30	9.80	6.30	4.50
M4	9.80	9.30	5.70	3.80

Tabla 17: Profundidad de carbonatación acelerada (mm) del hormigón comparable (Atiş, 2003).

Se observó que el hormigón geopolímero tenía un fuerte color verde al desmoldar las muestras curadas en el ambiente. El hormigón parecía ser algo más oscuro que el hormigón tradicional algunos días después del desmoldeo, y había una diferencia significativa en la facilidad con la que el hormigón se desprendía de los moldes de plástico y de acero. De acuerdo con la observación de las figuras 32 y 33, una cantidad sustancial de hormigón permaneció firmemente adherida al molde de acero. Esto puede indicar que las propiedades de adherencia del GPC al acero se ven afectadas positivamente.



Figura 32: Foto de un moldeado de acero estándar, que muestra cómo la GPC se adhiere al acero.



Figura 33: Fotografía del moldeado de plástico utilizado para los cilindros de ensayo de migración de cloruros.



receta

Figura 34: Modo de fallo de GP5.2

Figura 35: Foto después del desmoldeo GP5.2

5.2 Uso potencial del hormigón geopolímero, revisión BIM

El objetivo de este capítulo es analizar los posibles usos de la GPC que el grupo ha identificado.

La tabla 16 presenta el resultado de la resistencia a la compresión del GP5.2 curado en horno, 1 día después de la mezcla, que indicó 81,4 MPa y 84,5 MPa. Al examinar el proceso de fraguado del GP5.2 del Apéndice 16, que describe el tiempo de fraguado inicial y final, se puede concluir que el hormigón fragua relativamente rápido. Utilizando estos dos parámetros, el grupo ha considerado que la receta geopolimérica podría ser adecuada para producir elementos prefabricados.

En este contexto, el grupo tiene una propuesta de una posible pared exterior no estructural destinada al "Modellageret" de FMV-Vest. La propuesta del grupo es que una pared reforzada de módulo desmontable pueda

debido al incierto futuro del edificio después de los próximos 10 años, provocado por un nuevo plan regulador. El concepto en que se basa el muro modular es que, una vez cumplida su función original, puede reutilizarse para un

propósito completamente diferente o

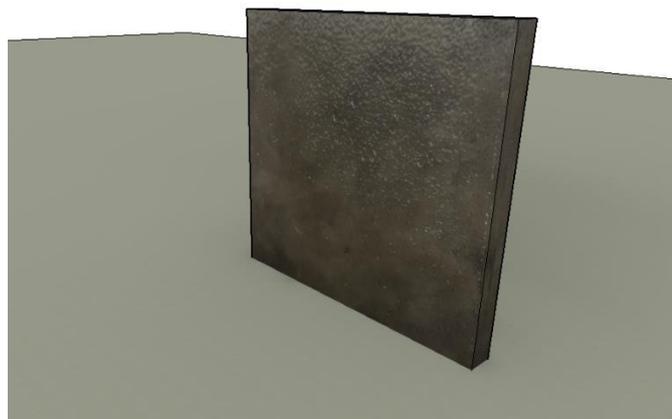
como una pared nueva en un edificio nuevo

- reducir las emisiones de CO₂ en relación con la rehabilitación del "Modellageret".

Tras considerar la finalidad original del muro modular, el grupo ha debatido las distintas posibilidades de reutilización del muro. Inicialmente, el grupo ha evaluado varias posibilidades en las que los arquitectos paisajistas podrían reutilizar el muro para parterres,



Figura 36: "Modellageret" hoy



funciones de separación en el paisaje
u otros usos.
detalle características. The idea is that the

Figura 37: Imagen de impresión realista de la pared del módulo

Los módulos no deben ser demolidos, sino utilizados en su forma original o adaptados. El objetivo principal de la reutilización es que tenga un aspecto estéticamente agradable, donde las propiedades mecánicas son menos relevantes.

Mediante la investigación y el desarrollo recomendados del muro modular, el grupo ve oportunidades para tales elementos reutilizables. Esto significaría que la vida útil del muro debería aumentar con respecto al requisito actual de 50 años para los elementos prefabricados (Arkin, 2023).

Para lograr este objetivo, hay que centrarse en la durabilidad. Como se menciona en el apartado teórico 2.5 Durabilidad y armadura, el espesor del recubrimiento es crucial para la corrosión de la armadura, que es, una vez más, el mecanismo de daño más común en las estructuras de hormigón.

Por lo tanto, el recubrimiento de hormigón y la armadura deben calcularse y justificarse en función de la finalidad prevista del muro modular.

Tras evaluar el estado del muro, puede reutilizarse en otro lugar donde las exigencias sean iguales o menores. Como el muro del módulo en este caso es un muro exterior no portante que estará expuesto a cloruros en suspensión y situado cerca de la costa, el grupo supone que el recubrimiento de hormigón de la construcción podría dimensionarse según la clase de exposición XS1. Según *la norma NS-EN 1992-1-1*, esto implica un recubrimiento de 50 mm.

Dado que el muro no es portante, se recomienda una armadura mínima, como la descrita en *la norma NS-EN 1992-1-1*, para minimizar la fisuración y evitar el fallo por fragilidad, 2.5.2 Armadura mínima. Debido a la falta de normas en hormigón geopolímero, el

cálculo de la armadura y el recubrimiento de

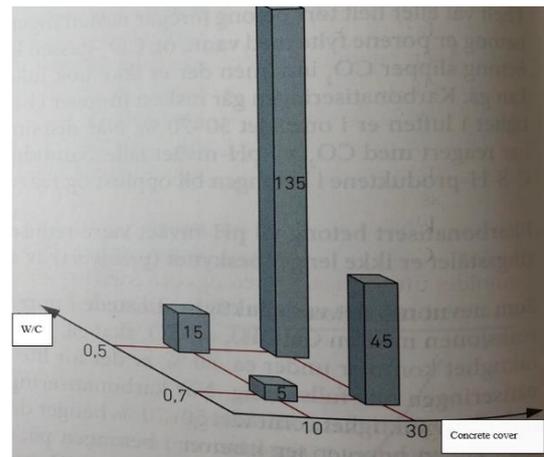
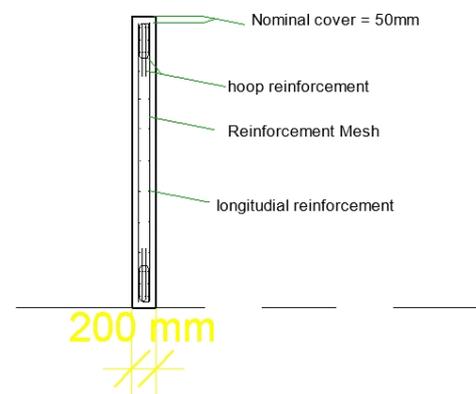


Figura 38: Relación entre la cubierta de hormigón y el W/C (Maage, 2015, p. 220)



hormigón es difícil y se recomienda para

más

Figura 39: Sección transversal de la pared del módulo

trabajo. Las dimensiones (longitud x altura x grosor) son algo que debe especificarse en un pedido relativo a la finalidad principal del muro. Nuestra propuesta para la pared del módulo que

se utilizará en "Modellageret", es un espesor mínimo de 200 mm debido a la cubierta de hormigón. La longitud y la altura deben especificarse *después de* las mediciones arquitectónicas de "Modellageret", y antes de iniciar la rehabilitación. Véase en la figura 39 una propuesta de sección transversal del muro modular.

La figura 40 es un dibujo exclusivamente de *propuesta* para el muro reforzado del módulo desmontable. Esta colocación del refuerzo se basa en una imagen de un muro prefabricado fabricado por Heidelberg Materials Prefab Norge, Apéndice 35. La figura 40 muestra la propuesta de diseño de la colocación del refuerzo, pero la colocación debe diseñarse en función de la finalidad prevista del muro, del anclaje y de las fuerzas que se ejercerán sobre el muro.

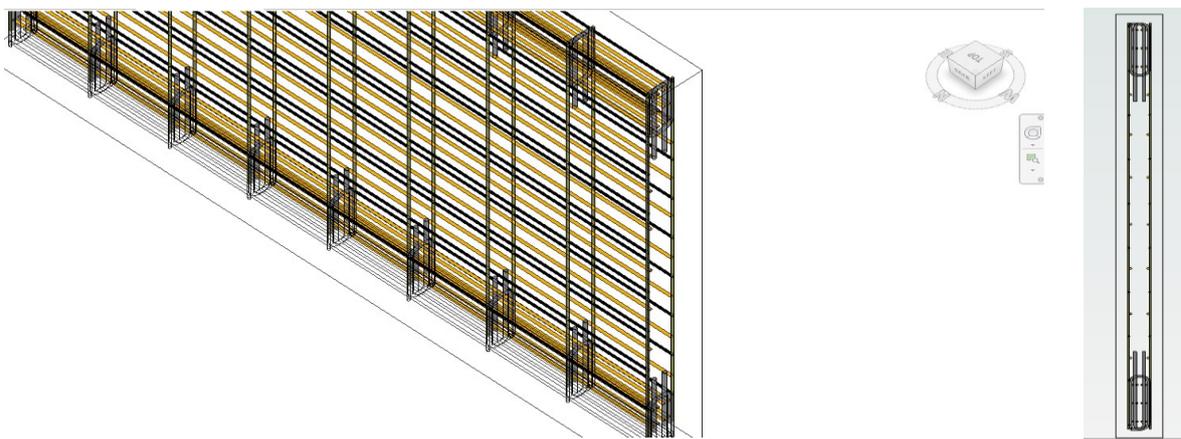


Figura 40: Plano conceptual del refuerzo

Durante el diseño de un elemento de este tipo, hay que tener en cuenta el anclaje y su diseño estructural, las dimensiones, la producción, el transporte, la instalación, la física del edificio como el aislamiento, etc. El grupo ha considerado que la pared del módulo podría anclarse con una solución atornillada, pero se trata de una propuesta para seguir trabajando. Los factores mencionados anteriormente deben tenerse en cuenta a la hora de dimensionar una pared prefabricada, por lo que esto es sólo un *concepto*, y los puntos anteriores se recomiendan para un mayor desarrollo e investigación. Por último, se ha modificado un archivo IFC existente, la figura 41, para mostrar el concepto de muro modular integrado en "Modellageret".

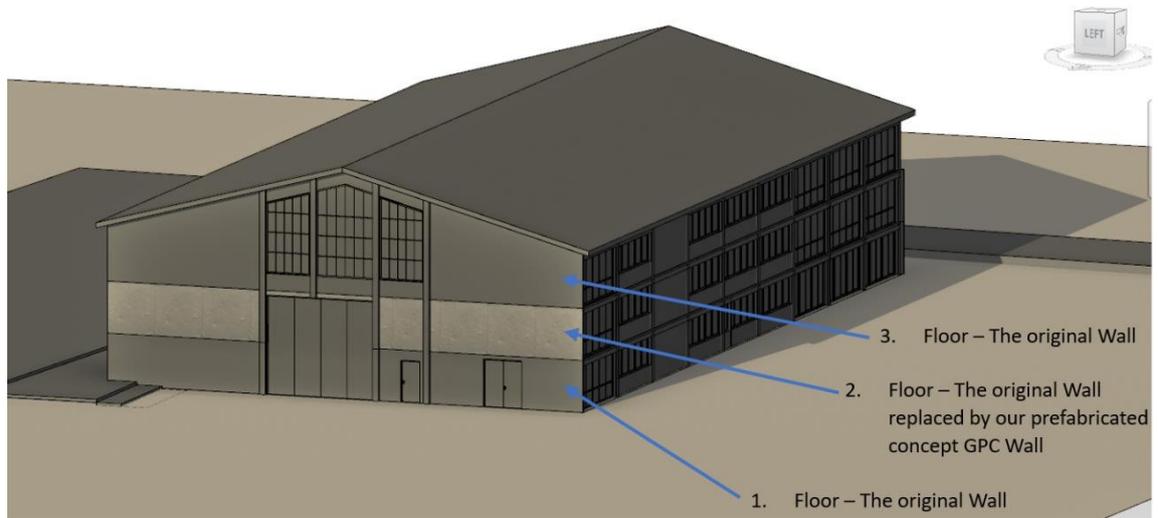


Figura 41: "Modellageret" con una pared sustituida por la pared del módulo GPC

5.3 Estudio ACV

Debido al deseo del grupo de reducir las emisiones de CO₂ de la industria de la construcción, el grupo llevó a cabo un estudio de ACV de un hormigón geopolímero de desarrollo propio y lo comparó con un tipo de hormigón con una proporción de masa similar. La tarea consistía en realizar un estudio de ACV sobre los procesos y datos incluidos en A1 y A3:

A1: Extracción de materias

primas A3: Producto

Esto implica esencialmente todo el proceso de producción de un producto, y es precisamente aquí donde el grupo quería reducir el impacto ambiental. No se tuvo en cuenta el transporte de la fase A2, ya que la ubicación de la producción de materias primas varía mucho. El transporte es un impacto medioambiental importante, lo que daría una falsa impresión tanto de la GP5.2 como de la CEM-II basada en la extracción de materias primas y la producción (Statistisk sentralbyrå, 2019).

El grupo decidió comparar GP5.2 con una mezcla de hormigón tradicional: CEM-II/A-S 42.5N, basándose en su relación másica relativamente similar y en el contenido de GGBFS. La Tabla 18 describe la combinación cemento-escoria, y la Tabla 19 representa la receta con la que comparamos:

TABLE 4: Standard composition of the tested cements according to EN 197-1:2000, m%.

Cement types	Constituents in standard composition of the tested cements, m%			
	Clinkers	Main GGBS	Fly ash	Minor Gypsum
CEM I 42,5 N	95–100	0	0	5
CEM II/A-S 42,5 N	85–94	15 (6–20)	0	5
CEM II/B-S 42,5 R	65–79	20 (21–35)	0	5
CEM III/A 32,5 N	35–64	60 (36–65)	0	5
CEM III/B 32,5 N-S	20–34	75 (66–80)	0	5
CEM V/A (S-V) 32,5 N	40–64	30 (18–30)	30 (18–30)	5

Tabla 18: Relación cemento-escoria de la receta comparada (Kopecskó & Balázs, 2017)

Mixture	w/c = 0.35		w/c = 0.45		w/c = 0.55	
	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)
Cement	440	440	440	440	440	440
water (w/c = 0.35)	154	154	198	198	242	242
River sand 0-1 mm (25 m%)	451	451	425	424	408	396
River sand 0-4 mm (20 m%)	361	361	340	339	327	317
River gravel 4-8 mm (55 m%)	993	993	934	932	898	871
Superplasticizer (1.15 m%)	5.06	5.06	1.76	1.76	0	0
AE (0.35 m%)	—	1.54	—	1.54	—	1.54
Sum	2404.06	2405.60	2338.76	2336.30	2315.00	2267.54

Tabla 19: Receta utilizada para el estudio de ACV (Kopecskó y Balázs, 2017)

Este estudio de ACV es un enfoque simplificado de la receta GP5.2 que el grupo ha desarrollado, Tabla 9, y la base de datos de SimaPro se ha utilizado como referencia en el análisis. Los procesos que se excluyen de la base de datos de SimaPro se seleccionan tras revisar las EPD y la información obtenida en la web. Las propiedades de consumo de energía utilizadas se pueden encontrar en la siguiente tabla.

Materiales	Energía utilizada en la producción	Fuentes
CEM II/A-S 42,5 N con 15% de escoria granulada de alto horno molida	0,85 kWh para el cemento y 0,00705 kWh de escoria para un total de 1 kg de mezcla CEM II/A-S	(Cyr & Patapy, 2016, p. 5) (El Sistema Internacional EPD, 2019, p. 10)
GGBS	0,047 kWh/kg	(El Sistema Internacional EPD, 2019, p. 10)
Silicato de sodio sólido	1,5 kWh/kg	(Ramagiri, Chintha, Bandlamudi, Maeijer, & Kar, 2021)
Hidróxido de potasio	4,81 kWh/kg	(Jiang, et al., 2021)

Sika Viscocrete	4,54 kWh/kg	(Federación Europea de Asociaciones de Aditivos del Hormigón , 2021)
FA	0 kWh/kg	Residuos
Agua	0 kWh/kg	
Agregado 0-8	0,00226 kWh/kg y 0,0836 MJ/kg (Diesel)	(Statens vegvesen, 2009)
Agregado 0-16	0,00226 kWh/kg y 0,0836 MJ/kg (gasóleo)	(Statens vegvesen, 2009)
Electricidad procedente de la mezcla	62,4 kWh/m ³	Información de Heidelberg Materials
Electricidad de la cámara de calor (80°C)	15,55 kWh/m ³	Cámara de calor, Escuela universitaria de Østfold
Energía del gasóleo al mezclarse	152,3 MJ/kg	Información de Heidelberg Materials

Tabla 20: Valores clave utilizados en el estudio de ACV

CEM-II /A-S 42,5N Hormigón:

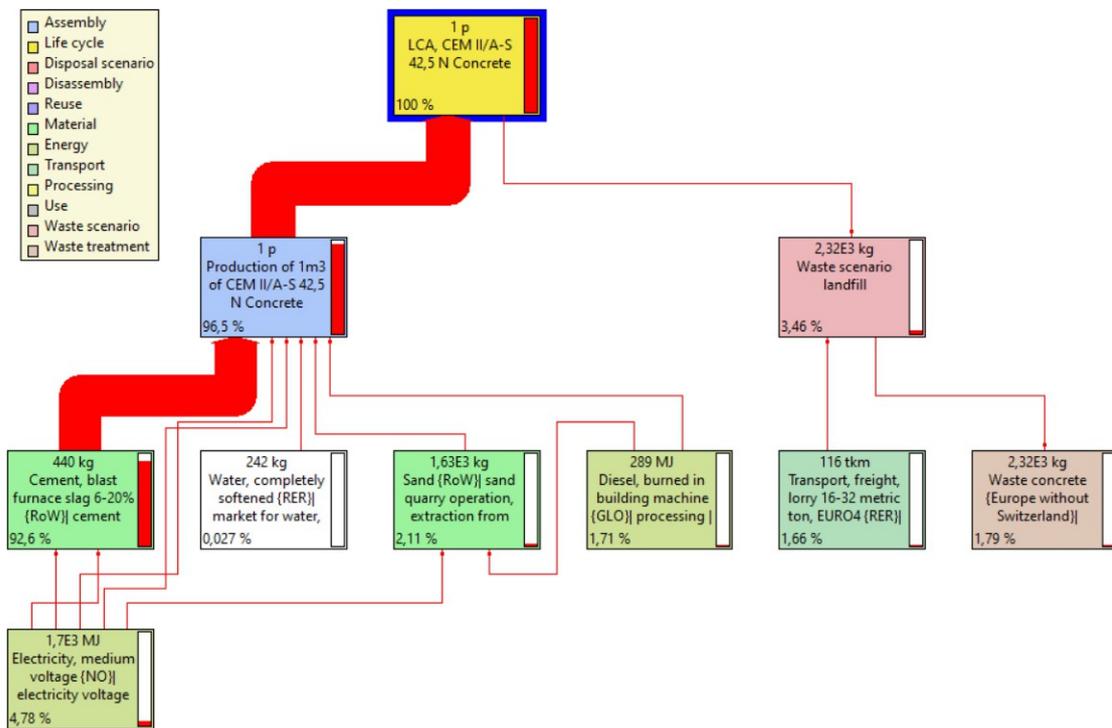


Figura 42: CEM-II /A-S 42.5N Red del ciclo de vida del hormigón

Como muestra la cadena de ACV de la figura 42, la propia producción de OPC constituye la mayor parte de las emisiones de CO₂ generadas durante la producción de hormigón tradicional: un enorme 92,6% del impacto climático se contabiliza en esta categoría. El grupo preveía que el impacto medioambiental del OPC sería elevado, y es precisamente esta categoría la que se desea reducir. Como se demuestra en el Apéndice 33, la producción de 1 m³ de OPC representa por sí sola 386 kg equivalentes de CO₂, procedentes exclusivamente de GWP100 fósil.

GP5.2 - hormigón geopolímero:

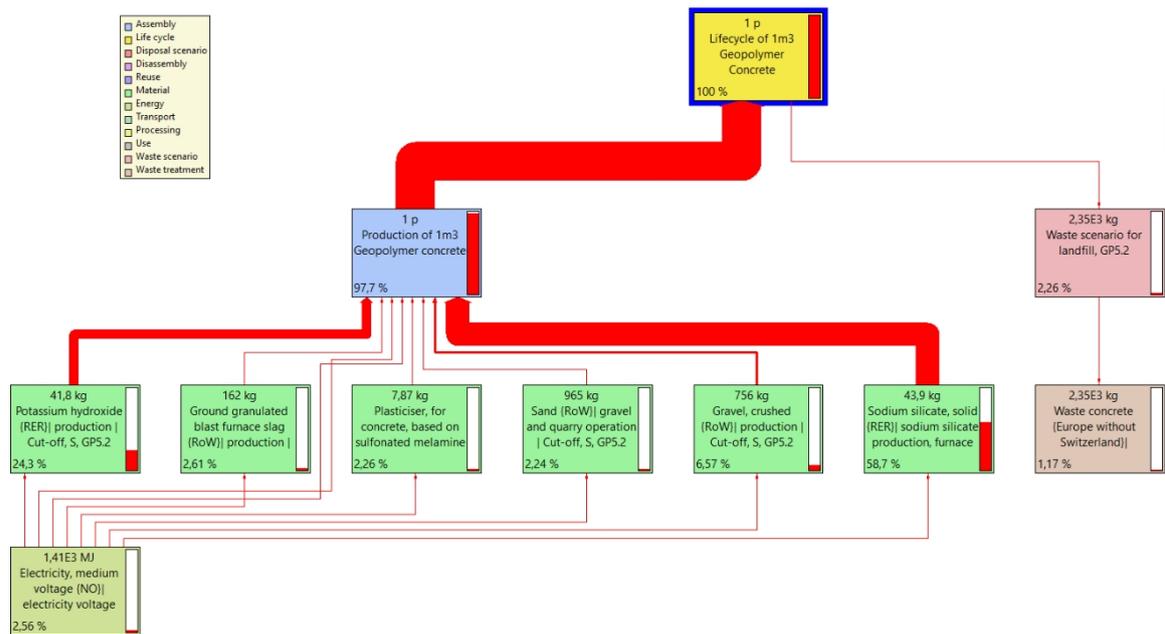


Figura 43: Red del ciclo de vida GP5.2

Al realizar un ACV sobre el GP5.2 de desarrollo propio, se descubrió que la producción de los aglutinantes, silicato de sodio e hidróxido de potasio, representa el 72,9% del impacto climático de 1 m³ de geopolímero producido. Esto se debe a la gran demanda de energía necesaria para fabricar estos componentes químicos.

Comparación

A la hora de comparar directamente la producción de GP5.2 y CEM-II/A-S 42,5N, el grupo se centra en dos categorías, haciendo especial hincapié en las emisiones de CO₂.

Equivalentes de CO₂ y consumo de energía en MJ.

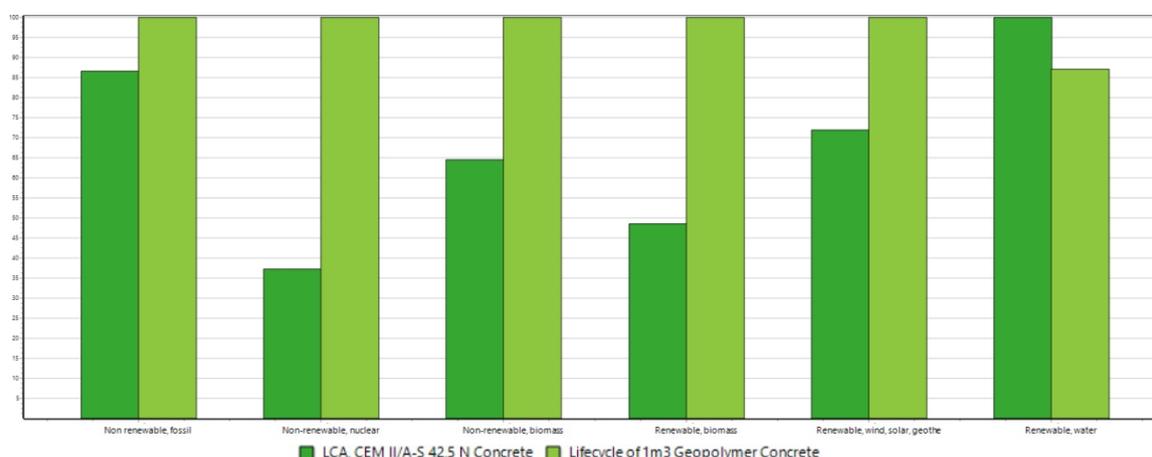


Figura 44: Consumo de energía

Como se muestra claramente en las figuras 44 y 45, existe un desequilibrio en la comparación de los equivalentes de CO₂ y el consumo de energía en MJ en la producción de 1 m³ de GP5.2 y CEM- II/A-S 42.5N.

El estudio de ACV revela que la producción de GP5.2 es considerablemente más intensiva en energía, consumiendo 5349,401 MJ, en comparación con la producción de CEM-II /A-S 42.5N, que utiliza 4742,359 MJ, con una diferencia que asciende a un 12,8% más que CEM-II/A-S 42.5N según los valores calculados en el Apéndice 32.

Sin embargo, existe una diferencia significativa en la cantidad de CO₂ equivalente entre la producción de GP5.2 y CEM-II/A-S 42.5N.

Como se muestra en la Figura 45, se calcula que el nivel total de GWP100 de GP5.2 es aproximadamente el 56% de la producción de CEM-II/A-S 42.5N. Esto representa una reducción del 44%, lo que supone una diferencia significativa si se aumenta la cantidad de producción. La cantidad total de equivalentes de CO₂ en la producción de CEM-II/A-S 42,5N es de 386,811 kg/m³ en comparación con la cantidad total de GP5.2, considerablemente inferior, de 216,890 kg/m³.

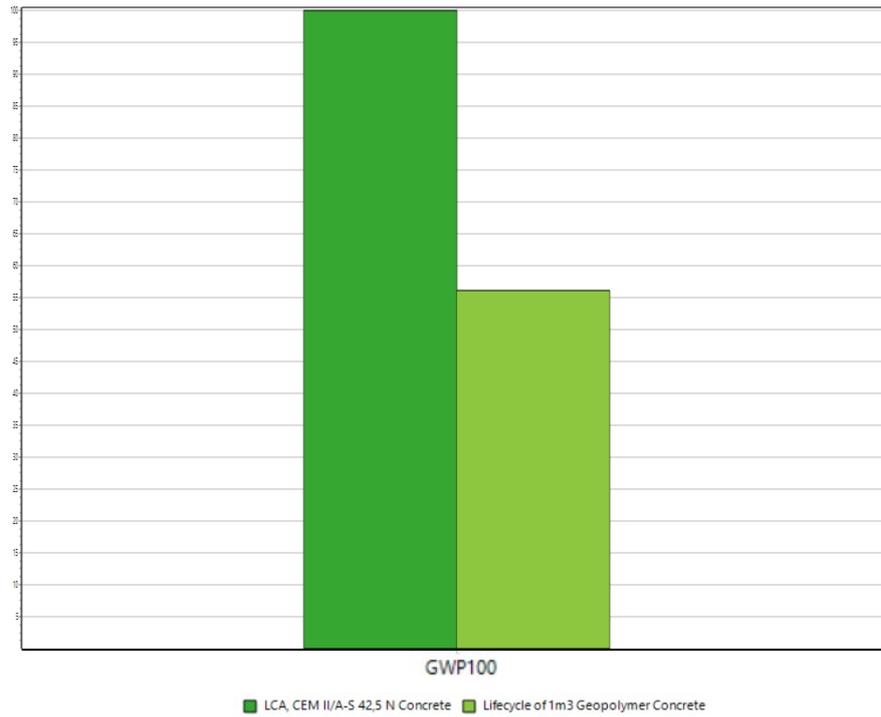


Figura 45: Emisiones de CO₂ del ACV

Al producir estos tipos de hormigón, se ha logrado el objetivo de reducir el nivel de CO₂ con el GP5.2. Sin embargo, hay un consumo de energía muy elevado en la producción de los activadores alcalinos de composición química que sustituyen al agua en el hormigón tradicional.

5.4 Fuentes de error y debate

Métodos de ensayo y resultados

- El objetivo de la tesis es comparar el hormigón tradicional y la GPC, y los métodos se basan en las normas tradicionales, y no son específicos de la GPC. Por tanto, se basa en el hecho de que las normas disponibles sobre GPC son escasas.
- Debido al cambio del armario de carbonatación y a las incertidumbres relativas a la concentración de CO₂ calculada sobre la base de la ley de los gases ideales, el grupo no puede legitimar la tasa de carbonatación a partir de esta prueba. El grupo reconoce que la ley de los gases ideales representa un modelo idealizado y puede no reflejar con exactitud el comportamiento de los gases en el mundo real. No obstante, es razonable deducir que la prueba de carbonatación rápida arroja resultados auténticos, dado que la cámara está sellada herméticamente y que la ecuación de la ley de los gases ideales se ha calculado con precisión.
- La comparación de propiedades entre el GPC y el hormigón tradicional se basa únicamente en la literatura y las normas. Ello exige pruebas exhaustivas e investigación empírica para desarrollar atributos característicos. A pesar de la falta de tiempo y de la amplitud de los ensayos realizados en esta tesis, los resultados mencionados podrían ser una indicación.
- Los factores humanos son inevitables y siempre deben tenerse en cuenta.

Uso potencial del hormigón geopolímero, revisión BIM

- El refuerzo y el anclaje de la pared del módulo no se dimensionaron ni diseñaron, ya que las normas disponibles sobre GPC son escasas. Debido al hecho de que esta tesis se limitaba a examinar las propiedades de la GPC, se consideró prudente recomendar un planteamiento de problema aparte dedicado al dimensionamiento.

Estudio de ACV

- El grupo ha basado el estudio LCA en la limitada biblioteca de software proporcionada por SimaPro. Esto puede dar lugar a fluctuaciones positivas o negativas en los resultados.
- El consumo de energía es otro aspecto que varía considerablemente y que se basa en información obtenida a través de Internet. A lo largo del estudio de ACV, el grupo observó que

las soluciones alcalinas tenían un consumo de energía significativamente alto debido a la electrólisis. Basándonos en la teoría recopilada sobre la GPC, era sorprendente que el consumo de energía se calificara a esos niveles.

6 Conclusión

La tesis partía del siguiente planteamiento del problema:

El objetivo de esta tesis es investigar la durabilidad y las propiedades de un hormigón geopolímero de desarrollo propio, así como comparar las emisiones de CO₂ de la fase de producción frente al hormigón tradicional, con el fin de promover la concienciación sobre las emisiones en la industria de la construcción y la ingeniería utilizando BIM y LCA.

En conclusión, el GPC de desarrollo propio mostró buenas propiedades en estado fresco y endurecido a través de los procedimientos de ensayo. Los resultados contribuyen a concluir que las propiedades de durabilidad son al menos tan buenas como las del hormigón tradicional, incluso superándolas en algunos atributos, dada la temperatura óptima de curado. Mediante las pruebas de carbonatación rápida y migración de cloruros, y con el recubrimiento correcto de las armaduras, el GPC superaría la vida útil dimensionada de 50 años. Mediante las pruebas de atributos y la revisión BIM, el grupo llegó además a la conclusión de que el hormigón de desarrollo propio es apto para ser utilizado como muro modular reutilizable y desmontable.

El estudio de ACV justificó el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ en la fase de producción del GPC, en comparación con el hormigón tradicional, en casi un cincuenta por ciento, lo que supone un mayor consumo de energía. Mediante el uso de BIM y la incorporación de los resultados del ACV, el propietario del proyecto puede diferenciar entre varios materiales de construcción, ayudándole a decidir cuál - en función de las emisiones. "Modellageret" es uno de esos proyectos que podrían beneficiarse de ello.

En conjunto, el GPC demuestra unas propiedades exquisitas, especialmente en lo que se refiere a las propiedades de endurecimiento, y promete superar al hormigón tradicional al tiempo que reduce significativamente las emisiones de CO₂, lo que lo convierte en una opción ideal para las construcciones orientadas al futuro.

7. Sugerencias para seguir trabajando

Durante esta tesis descubrimos varios retos e incertidumbres en relación con el desarrollo del producto. Los siguientes enunciados de problemas podrían ser interesantes de revisar para optimizar el potencial de la GPC orientada al futuro.

Hormigón geopolímero

- Es muy necesario investigar sobre la estandarización de las propiedades en GPC, ya que sería interesante desarrollar una comparación exhaustiva con el hormigón tradicional.
- Se recomienda investigar los aglutinantes disponibles debido a las incertidumbres sobre el uso de la AF de las centrales eléctricas de carbón que, se supone, cerrarán en el futuro. La transición a cenizas volcánicas, estériles de mina, cenizas de cáscara de arroz u otros aglutinantes, ¿podría tener propiedades similares o mejores que el AF?
- Al examinar los puntos extremos relativos a la resistencia a la carbonatación y al cloruro, se observó que podían estar en relación con los áridos. Por consiguiente, sería interesante probar otros tamaños de áridos diferentes. ¿Sería diferente debido al uso de SF, ya que podría disminuir la zona de transición interfacial?

Uso potencial del hormigón geopolímero, revisión BIM

- El dimensionamiento y el diseño de las construcciones de GPC en Europa, en estos momentos, es prácticamente inviable, debido a la falta de normas. Esto supone un reto para el uso de GPC en proyectos reales, ya que el grupo experimentó exactamente este problema al intentar calcular la armadura mínima, porque esto está relacionado exclusivamente con el hormigón tradicional.
- Para promover la reutilización, es esencial ampliar la vida útil de las estructuras de hormigón. Además, para lograr el objetivo de la reutilización, merece la pena explorar diversas opciones de anclaje y colocación de armaduras para los elementos prefabricados de hormigón. De ahí que se haya sugerido el anclaje atornillado como medio de hacer desmontables los elementos de hormigón, requisito previo para su completa reutilización. El diseño de estas opciones mencionadas generaría un problema de investigación de gran interés.

Estudio de ACV

- Tras el estudio de ACV, se observó que las soluciones alcalinas tenían un consumo de energía significativamente alto debido a la electrólisis. ¿Es posible sustituir las soluciones alcalinas actuales por un producto que consuma menos energía, o disminuir la relación L/GB para reducir la cantidad de soluciones alcalinas, con propiedades similares o mejores?
- Basándonos en la experiencia de la utilización del software de ACV, sería de agradecer disponer de detalles opcionales amplios y exhaustivos, que podrían mejorar aún más la credibilidad de los resultados del estudio de ACV. Para obtener estos detalles, sería interesante y aconsejable aumentar la base de datos para dar cabida a nuevos usuarios del software. Por último, se trata de potenciar el mensaje sobre la conciencia medioambiental.

8 Referencia

- Abushad, M., & Sabri, M. D. (2017, 7 de julio). Estudio comparativo de la resistencia a la compresión del hormigón con cenizas volantes. *Revista internacional de investigación en ingeniería y tecnología (IRJET)*. Obtenido de <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET- V4I7534.pdf>
- Ahmed, M., Verma, M., Rahman, I., Mallick, J., Dev, N., & Nigam, M. (2022, 7 de abril). Hormigón Geopolímero: A Material for Sustainable Development in Indian Construction Industries. *Cristales*. doi:<https://doi.org/10.3390/cryst12040514>
- Ali, K. A. (2020, 10 de septiembre). Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *sustainability*, p. 12. doi:<https://doi.org/10.3390/su12187427>
- Anre, A. (2020, 27 de junio). *¿Qué es el recubrimiento de hormigón para armaduras?* Extraído de Prodyogi: https://www.prodyogi.com/2020/06/what-is-concrete-cover-for-reinforcement.html?utm_content=cmp-true
- Arkin, D. (2023, 9 de enero). *¿Cuánto dura el hormigón? La verdad sobre el hormigón prefabricado*. Obtenido del sitio Web: <https://premierprecast.com/concrete-lifespan/#:~:text=Precast%20concrete%20has%20strict%20design%20parameters%20and%20is,the%20reasons%20for%20precast%20concrete%20to%20last%20longer%3F>
- Armentrout, D. L., & Belkowitz, J. S. (2009, enero). UNA INVESTIGACIÓN DE LA NANO SÍLICE EN EL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. Obtenido de researchgate.net/publication/264882831_An_investigation_of_nano_silica_in_the_cement_hydration_process
- Atiş, C. (2003, abril). Carbonatación acelerada y ensayo de hormigón fabricado con cenizas volantes. *Construcción y materiales de construcción*, pp. 147-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- Autodesk (sin fecha). *Modelado de información para la construcción*. Obtenido de

<https://www.autodesk.com/industry/aec/bim>

Autodesk (sin fecha). *Revit: BIM-programvare for designere, byggere og utførere.*

Obtenido de <https://www.autodesk.no/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=RVT>

Betongfokus. (2019, 27 de marzo). *Geopolymerbetong, hva er nå det?* Obtenido de <https://www.betongfokus.no/2019/03/27/geopolymerbetong/#:~:text=Geopolymere%20baserer%20seg%20p%C3%A5%20mindre%20prosesserte%20mineraler%20med,en%20del%20praktiske%20utfordringer%20med%20C3%A5%20bruke%20geopolymerbetonger.>

BNP Media. (2021, 29 de enero). Obtenido del sitio Web:

<https://browningday.com/news/lca-stages-matter-when-tracking-embodied-carbon/>

Instituto de Investigación de la Construcción. (s.f.). *Ensayos de materiales.* Obtenido de <http://www.buildingresearch.com.np/services/mt/mt1.php>

Aprendizaje de BYJU. (2023). *Escribe la ecuación química para representar la disociación iónica del hidróxido de sodio en medio acuoso.* Obtenido de <https://byjus.com/question-answer/write-the-chemical-equation-to-represent-the-ionic-dissociation-of-sodium-hydroxide-in-aqueous-medium/>

CBI Norge. (sin fecha). *Betydningen av varmekapasiteten i isolasjonsmaterialet.* Obtenido de <https://www.cbinorge.no/celluloseisolasjon/hva-er-celluloseisolasjon-/betydningen-av-varmekapasiteten-i-isolasjonsmaterialet?fbclid=IwAR2Li6NroqkGpF1Nnys0EgZLw5tfNFAyeqH2-GJColWVlfGI4hjOFymnUpM>

Cemmac. (s.f.). *CEM II/A-S 42,5 R Cemento Portland - escoria.* Obtenido del sitio Web: <http://www.cemmac.sk/dev/language/en/cement-cem-ii-a-s-425r/?fbclid=IwAR2bSFjRUtytcqnKSo38GYIKknaqJnaeknJ5HNk1D0Vy6bf6H-Q3YcADSIU>

CEN. (2012, 30 de abril). *Ensayos de las propiedades geométricas de los áridos: Determinación de la distribución granulométrica - Método de tamizado.* Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/100b983f-85a4-4a80-934c-e93c584dbdb4/en-933-1-2012>

- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, 25 de mayo). Avances en materiales geopolímeros: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (Edición en inglés)*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, junio). Avances en materiales geopolímeros: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (Edición en inglés)*, pp. 283-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cyr, M., & Patapy, C. (2016). Efectos sinérgicos de las vías de activación del granulado molido. *HAL open science*, p. 5. Obtenido de <https://hal.science/hal-01344929/document>
- Deb, P., & Sarker, P. (2016, 14 de septiembre). Effects of Ultrafine Fly Ash on Setting, Strength, and Porosity of Geopolymers Cured at Room Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 1-5.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001745)
- Dhanya, B. S., Santhanam, M., Pillai, R., & Gettu, R. (2014, enero). Comparative evaluation of various electrical methods used to assess chloride transport in concrete. pp. 7-13. Obtenido del sitio Web:
https://www.researchgate.net/publication/324361434_COMPARATIVE_EVALUATION_OF_VARIOUS_ELECTRICAL_METHODS_USED_TO_ASSESS_CHLORIDE_TRANSPORT_IN_CONCRETE
- Diagne, M., Ibrahima, D., & Gueye, O. (2021, 29 de junio). Influence of Types of Fillers on Workability, Bleeding, Compressive Strength, and Degree of Compaction of Hydraulic Concrete. *Investigación científica*. doi:10.4236/msa.2021.126019
- Duran Atiş, C. (2003, abril). Construcción y materiales de construcción. *Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash*, pp. 147-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- SUELO DE BALDOSAS EPOXI. (2021, 19 de mayo). *BS 6319-2 : Cómo comprobar la resistencia a la compresión de los pavimentos de resina*. Obtenido de <https://www.epoxytileflooring.com/2021/05/bs-6319-2-how-to-check-compressive.html>

- Federación Europea de Asociaciones de Aditivos del Hormigón . (2021). *Aditivos del hormigón Plastificantes y superplastificantes*. Obtenido de <http://www.efca.info/download/plasticisers-and-superplasticisers-epd-2015/>
- Fadhil, M. N., Haruna, S., Mohammed, B. S., & Sha'aban, I. G. (2017, 17 de noviembre). Métodos de curado del hormigón geopolímero: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. doi:<https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- FN-Sambandet. (2023, 21 de marzo). *Klimaendringer*. Obtenido de <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>
- Gagg, C. R. (2014, 10 de febrero). Cemento y hormigón como material de ingeniería: Una valoración histórica y análisis de casos prácticos. *Engineering Failure Analysis*, p. 1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- GCP. (s.f.). *Ground Granulated Blast-Furnace Slag: Its Chemistry and Use with Chemical Admixtures*. Obtenido del sitio Web: <https://ca.gcpat.com/en/solutions/products/strux-synthetic-macro-fibers/ground-granulated-blast-furnace-slag-its-chemistry>
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). *Pavimentos de aeronaves de hormigón geopolímero EFC en Brisbane West*. Obtenido de https://www.wagner.com.au/media/1512/bwwa-efc-pavements_2015.pdf
- Gregory, J., & Logan, A. (2021, 8 de enero). *Concrete*. Obtenido del portal Clima del MIT: <https://climate.mit.edu/explainers/concrete>
- Hardjito, D., & Tsen, M. (2008). Strength and Thermal Stability of Fly Ash Based Geopolymer Mortar. *The 3rd International Conference*. Obtenido del sitio Web: https://www.researchgate.net/publication/42428614_Strength_and_Thermal_Stability_of_Fly_Ash_Based_Geopolymer_Mortar
- Materiales de Heidelberg. (s.f.). *Herdeteknologi*. Obtenido del sitio Web: https://www.sement.heidelbergmaterials.no/sites/default/files/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf

- Materiales de Heidelberg. (s.f.). *Sementproduksjon og CO2*. Obtenido de <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/sementproduksjon-co2>
- Helseth, L. E. (2021, 7 de noviembre). *Monomer*. Extraído de Store Norske Leksikon: <https://snl.no/monomer>
- Jahren, P. (2012). *Betong - Mangfold og muligheter*. Trondheim: Akademika forlag.
- Jiang, H., Wang, L., Gao, B., Li, Y., Guo, Y., Zhuo, M., . . . Li, Y. (2021, 15 de octubre). The anolyte matters: Towards highly efficient electrochemical CO₂ reduction. *Chemical Engineering Journal*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129923>
- Ketana, N. S., Reddy, V. S., Rao, M. S., & Shrihari, S. (2021, 21 de octubre). Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymers concrete. *E3S - Web of Conferences*. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102>
- Kontrollrådet. (2018, 22 de marzo). *Betongens historie*. Obtenido de <https://kontrollbetong.no/aktuelt/betongens-historie/>
- Kopecskó, K., & Balázs, G. (2017, agosto). Concrete with Improved Chloride Binding and Chloride Resistivity by Blended Cements. *Avances en ciencia e ingeniería de materiales*. doi:10.1155/2017/7940247
- LCA. (s.f.). *Miljøpåvirkninger EN 15804 +A2*. Obtenido de <https://lca.no/miljopavirkninger/>
- LCA Norge. (sin fecha). *¿Qué es el ACV?* Obtenido de <https://lca.no/hva-er-lca/>
- Evaluación del ciclo de vida. (2020, 17 de julio). *Explicación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV)*. Obtenido de <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- MATEST. (s.f.). *Vicatronic, aparato vicat de fibra de carbono*. Obtenido de <https://www.matest.com/en/product/e044n-vicatronic-automatic-computerized-tropicalized-vicat-recording-apparatus>

- Mavračić, J., Mocanu, F. C., Deringer, V. L., Csányi, G., & Elliott, S. R. (2018, 15 de mayo). *Similitud entre las fases amorfa y cristalina: El caso del TiO₂*. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b01067>
- Grupo McKenna. (sin fecha). *Ventajas y desventajas del uso de BIM*. Obtenido de <https://mckenna.group/2021/02/08/advantages-disadvantages-bim/>
- Meyer, R. W. (2021). *avbinding (størkning)*. Extraído de Store Norske Leksikon: https://snl.no/avbinding_-_størkning
- Mishra, G. (s.f.). *Concrete slump test for workability: Procedure and Results*. Obtenido de <https://theconstructor.org/concrete/concrete-slump-test/1558/>
- Multiconsult. (sin fecha). *LCA og klimagassregnskap*. Obtenido de <https://www.multiconsult.no/tjenester/lca-og-klimagassregnskap/>
- Muwashee, R. S., & Al-Jameel, H. A. (2021). Evaluating the influence of silica fume on selected cement mortar properties. *Journal of Physics Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012172
- Maage, M. (2015). *Betong - Regelverk, teknologi og utførelse*. (M. Maage, Ed.) Bergen: Byggenæringens Forlag AS.
- Centro Nacional de Información Biotecnológica. (2023, 10 de febrero). *Hidróxido de Sodio*. Obtenido de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798>
- Neville, A., & Aitcin, P.-C. (1998, marzo). High performance concrete - An overview. *Materiales y Estructuras*. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02486473>
- Nitka, M., & Tejchman, J. (2020, 19 de septiembre). Comparative DEM calculations of fracture process in concrete considering real angular and artificial spherical aggregates. *Engineering Fracture Mechanics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107309>
- Grupo Nórdico BIM. (sin fecha). *Building Information Modeling: BIM i går, i dag og i morgen*. Obtenido del sitio Web: <https://www.nordicbim.com/no/alt-om-bim-bygningsinformasjonsmodellering-fra-vugge-til->

grav

- Nordtest. (1999). *NT Build 492*. Obtenido de <https://salmanco.com/wp-content/uploads/2018/10/NT-Build-492.pdf>
- Parshwanath, R. N., Nataraja, M. C., & Lakshmanan, N. (2011, noviembre). Una introducción al hormigón geopolímero. *ResearchGate*, p. 1. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/285666741_An_introduction_to_geopolymer_concrete
- Patil, S. V., Karikatti, V. B., & Chitawadagi, M. (2018, agosto). Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) based Geopolymer Concrete - Revisión. *International Journal of Advanced Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.29294/IJASE.5.1.2018.789-885>
- Pavimento Interactivo. (sin fecha). *Contenido de humedad*. Obtenido de <https://pavementinteractive.org/reference-desk/materials/aggregate/moisture-content/>
- Pemat. (s.f.). *ZK 50 HE Ficha técnica*. Obtenido de https://www.pemat.de/wp-content/uploads/2018/04/zk50he_zyklos_td_e.pdf
- Pilehvar, S., Duy Cao, V., Szczotok, A. M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., . . . Kjøniksen, A.-L. (2018, 2 de abril). Propiedades físicas y mecánicas del geopolímero de cenizas volantes y escoria. *Construction and Building Materials*, pp. 28-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.016>
- Ramagiri, K. K., Chintla, R., Bandlamudi, R. K., Maeijer, P. K., & Kar, A. (2021). Cradle-to-Gate Life Cycle and Economic Assessment of Sustainable Concrete Mixes- Alkali-Activated Concrete (AAC) and Bacterial Concrete (BC). *Infrastructures*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/7/104>
- Rodríguez, J., Ortega, L. M., & Casal, J. (1997, 31 de agosto). Capacidad portante de estructuras de hormigón con armaduras corroídas. *Construction and Building Materials*. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3)

- Singh, B. P., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015, 15 de junio). Hormigón geopolímero: Una revisión de algunos desarrollos recientes. *Construction and Building Materials*, p. 79.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Singh, M., Siddique, R., & Singh, J. (2022). Coal Fly Ash. *Sustainable Concrete made with Ashes and Dust from Different Sources*, pp. 1-29.
doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00012-7>
- SINTEF. (2010). *Tilsetningsstoffer for betong*. Obtenido de https://www.byggforsk.no/dokument/590/tilsetningsstoffer_for_betong
- Standard Norge. (2004). Eurocódigo 2 - Diseño de estructuras de hormigón - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios. *NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021*. Obtenido del sitio Web: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1365301>
- Standard Norge. (2006). Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006). *NS-ES ISO 14044:2006*. Obtenido de <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=195484>
- Standard Norge. (2013). Hormigón - Especificación, rendimiento, producción y conformidad. *NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2022*. Obtenido del sitio Web: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1447838>
- Standard Norge. (2016). Sementprøving - Del 3: Bestemmelse av størkningstid og volumbestandighet. *NS-EN 196-3:2016*. Obtenido de <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=877507>
- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 1: Prøvetaking og vanlig utstyr. *NS-EN 12350-1:2019*. Obtenido de <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=123501>

ductID=1106510

- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 5: Utbredelsesmål. *NS-EN 12350-5:2019*. Obtenido de <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106514>
- Standard Norge. (2022, 23 de diciembre). *Organisering og digitalisering av informasjon om byggverk - ISO 19650-serien*. Obtenido del sitio Web: bygg, anlegg og eiendom: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/digital-byggeprosess/iso-19650-serien/>
- Standard Norge. (2022). Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry. *ASTM C1679:22*. Obtenido del sitio Web: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1502984>
- Statens vegvesen. (2009). *Metode for beregning av energiforbruk*. Obtenido de <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/193232?show=full>
- Statistisk sentralbyrå. (2019, 28 de agosto). *Transporte står for 30 prosent av klimautslippene i Norge*. Obtenido de <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/transport-star-for-30-prosent-av-klimautslippene-i-norge>
- Taffase, W. Z., & Espinosa-Leal, L. (2023, 9 de abril). Modelos de regresión multiobjetivo para predecir la resistencia a la compresión y la resistencia al cloruro del hormigón. *Journal of Building Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106523>
- La caja de herramientas de ingeniería. (s.f.). *Heat Capacity*. Obtenido del sitio Web: https://www.engineeringtoolbox.com/heat-capacity-d_338.html?fbclid=IwAR18smygbe5Zyu-_2228KaSyA0VMjThho2u9jTtFyp5rlXaONvYgzQ2uJpQ
- El sistema internacional de EPD. (2019). *EPD de escoria de alto horno granulada molida media*. JSW. Obtenido de <https://www.environdec.com/library/epd1415>

Thue, J. V. (2019, 11 de septiembre). *korngradering*. Obtenido de Store Norske Leksikon:
<https://snl.no/korngradering>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Informe sobre la situación mundial 2021*. Obtenido del sitio Web:
https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

Vegdirektoratet. (2014, junio). Statens Vegvesen, HB-R210 - Laboratieundersøkelser. Vegdirektoratet. Obtenido del sitio Web:
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r210-laboratorieundersokelser-2016.pdf>

Verma, M., & Dev, N. (2021, febrero). Effect of ground granulated blast furnace slag and fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical properties of geopolymer concrete. *Structural Concrete*. Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/349428153_Effect_of_ground_granulated
relación entre la escoria y la ceniza de combustión y las condiciones de curado de las propiedades mecánicas del hormigón geopolímero

Wadsö, L. (2005). *Calorimetría isotérmica del cemento*. Obtenido de
https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/09IsothermalCalorimetry_000.pdf

WAGNERS. (s.f.). *EDIFICIO DEL INSTITUTO DEL CAMBIO GLOBAL (GCI)*. Obtenido de
<https://www.wagner.com.au/main/our-projects/global-change-institute-gci-edificio/>

9 Anexo

Apéndice 1: 14.02 23 - Primera receta del desarrollo de recetas; GP1.1, GP1.2, GP2.1, GP2.2, GP3.1, GP3.2, GP4.1 y GP4.2

Series 14/2/2023							
GP1.1				GP1.2			
60FA/40GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	23,6		23,6	SUM	23,6		23,6
Molarity NaOH	mol/liter		14	Molarity KOH	mol/liter		14

Series 14/2/2023							
GP2.1				GP2.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
Molarity NaOH	mol/liter		14	Molarity KOH	mol/liter		14

Series 14/2/2023							
GP3.1				GP3.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	25,3		25,3	SUM	25,3		25,3
Molarity NaOH	mol/liter		10	Molarity KOH	mol/liter		10

Series 14/2/2023							
GP4.1				GP4.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
Molarity NaOH	mol/liter		10	Molarity KOH	mol/liter		10

Apéndice 2: 16.02.23 - Masa de la receta proyectada para la prueba TAM, (No medido= N/M)

	GP1.1		GP1.2		GP2.1		GP2.2	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,864g	N/M	2,864g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,432g	N/M	1,432g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	-	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	N/M
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	-
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	N/M	-	N/M
	GP3.1		GP3.2		GP4.1		GP4.2	
Recipe(R)/ actual(A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,8644g	N/M	2,8644g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,4322g	N/M	1,4322g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	1,023g	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	-
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	-	-	-

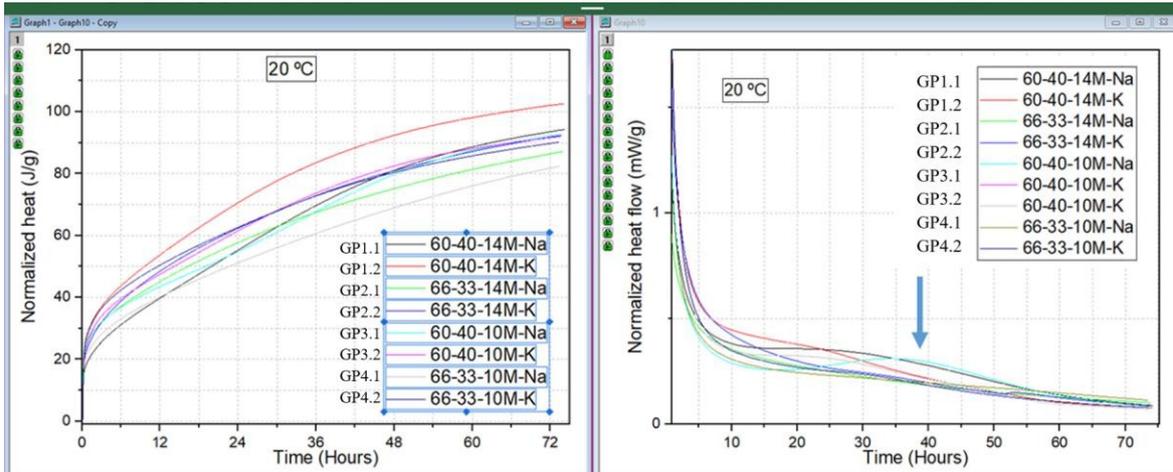
Apéndice 3: 16.02.23 - Masa total en ampollas

	GP1.1	GP1.2	GP2.1	GP2.2	GP3.1	GP3.2	GP4.1	GP4.2
Ampoule nr.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
m_{Ampoules}	6,120g	6,398g	5,990g	6,492g	6,066g	6,058g	6,410g	6,419g

Apéndice 4: 16.02.23 - Masa de referencia - agua, m_{ref} y masa medida

	m_{ref} (water)	Measured mass
GP1.1 – Ampoule B1	1,538g	1,538g
GP1.2 – Ampoule B2	1,610g	1,611g
GP2.1 – Ampoule B3	1,193g	1,190g
GP2.2 – Ampoule B4	1,270g	1,270g
GP3.1 – Ampoule B5	1,538g	1,539g
GP3.2 – Ampoule B6	1,610g	1,602g
GP4.1 – Ampoule B7	1,193g	1,190g
GP4.2 – Ampoule B8	1,270g	1,275g

Apéndice 5: 21.02.23 - Prueba TAM inicial, GP1.1-GP4.2

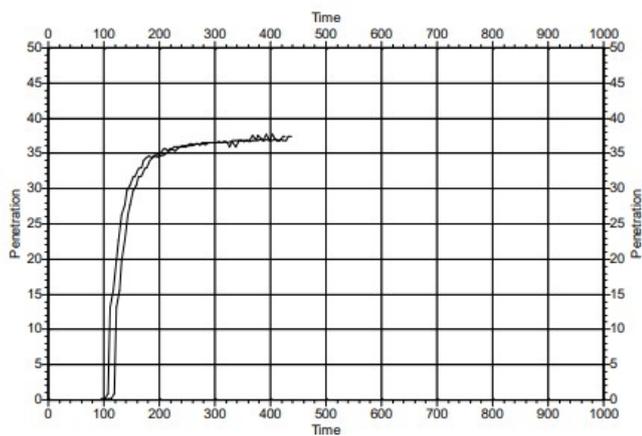


Anexo 6: 22.02.23 - Flujo de mortero, 15 impactos/15 segundos

Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	21,75cm
GP1.2	$\frac{22,3cm + 22,5cm}{2}$	22,4cm
GP3.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	22,5cm

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 01	DATE OF TEST : 24/02/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 13:42:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 13:55:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 50.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 22.7	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 24.2	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP11	TIME TYPE : FIXED	



Anexo 8: 24.02.23 - Creación de GP5.2, modificación de GP1.2

GP5.2	Amount, mass
FA	270g
GGBFS	180g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH (14M)	89,3g
Sand	1350g
H ₂ O	10g
SP viscocrete, Sika® (2% of total binder)	9g

Anexo 9: 24.02.23 - Flujo de mortero, 15 impactos/15 segundos

	Flow	Slump
GP5.2	140mm	33mm

Apéndice 10: 24.02.23 - Resistencia a la compresión, 1 día, cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortero

Recipe	Applied force	Force per surface area
GP1.1	10,9kN	4,36 $\frac{N}{mm^2}$
GP1.2	29,2kN	11,68 $\frac{N}{mm^2}$
GP3.1	12,2kN	4,88 $\frac{N}{mm^2}$

Apéndice 11: 28.02.23 - Resistencia a la compresión, 4 días, cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortero

GP5.2 – 4 day test, compressive strength			
Nr.	Density, dry	Applied force	Force per surface area
1	$2357,6 \frac{kg}{m^3}$	107,8kN	$43,04 \frac{N}{mm^2}$
2	$2354,6 \frac{kg}{m^3}$	76,9kN	$30,76 \frac{N}{mm^2}$
3	$2348,8 \frac{kg}{m^3}$	99,8kN	$39,92 \frac{N}{mm^2}$

El cubo n° 2 no se colocó en el centro de la zona de compresión, lo que provocó una aplicación no perpendicular de la fuerza. Esto probablemente condujo a una menor resistencia a la compresión.

Apéndice 12: 28.02.23 - Resistencia a la compresión, 1 día, cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm, mortero

Compressive strength, 5 days			
Nr.	Recipe	Density	Force per surface area
2	GP1.1	$2236,8 \frac{kg}{m^3}$	$27,6 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$28,08 \frac{N}{mm^2}$
2	GP1.2	$2199,2 \frac{kg}{m^3}$	$26,08 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.2	$2230,4 \frac{kg}{m^3}$	$31,64 \frac{N}{mm^2}$
2	GP3.1	$2188,8 \frac{kg}{m^3}$	$20,44 \frac{N}{mm^2}$
3	GP3.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$22,68 \frac{N}{mm^2}$

Apéndice 13: 28.03.25 - Creación de la mezcla para la prueba de fluidez del mortero y cubos de 50 mm x 50 mm

	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
FA	270g	270g
GGBFS	180g	5,974g
Na ₂ SiO ₃	108,56g	108,56g
KOH	71,44g	71,44g
H ₂ O	45g	22,5g
Sand	1350g	1350g
SP - flube	-	9g

Apéndice 14: 28.02.23 - Flujo de mortero, 15 impactos/15 segundos

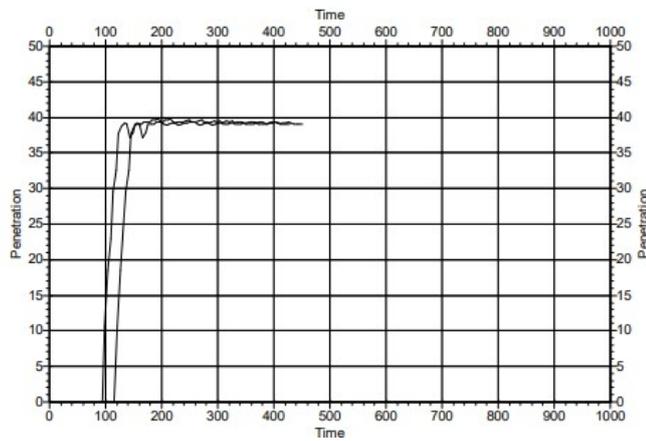
Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.2-0,45	$\frac{14,5cm + 14,5cm}{2}$	14,5cm
GP1.2-0,50	$\frac{11,1cm + 11,5cm}{2}$	11,3cm

Apéndice 15: 01.03.23 - Creación de la mezcla de pasta GP5.2 para el ensayo de Vicat

GP5.2 paste mix	
FA	270,0g
GGBFS	180,0g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH	89,3g
H ₂ O	10,0g
SP - viscocrete	9,0g

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 02	DATE OF TEST : 01/03/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 15:14:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 15:40:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 52.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 23.3	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 22.1	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP52	TIME TYPE : FIXED	



Apéndice 17: 01.03.23 - Masa proyectada para la prueba TAM

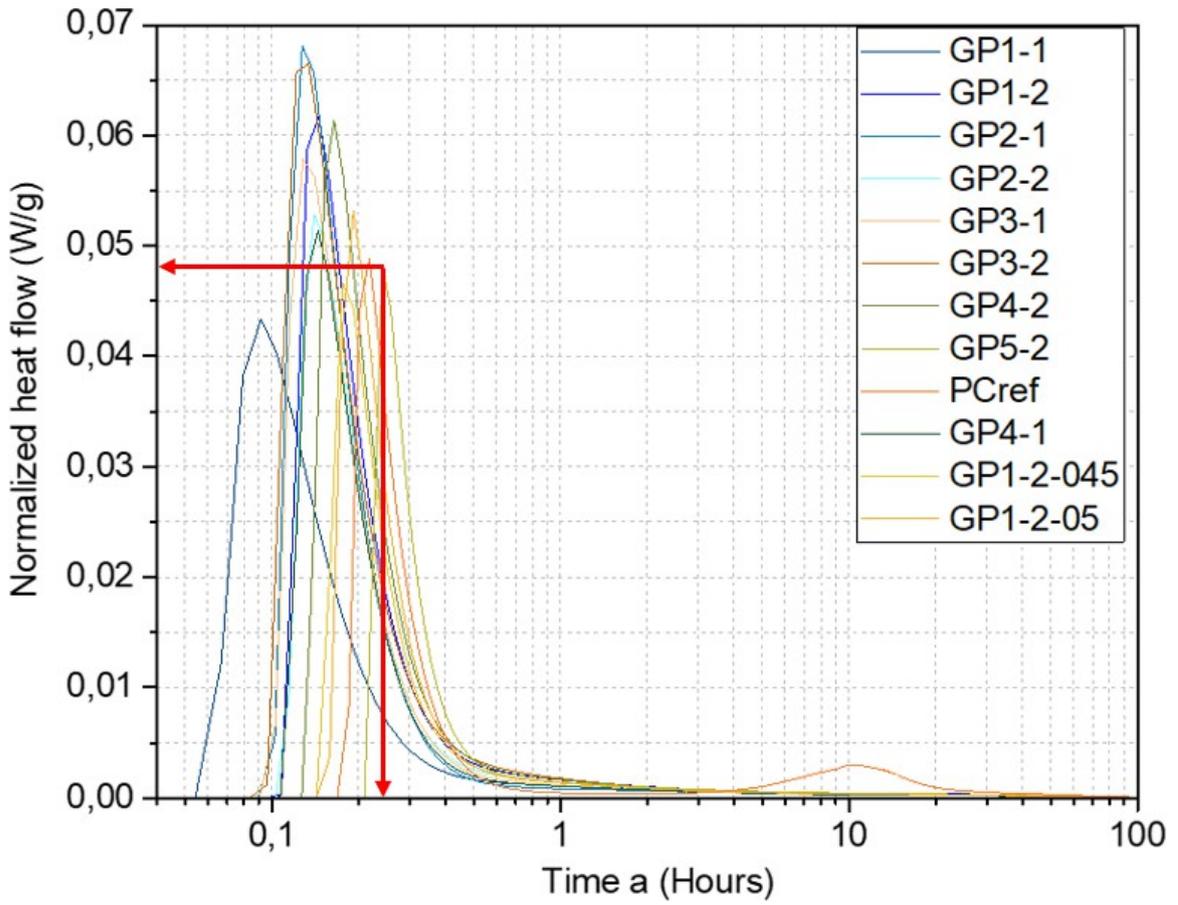
	GP5.2		GP1.2-0,45		GP1.2-0,50	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,334g	2,330g	2,449g	2,450g	2,400g	2,400g
m_{GGBFS}	1,556g	1,560g	1,633g	1,630g	1,600g	1,600g
$m_{Na_2SiO_3}$	1,173g	1,178g	0,985g	0,986g	1,965g	0,965g
m_{NaOH}	-	-	-	-	-	-
m_{KOH}	0,772g	0,790g	0,648g	0,650g	0,635g	0,629g
m_{H_2O}	0,086g	0,085g	0,204g	0,208g	0,400g	0,400g
$m_{SP\ visco}$	0,076g	0,073g	-	-	-	-
$m_{SP\ flube}$	-	-	0,082g	0,083g	-	-

Apéndice 18: 01.03.23 - Masa total en ampollas

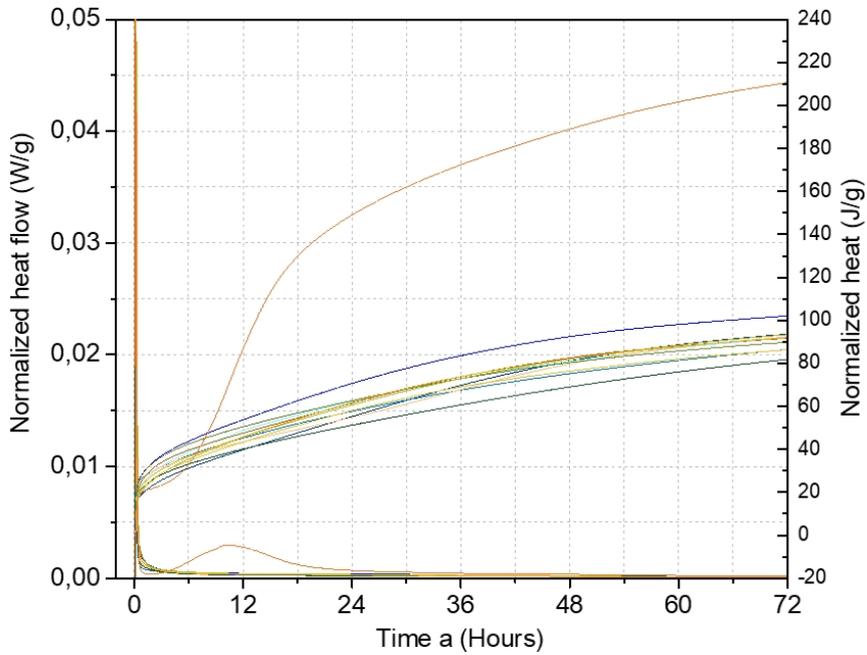
	GP5.2	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
Ampoule nr.	A1	A4	A5
$m_{ampoules}$	5,314	5,974g	6,021g

Compressive strength test, beams 40mmx40mm					
Recipe	Nr	Date of mixing	Curing age	Density	MPa
GP1.1		23.02.23	7	2282,7 kg/m ³	31,3
GP1.2		23.02.23	7	2275,5 kg/m ³	31,6
GP3.1		23.02.23	7	2271,6 kg/m ³	21,0
GP5.2		24.02.23	7	2289,3 kg/m³	44,9
GP1.2-0,5	1	28.02.23	1	2320,0 kg/m ³	18,6
GP1.2-0,5	2	28.02.23	1	2266,7 kg/m ³	42,1
GP1.2-0,5		28.02.23	7	2327,7 kg/m ³	19,4
GP1.2-0,45	1	28.02.23	1	1955,4 kg/m ³	9,9
GP1.2-0,45	2	28.02.23	1	1966,8 kg/m ³	9,3
GP1.2-0,45		28.02.23	7	2029,7 kg/m ³	18,3

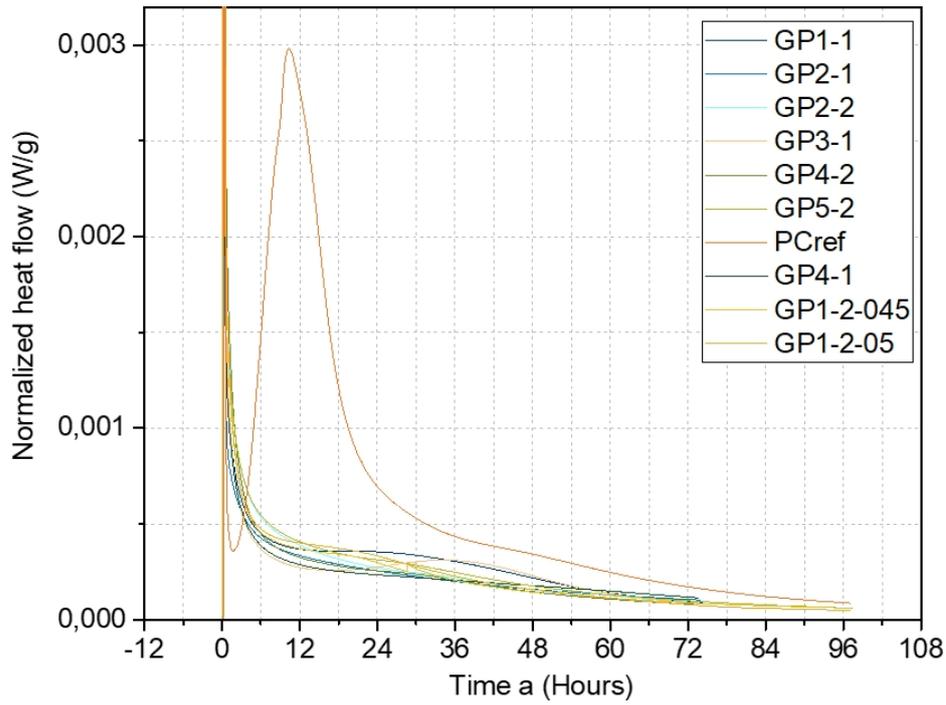
Apéndice 20: 01.03.23 - Resultados TAM de todas las recetas en comparación, flujo de calor normalizado



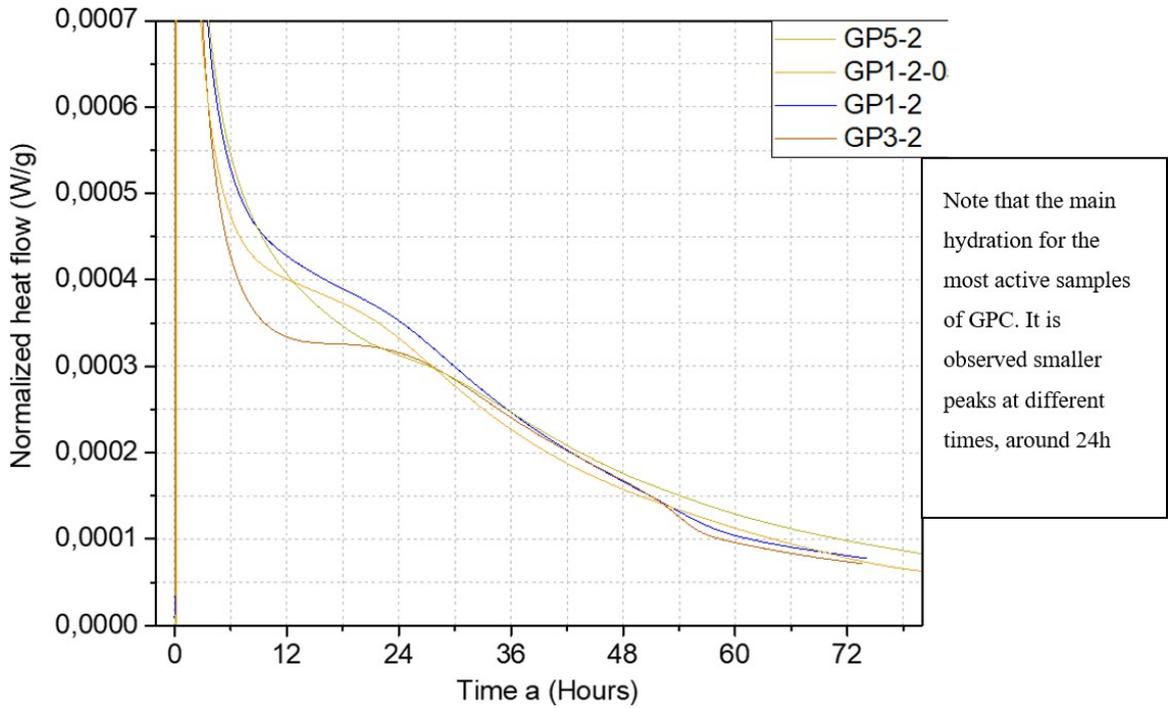
Apéndice 21: 01.03.23 - Resultados TAM de todas las recetas en comparación, flujo de calor normalizado y calor normalizado



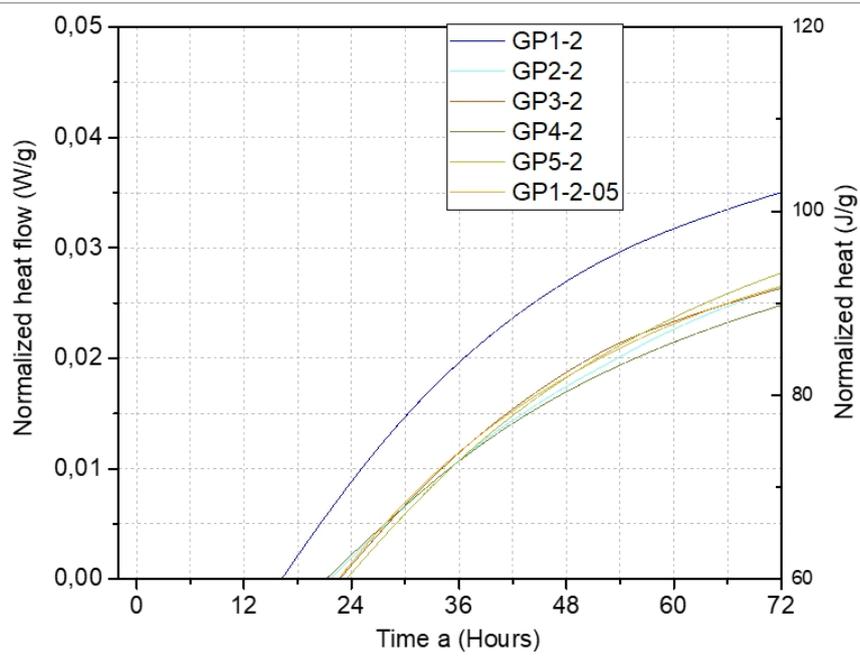
Apéndice 22: 01.03.23 - Resultados TAM de las recetas en comparación, flujo de calor normalizado



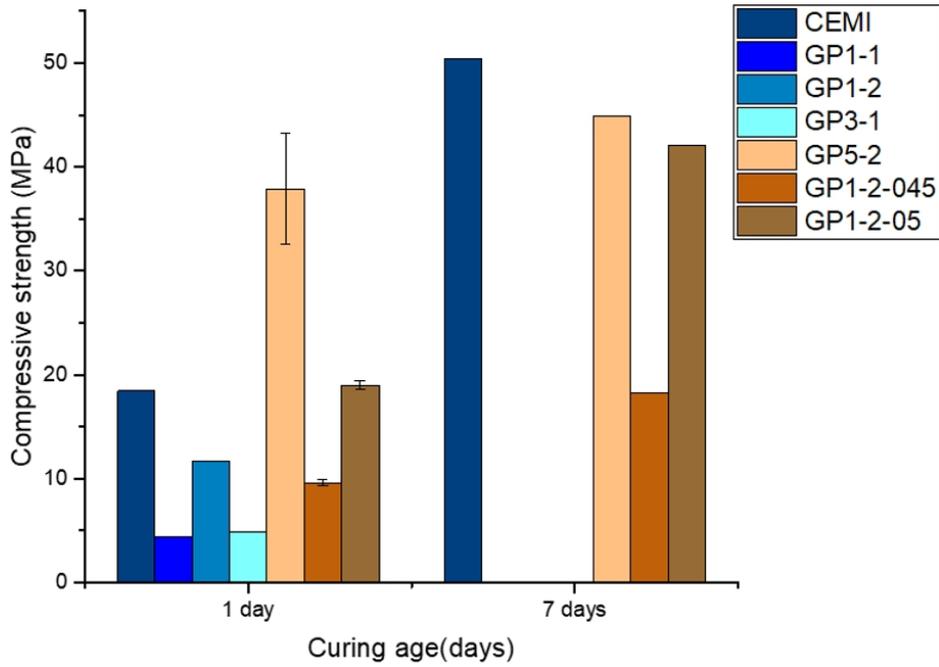
Apéndice 23: 01.03.23 - Resultados TAM de las recetas en comparación, flujo de calor normalizado



Apéndice 24: 01.03.23 - Resultados TAM de las recetas en comparación, flujo de calor normalizado



Apéndice 25: 01.03.23 - Resultados de la resistencia a la compresión de las recetas en comparación

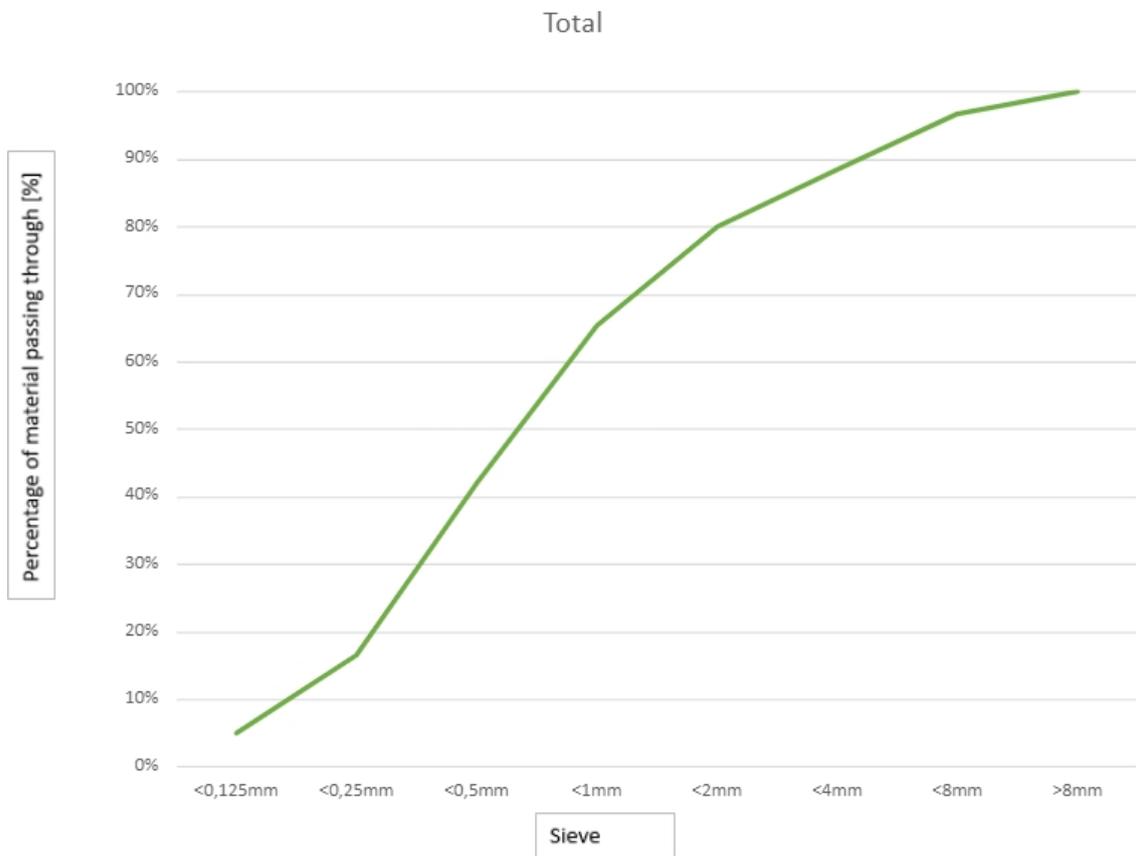


Apéndice 26: 22.03.23 - Resistencia a la compresión de GP5.2, curado al aire

Compressive strength date	Curing age	Number	Strength	Notes
23.03.23	1	1	$12,9 \frac{N}{mm^2}$	Not centered
23.03.23	1	2	$13,9 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 6mm
29.03.23	7	1	$34,4 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 2mm
29.03.23	7	2	$38,8 \frac{N}{mm^2}$	
19.04.23	28	1	$54,5 \frac{N}{mm^2}$	Moist on the bottom
19.04.23	28	2	$54,7 \frac{N}{mm^2}$	

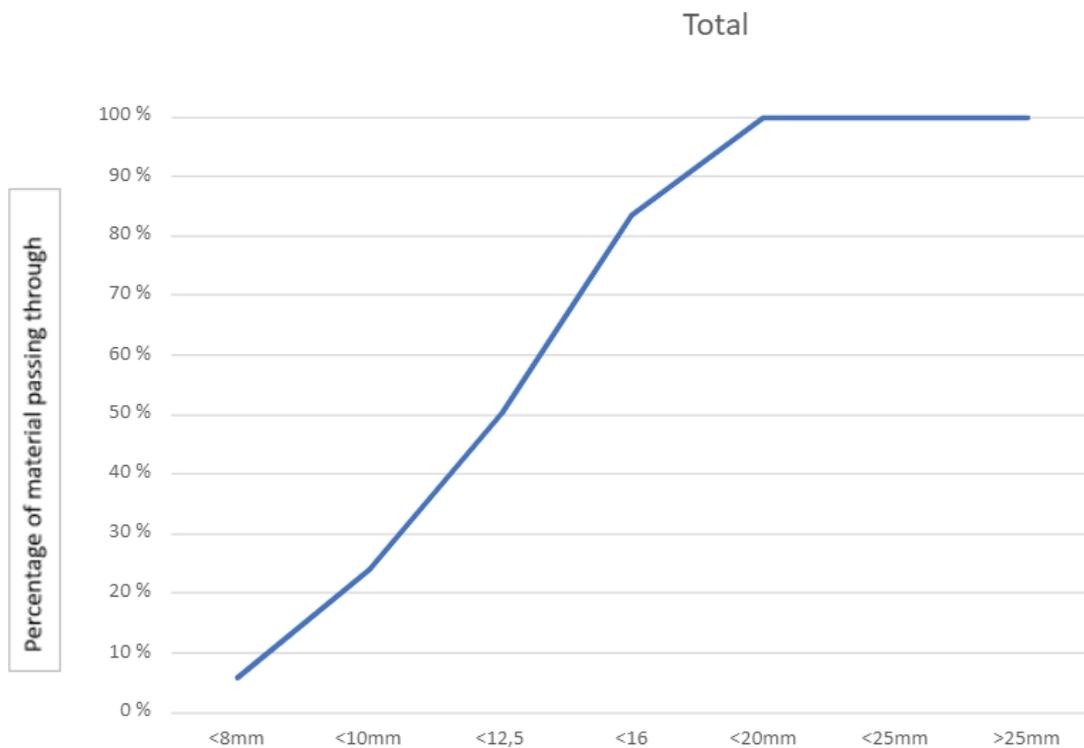
Apéndice 27: 22.03.23 - Tamizado de áridos, 0-8 mm

Weight sand [g]	1000				
Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<0,125mm	1356	1406	50	5 %	5 %
<0,25mm	646	762	116	12 %	17 %
<0,5mm	590	842	252	25 %	42 %
<1mm	652	884	232	23 %	65 %
<2mm	732	878	146	15 %	80 %
<4mm	840	924	84	8 %	89 %
<8mm	974	1056	82	8 %	97 %
>8mm	954	986	32	3 %	100 %
Sum after sieving			994	100 %	



Apéndice 28: 22.03.23 - Tamizado de áridos, 8-16 mm

Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<8mm	1375,8	1551,5	175,7	6 %	6 %
<10mm	954,7	1498,1	543,4	18 %	24 %
<12,5	1060,9	1852,4	791,5	26 %	50 %
<16	1075,7	2074,1	998,4	33 %	84 %
<20mm	1368,2	1861,8	493,6	16 %	100 %
<25mm	1367	1367	0	0 %	100 %
>25mm	1257,9	1257,9	0	0 %	100 %
Sum after sieving			3002,6	100 %	



Apéndice 29: 22.03.23 - Contenido de agua en los áridos

0-8 mm de contenido de agua del árido:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100 = \frac{1900 - 1896}{1900 - 300} * 100 = 0,25\%$$

8-16 mm de contenido de agua del árido:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100 = \frac{3500 - 3500}{3500 - 300} * 100 = 0\%$$

Apéndice 30: La prueba comenzó el 19.04.2023 y tuvo una duración de 24 horas antes de medir los valores que se muestran a continuación 20.04.2023

Penetración del cloruro

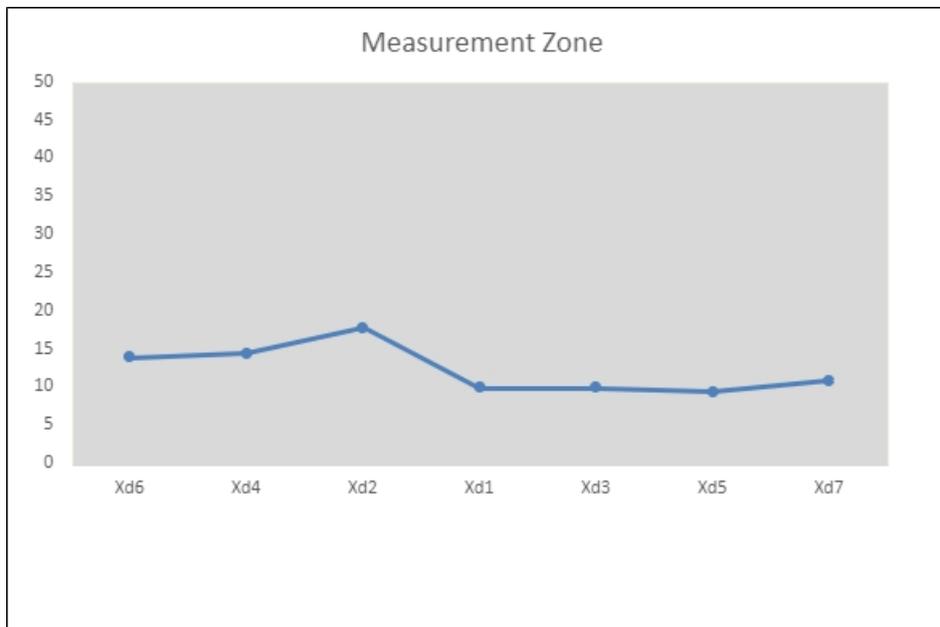
Preset conditions
10 V
24Hours
225mA

Measured values	Catholyte°C	Anolyte°C	Voltage
Start	15,2	24,5	225mA, 10V
Finish	18,2	19,3	217mA, 10,6V

Results of measured depths in GP5.2 in mm.

Xd6	Xd4	Xd2	Xd1	Xd3	Xd5	Xd7
14	14,5	17,9	10	10	9,5	11

Ilustración de las profundidades de penetración del cloruro en la zona de medición (mm)



Coefficiente de migración no estacionaria:

$$D_{nssm} = 0,0239 \cdot \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(1 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right)$$

Dónde:

D_{nssm} - Coeficiente de migración en estado no estable, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^2$

U- Valor absoluto del potencial externo aplicado entre los dos electrodos. V
=10,6V

T- Valor medio de las temperaturas inicial y final en el anolito, °C. T=21,9°C L-
Espesor de la probeta, mm. L=50,6 mm

x_d - Valor medio de las profundidades de penetración, mm.

$x_d=12,4 \text{ mm}$ t- Duración del ensayo, horas. t=24h

$$D_{nssm} = 0,0239 \cdot \frac{(273+21,9) \cdot 50,6}{(10,6-2) \cdot 24} \cdot \left(12,4 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273+21,9) \cdot 50,6 \cdot 12,4}{10,6-2}} \right)$$
$$D_{nssm} = 15,39 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Coeficiente de migración no estable (D_{nssm}) de las mezclas de hormigón estudiadas, relación agua/cemento de 0,55:

Resultados de la edad de carbonatación:

La siguiente fórmula es una fórmula basada en *la intuición* y es una *propuesta* sobre cómo determinar la edad de una muestra de hormigón, a partir de un ensayo de Carbonatación Rápida (Duran Atiş, 2003), basado en:

- Concentración de carbono en el aire, 421PPM
- Concentración de carbono en la cámara, 50000PPM
- Duración del procedimiento de prueba, 14 días
- 1 año = 365 días

$$\frac{50000PPM}{421PPM} \times \frac{14 \text{ days}}{365 \text{ year}} = 4,56 \text{ years}$$

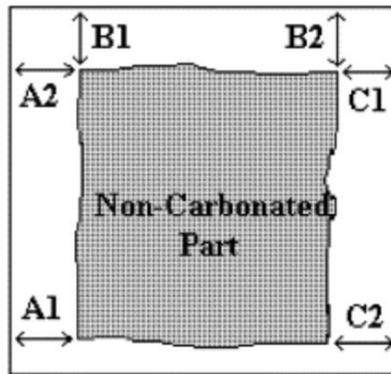


Ilustración de las zonas de medición, cuando se miden las profundidades de cloruro.

Medidas: 2 cubos, curados en horno.

Cubo nº 1	Cubo nº 2
A1: 1,5mm	A1: 3,37mm
A2: 0mm	A2: 4,03mm
B1: 7,26 mm	B1: 7,48 mm

B2: 3,67 mm	B2: 6,5 mm
C1: 1,49 mm	C1: 2,61 mm
C2: 4,06mm	C2: 4,62mm
D: 2.946 mm	D: 4,83 mm

Anexo 32: Consumo de energía en el proceso de producción

✓	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
✓	Non renewable, fossil	MJ	2,61E3	3,01E3
✓	Non-renewable, nuclear	MJ	210	564
✓	Non-renewable, biomass	MJ	0,259	0,401
✓	Renewable, biomass	MJ	47,1	97
✓	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	85	118
✓	Renewable, water	MJ	1,79E3	1,56E3

Apéndice 33: CO2 equivalente

Se	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
✓	GWP100 - fossil	kg CO2-eq	386	216
✓	GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	0,593	0,599
✓	GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0,218	0,291

Apéndice 34: Los materiales de cada receta utilizados para la comparación del ACV

No	Process	Project	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer Concrete
1	Cement, blast furnace slag 6-20% (RoW) cement production, blast fu	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	440	x
2	Diesel, burned in building machine (GLO) processing Cut-off, S	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	MJ	289	296
3	Electricity, medium voltage (NO) electricity voltage transformation fr	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	GJ	1,7	1,41
4	Flygeaske GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	243
5	Gravel, crushed (RoW) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	756
6	Ground granulated blast furnace slag (RoW) production Cut-off, S, (GP5.2 LCA analysis	kg	x	162
7	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyd	GP5.2 LCA analysis	kg	x	7,87
8	Potassium hydroxide (RER) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	41,8
9	Sand (RoW) gravel and quarry operation Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	965
10	Sand (RoW) sand quarry operation, extraction from river bed Cut-of	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	1,63	x
11	Sodium silicate, solid (RER) sodium silicate production, furnace proce	GP5.2 LCA analysis	kg	x	43,9
12	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	tkm	116	x
13	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	GP5.2 LCA analysis	tkm	x	117
14	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,31	x
15	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
16	Waste scenario for landfill, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
17	Waste scenario landfill	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,32	x
18	Water, completely softened (RER) market for water, completely softei	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	242	x
19	Water, completely softened (RER) market for water, completely softei	GP5.2 LCA analysis	kg	x	91,2
20	Water, completely softened (RoW) market for water, completely softi	GP5.2 LCA analysis	kg	x	39,3

Apéndice 35: Foto en directo del refuerzo de un muro de módulo macizo real

