



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

PROPUESTA DE CONTROL DE CALIDAD COMPLEMENTARIO PARA REDUCIR
EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON HORMIGONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

CONSTANZA CATALINA VARGAS FABRES

PROFESOR GUÍA:
CARMEN MUÑOZ EFFA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MILENKO OGAZ CARRASCO
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: CONSTANZA CATALINA VARGAS FABRES
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: CARMEN MUÑOZ EFFA

PROPUESTA DE CONTROL DE CALIDAD COMPLEMENTARIO PARA REDUCIR EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON HORMIGONES

Los métodos de especificación del control de calidad del hormigón en la construcción tienen como propósito proteger la salubridad y seguridad pública, no obstante, no consideran la sustentabilidad como uno de sus focos principales. Debido a esto es necesario considerar que la industria del cemento es la proveedora de materiales con mayor consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero equivalentes (CO_2e), siendo responsable del 7% de las emisiones de CO_2e a la atmósfera, lo que torna imprescindible introducir un método complementario de especificación y control de calidad que considere aspectos asociados a la sustentabilidad del hormigón.

Las normas nacionales e internacionales indican que el control de calidad del hormigón se debe realizar mediante ensayos a compresión de probetas de hormigón con una frecuencia mínima. Sin embargo, es común que el calculista señale una frecuencia de muestreo mayor a la exigida por la normativa, lo que se conoce como sobre-muestreo del hormigón.

En el presente trabajo se propone un control de calidad complementario que considera, por un lado, la aplicación del método de madurez en la fracción correspondiente al sobre-muestreo de hormigones, y por otro, la aplicación de una evaluación estadística de la resistencia mecánica de las muestras correspondientes al muestreo convencional que se efectúa conforme al contrato de construcción, con la finalidad de ajustar la dosificación de cemento de la mezcla de hormigón al disminuir la desviación estándar registrada en el control de resistencia potencial. El objetivo del presente estudio es que dicho método complementario del control de calidad disminuya el uso de cemento, la generación de residuos, y por ende, la huella de carbono del hormigón.

Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación del método de madurez en la fracción de sobre-muestreo de un edificio habitacional tipo, podría disminuir la huella de carbono asociada al control de resistencias mecánicas del hormigón en un rango entre 48% y 50%, provocando además una disminución en la generación de residuos. Adicionalmente, la aplicación del análisis estadístico de los resultados de las muestras ensayadas, podría generar una disminución de la huella de carbono de al menos un 9%, lo que se asocia a un ahorro aproximado de 100 ton de cemento por proyecto en el caso de la construcción habitacional.

Finalmente, se establece que la utilización del método complementario de control de calidad resulta ser un método sencillo de aplicar, significando un aporte a una construcción más sustentable y consciente con el medio ambiente.

A Los Molinos y sus árboles.

Tabla de contenido

I	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estructura del informe	3
II	Planteamiento del problema en estudio	4
2.1	Impacto del control de calidad en la construcción con hormigón	4
2.2	Normativa vigente para el uso de hormigones en obras de construcción	5
2.3	La práctica actual para el control de calidad del hormigón	6
2.4	Control de resistencia mecánica de hormigones	6
2.4.1	Control de resistencia potencial en probetas de hormigón	7
2.4.1.1	Requisitos generales	7
2.4.1.2	Extracción de muestras de hormigón	8
2.4.1.3	Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción	9
2.4.1.4	Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas	10
2.4.2	Método de Madurez	12
2.4.2.1	Terminología	13
2.4.2.2	Significado y uso	14
2.4.2.3	Funciones de madurez	15
2.4.2.4	Desarrollo de la relación resistencia-madurez	16
2.4.3	Comparación metodologías estudiadas	17
2.5	Control de calidad del hormigón en Chile	18
2.5.1	Frecuencia de muestreo según tipo de proyecto	18
2.5.1.1	Proyecto obra pública	19
2.5.1.2	Proyecto obra privada	20
2.6	Evaluación estadística de la resistencia mecánica	21
2.6.1	Evaluación de los resultados de la resistencia mecánica	21
2.6.1.1	Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas	22
2.6.2	Investigación del hormigón correspondiente a los resultados defectuosos	24
2.7	Medición de huella de carbono como índice de sustentabilidad	25
2.7.1	Gases de efecto invernadero y huella de carbono	25
2.7.2	Procedimiento general de cálculo de huella de carbono	26
2.7.2.1	Identificación de la cadena de suministradores, producto y unidad funcional	26
2.7.2.2	Elaboración de mapas de procesos	27

2.7.2.3	Recogida de datos	27
2.7.2.4	Cálculo de la huella de carbono	28
2.7.2.5	Medidas para reducir la huella de carbono	29
III	Propuesta de control de calidad complementario	30
3.1	Control de la resistencia mecánica con método de madurez aplicado al sobre-muestreo establecido en ciertos proyectos de construcción	30
3.1.1	Huella de carbono de las metodologías en estudio	30
3.1.1.1	Huella de carbono del control de resistencia potencial a través probetas de hormigón	30
3.1.1.2	Huella de carbono de la aplicación del método de madurez	35
3.1.2	Beneficio en CO_2e por reemplazo de metodología	37
3.2	Optimización de la dosificación a través de análisis de evaluación estadística de resultados de resistencia obtenidos en proceso de control de calidad	38
3.2.1	Desplazamiento de la curva de resistencia	38
3.2.2	Disminución de la desviación estándar del conjunto de muestras	39
3.2.3	Optimización de la mezcla de hormigón	40
IV	Aplicación del control de calidad complementario	41
4.1	Tipificación edificio habitacional	41
4.1.1	Información general	41
4.1.2	Muestreo y sobre-muestreo en edificio habitacional tipo	45
4.2	Aplicación del método de madurez para el sobre-muestreo contemplado para control de resistencias mecánicas de una obra de edificación	46
4.3	Optimización de la dosificación del hormigón suministrado a través de análisis de evaluación estadística de resultados de resistencia	48
4.3.1	Aplicación evaluación estadística	48
4.3.2	Desplazamiento de la curva de resistencia	49
4.3.3	Disminución de la desviación estándar del conjunto de muestras	51
V	Conclusión	55
	Bibliografía	58
Anexo A	Reportes de carga de hormigon G25 y G35	61

Lista de figuras

2.4.1	Sección de ensayo probeta cilíndrica.	11
2.4.2	Método de madurez. Temperatura versus tiempo.	12
2.7.1	Ciclo de vida del producto.	27
2.7.2	Formula huella de carbono.	28
3.1.1	Mapa de procesos - producción del hormigón.	31
3.1.2	Mapa de procesos - fabricación sensor inalámbrico.	35
3.1.3	Comparación HC metodologías de control de resistencias mecánicas. .	37
4.1.1	Cobertura Regional del Edificio ByB.	42
4.3.1	Curva de resistencia - Desplazamiento de curva - EHT1 y EHT5. . . .	50
4.3.2	Curva de resistencia - disminución de desviación estándar y desplazamiento de curva - EHT2 y EHT6.	53

Lista de tablas

2.2.0.1	Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.	5
2.4.1.1	Normas que rigen los materiales constituyentes del hormigón.	7
2.4.3.1	Comparación método convencional versus método de madurez.	17
2.5.0.1	Plan de muestreo mínimo para hormigón fresco.	18
2.6.1.1	Constantes de evaluación [MPa].	22
2.6.1.2	Medidas recomendadas según normativa chilena.	23
2.7.1.1	Potencial de calentamiento global (GWP).	25
3.1.1.1	Dosificaciones hormigón G25 y G35.	32
3.1.1.2	Huella de carbono producción de hormigón G25 y G35.	32
3.1.1.3	Cubicación tamaño muestra hormigón fresco.	33
3.1.1.4	Huella de carbono producción de hormigón G25 y G35 para una muestra de 40L.	33
3.1.1.5	Huella de carbono transporte de muestras.	34
3.1.1.6	Huella de carbono aplicación ensayo.	34
3.1.1.7	Huella de carbono del control de resistencia potencial a través probetas de hormigón G25 y G35.	34
3.1.1.8	Huella de carbono transporte sensor.	36
3.1.1.9	Huella de carbono transporte sensor a obra.	36
3.1.2.1	Comparación huella de carbono metodologías de control de resistencias mecánicas.	37
3.2.2.1	Resistencia promedio requerida, calculada para la resistencia $f'_c = 27.6MPa$	39
4.1.1.1	Rango y valor promedio de densidad de muros, edificio tipo ByB. . .	43
4.1.1.2	Relación rango de pisos con densidad de muro.	43
4.1.1.3	Masa unitaria de una planta promedio del Edificio ByB.	44
4.1.2.1	Huella de carbono generada al aplicar método convencional en cuota total de control de resistencias mecánicas.	45
4.2.0.1	Huella de carbono generada al aplicar método de madurez en cuota de sobre-muestreo de control de resistencias mecánicas.	46
4.2.0.2	Beneficio de complementar método convencional de control de calidad con método de madurez aplicado a cuota de sobre-muestreo.	47

4.3.0.1	Identificación de datos para cada edificio habitacional tipo (EHT). . .	48
4.3.2.1	Consecuencia de desplazar la curva de resistencia.	49
4.3.2.2	Beneficio de desplazar la curva de resistencia en EHT.	51
4.3.3.1	Consecuencia de disminuir la desviación estándar del conjunto de muestras.	52
4.3.3.2	Beneficio de disminuir la desviación estándar y desplazar la curva en EHT.	54

Capítulo I

Introducción

En enero del 2016, el gobierno de Chile publicó la hoja de ruta de productividad y construcción sustentable 2025, la que contiene el programa estratégico Nacional en productividad y construcción sustentable (PyCS). El propósito de este programa es mejorar la productividad en la industria de la construcción de edificaciones, en todos sus eslabones, incorporando requerimientos de sustentabilidad como factor adicional de competitividad. El resultado del proceso contemplado en la hoja de ruta en PyCS se traduce en 15 iniciativas prioritarias, las cuales han sido agrupadas en 4 ejes estratégicos: una industria más productiva; una industria que produce edificaciones sustentables; una industria que potencia la innovación y el uso de nuevas tecnologías; y una industria que desarrolla productos, servicios y talentos exportables.

Una industria que produce edificaciones más sustentables se basa en los principios de reducción de consumo de energía y materias primas, reutilización de productos y en último término el reciclaje. Sin embargo, en Chile tenemos una brecha llamada “percepción de valor de los usuarios en materia de construcción sustentable”, la cual es considerada el elemento vinculante entre la oferta de productos y servicios sustentables y la demanda que el mercado tiene por ellos. A nivel internacional se han estudiado y evaluado los beneficios económicos, sociales y medioambientales de la construcción sustentable, sin embargo, el conocimiento en Chile de los usuarios es bajo y por lo tanto la percepción de valor disminuye.

En el presente, en Chile se controla la resistencia mecánica de hormigones a través de muestras extraídas según un plan de muestreo al azar de hormigón fresco, en probetas moldeadas y conservadas de acuerdo con las normas nacionales respectivas. El plan de muestreo establece un mínimo de muestras en función del volumen de hormigón suministrado y el tamaño de la obra, pero las especificaciones técnicas de obras y/o manual de calidad de constructoras generalmente indica una frecuencia de muestreo mayor al establecido por norma, generando sobre-muestreo de hormigones.

Por otro lado, de acuerdo a la práctica actual, al efectuar la evaluación estadística de resultados de resistencia a compresión de las muestras extraídas, se observa que gran parte de las obras analizadas muestra cumplimiento con márgenes sobre la resistencia especificada, lo que es indicativo de que el diseño de la mezcla de hormigón no corresponde al grado de resistencia especificada ($f'c$), factor que imparte significativamente una gran huella de carbono asociada a su producción.

La presente memoria propone un método complementario de control de calidad, el que consiste en la aplicación de dos metodologías que apuntan a reducir el impacto ambiental de las obras de hormigón y contribuir al objetivo de mejorar la sustentabilidad en la construcción. Una de las metodologías consiste en la aplicación del método de madurez a la fracción correspondiente al sobre-muestreo que con fines de control de calidad se establece en algunos proyectos, siendo éste, un método no destructivo basado en el principio de que la resistencia del hormigón está directamente relacionada al historial de la temperatura de hidratación de la mezcla de cemento. La otra metodología consiste en aplicar evaluación estadística para analizar, ajustar y estabilizar la desviación estándar de las resistencias a compresión de las probetas, a través de la optimización de la dosificación de la mezcla de hormigón, es decir, regulando la cantidad de cemento añadido.

Ambas metodologías apuntan a disminuir la cantidad de cemento utilizado en el hormigón, esto debido a que en el sector de la construcción la industria del cemento es una de las tres industrias con mayor consumo energético a nivel mundial, siendo responsable además del 7% de las emisiones de CO_2 a la atmósfera. A su vez, las actividades asociadas a la fabricación del hormigón, material más usado en el mundo por la industria de la construcción, genera en su proceso de elaboración fuertes impactos medioambientales, entre estos: erosión y pérdida de suelos naturales por la extracción de áridos naturales.

Dada las características del método complementario de control de calidad propuesto, la aplicación de éste contribuye al propósito del PyCS al incorporar nueva tecnología y aportar a la sustentabilidad en la construcción, lo que se condice con dos de los ejes estratégicos del programa: una industria que produce edificaciones más sustentables y una industria que potencia la innovación y el uso de nuevas tecnologías.

1.1 Objetivos

Objetivo general:

Proponer un método complementario de control de calidad del hormigón que aporte a una construcción más sustentable, mediante la optimización del uso del cemento y aplicación del método de madurez para el control de resistencia .

Objetivos específicos:

- Describir la metodología de aplicación del control de resistencia potencial y método de madurez.
- Identificar el aporte a la sustentabilidad de la construcción del método complementario de control de calidad.
- Cuantificar el aporte de implementar el control de calidad complementario en un edificio habitacional tipo.

1.2 Estructura del informe

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Se presenta el contenido del trabajo de investigación. Las motivaciones para su realización y se destacan los principales objetivos a responder.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Exposición y descripción de la investigación junto con los antecedentes fundamentales para el desarrollo del método complementario de control de calidad del hormigón.

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE PROPUESTA

Propuesta de control de calidad complementario. Descripción de la metodología de aplicación del control de resistencia potencial y método de madurez como método complementario de control de calidad. Identificación del aporte a la sustentabilidad de la construcción del método complementario de control de calidad.

CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DE PROPUESTA

Tipificación de edificio habitacional en Chile. Aplicación y cuantificación del aporte de implementar el control de calidad complementario en un edificio habitacional tipo.

CAPÍTULO 5: SÍNTESIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Resumen de principales resultados obtenidos. Comentarios finales sobre el trabajo realizado.

Capítulo II

Planteamiento del problema en estudio

2.1 Impacto del control de calidad en la construcción con hormigón

Una estructura de hormigón sustentable es aquella que se construye de tal manera que el impacto social total durante todo su ciclo de vida sea mínimo. Por lo que el diseño sustentable debe considerar las consecuencias a corto y largo plazo de la estructura. Lograr un desarrollo sustentable de proyectos de construcción, requiere métodos y herramientas que ayuden a cuantificar y comparar los impactos ambientales de la creación y el suministro de los bienes y servicios utilizados. [1]

Hoy en día los métodos y herramientas de control de calidad en la construcción tienen como propósito proteger la salubridad y seguridad pública, sin embargo, no consideran la sustentabilidad como uno de sus focos principales.

Uno de los bienes y servicios con mayor consumo de energía y emisión de CO_2 a la atmósfera, es la industria del cemento, el que es el material más usado en el mundo por la industria de la construcción [2]. Dado lo anterior, es imprescindible lograr un desarrollo sustentable de este material, complementando la actual aplicación de la tecnología de control de calidad del hormigón.

2.2 Normativa vigente para el uso de hormigones en obras de construcción

En Chile la norma Hormigón - Requisitos generales (NCh170 [3]) establece que el hormigón es clasificado en grados (Tabla 2.2.0.1) ya sea con respecto a la resistencia a compresión o con respecto a la resistencia a tracción por flexión. Cuando es clasificado por resistencia a compresión, es según su resistencia especificada a los 28 días, $f'c$, determinada en probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, según norma NCh1017 (Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción [4]) y NCh1037 (Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas [5]).

La resistencia a la compresión del hormigón es por mucho, la propiedad más importante de este, y es una medida fundamental para el control de calidad del material. Por consiguiente, “es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras” [6]. Es por esto que existen varias normas que rigen las actividades implicadas en el control de resistencia mecánica del hormigones.

Tabla 2.2.0.1: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.

Grado	Resistencia especificada, $f'c$ [MPa]
G05	5
G10	10
G15	15
G17	17
G20	20
G25	25
G30	30
G35	35
G40	40
G45	45
G50	50
G55	55
G60	60
NOTA: Pueden existir grados mayores a los indicados en la presente tabla.	

Fuente: NCh170.

2.3 La práctica actual para el control de calidad del hormigón

Tal como se menciona anteriormente, el propósito del control de calidad del hormigón es proteger la salubridad y seguridad pública, al asegurar el cumplimiento de la resistencia especificada en el proyecto. Dicho propósito se lleva a cabo estableciendo requisitos mínimos para la resistencia, estabilidad, funcionamiento, durabilidad e integridad de las estructuras de hormigón. Tales requisitos mínimos dependen directamente de la dosificación de la mezcla de hormigón y del tipo de cemento utilizado. Por lo tanto, es indispensable asegurar que la dosificación se mantenga dentro de los límites reconocidos como admisibles.

Para lo mencionado anteriormente, es necesario un control permanente del hormigón elaborado, el que puede realizarse de dos maneras claramente diferenciadas: control previo y control posterior. Durante la etapa de diseño de la mezcla mediante “hormigones de prueba”, se realiza el control previo durante la fabricación para corregir las dosificaciones de acuerdo a las variaciones de los agregados. El control posterior se realiza con hormigón obtenido desde la mezcla que se coloca en la estructura, generando probetas moldeadas que se ensayan a 3, 7 y 28 días [7]. Proceso que se detalla en el ítem 2.4.1.

2.4 Control de resistencia mecánica de hormigones

Existen variadas metodologías de control de resistencia mecánica de hormigones, tales como rotura a compresión de probetas (método convencional), Método de madurez, pull out, Break off test, ultrasonido, índice esclerométrico, penetrómetro, entre otros. Los ensayos no destructivos no son válidos para el control de ejecución establecido por la norma, pero se utilizan de forma complementaria al control de calidad convencional. En este documento sólo se describirá los primeros dos nombrados, debido a que se estudiará el impacto de su implementación en la sustentabilidad de la construcción.

1. Método convencional: La normativa chilena establece procedimientos de evaluación de la calidad del hormigón cuando la resistencia a compresión o a flexo-tracción es la base de aceptación. El procedimiento de evaluación tiene por objetivo determinar la conformidad de los resultados de la resistencia a compresión con respecto a la especificada y evaluar el nivel de control de ensayos. En base a lo anterior, el método convencional de control de calidad se realiza a través de probetas de hormigón como control de resistencia potencial del hormigón colocado en la estructura.
2. Método de madurez: El procedimiento de aplicación del método de madurez es descrito por la norma NCh3565. La norma NCh170 establece que para estimar la resistencia real se puede utilizar el método de madurez, sugiriendo tener presente lo establecido en ASTM C1074.

2.4.1 Control de resistencia potencial en probetas de hormigón

2.4.1.1 Requisitos generales

La norma NCh170 establece los requisitos generales mínimos que se deben considerar para especificar, confeccionar, transportar, colocar, compactar, curar, proteger, desmoldar y descimbrar hormigones de densidad entre 2000 kg/m^3 y 2800 kg/m^3 , usados en hormigón simple y en hormigón reforzado. La norma también indica que el hormigón debe cumplir la resistencia especificada de proyecto, los requisitos de durabilidad, entre otros requisitos.

Con el fin de cumplir los requisitos generales para hormigones, la norma también establece condiciones mínimas para los materiales constituyentes, tal que dichas condiciones permitan asegurar que sus características se mantengan dentro de los límites establecidos por las normas respectivas de cada material (Ver Tabla 2.4.1.1).

Tabla 2.4.1.1: Normas que rigen los materiales constituyentes del hormigón.

Material	Norma
Cemento	NCh148 [9]
Árido	NCh163 [10]
Agua	NCh1498 [11]
Aditivos	NCh2182 [12]

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.2 Extracción de muestras de hormigón

El control de calidad del hormigón que se aplica hoy en día en Chile establece que los hormigones deben ser muestreados al momento de su colocación para verificar la resistencia potencial de los elementos estructurales correspondientes. El procedimiento de muestreo se realiza en base a lo que indica la norma NCh171 (Hormigón - Extracción de muestras del hormigón [13]), la que establece los procedimientos para extraer muestras representativas del hormigón fresco que se destina a ensayos.

En primer lugar define las características que deben tener los aparatos, tal como sigue:

- Los recipientes de muestreo serán limpios, resistentes, no absorbentes y químicamente inerte con los componentes del hormigón, estancos al agua y de capacidad suficiente para contener la muestra. Y debe tener una abertura de dimensiones superiores a las de la sección del flujo de la carga.
- La superficie de remezclado será una superficie horizontal, limpia, no absorbente y de capacidad suficiente para permitir el remezclado de la muestra completa por medio de la pala.

Luego, la norma establece que el tamaño de la muestra de hormigón fresco debe ser superior a una y media vez el volumen necesario para efectuar los ensayos requeridos, y en ningún caso inferior a 30L.

La extracción de muestras desde camiones hormigoneras debe cumplir con lo siguiente:

- Regular el flujo de descarga del hormigón mediante la velocidad de rotación del tambor, sin estrangular el flujo con la compuerta.
- Efectuar la extracción de muestra en tres o más intervalos regulares durante la descarga de la hormigonera sin incluir el principio ni el final de ésta.
- Extraer la porción de cada intervalo pasando una sola vez un recipiente de muestreo por toda la sección del flujo de descarga, o bien desviando completamente el flujo hacia el recipiente.

En cuanto al acondicionamiento de las muestras. Cuando sea necesario transportar el hormigón muestreado, hacerlo en los recipientes de muestreo hasta el lugar donde se confeccionarán las probetas o se harán los ensayos. Para la protección de las muestras, se deben cubrir durante el periodo comprendido entre su extracción y la confección de las probetas o uso en ensayo. Este periodo será inferior a 15 minutos. Finalmente, el remezclado de la muestra debe realizarse con pala en el recipiente de muestreo o en la superficie de remezclado antes de llenar los moldes.

2.4.1.3 Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción

Una vez extraída la muestra representativa, se debe actuar bajo la norma NCh1017, la cual establece los procedimientos para confeccionar y curar en obras las probetas de hormigón fresco que se destinan a ensayos de compresión y tracción.

En cuanto a los aparatos, establece que los moldes serán de forma interior cúbica, cilíndrica o prismática. En cuanto a ensayos de compresión los moldes para confeccionar las probetas deben ser de forma cilíndrica, de material resistente, no absorbente y químicamente inerte con los componentes del hormigón, y adecuados para evitar deformaciones en sus dimensiones o forma durante el armado, ajuste, confección de probetas y manipulaciones posteriores.

Como requisito previo al moldeado se deberán eliminar los granos ocasionales superiores a las dimensiones especificadas en la misma norma, las superficies de moldes que entran en contacto con el hormigón se untarán con una delgada película de aceite mineral para prevenir la adherencia del hormigón con el molde.

El moldeado de las probetas será en el mismo lugar donde se dejarán las muestras en el curado inicial. Previamente, se preparará una base de apoyo para los moldes, de modo que estos queden nivelados y protegidos de choques y vibraciones.

La colocación del hormigón en los moldes debe ser realizada de forma cuidadosa, evitando las segregaciones y en capas, uniformando la superficie de cada capa empleando la varilla pisón. Luego, la compactación podrá efectuarse por apisonado o por vibrado interno o externo, lo cual dependerá de la consistencia del hormigón que por lo general se mide con un ensayo de asentamiento del cono de Abrams.

El curado se divide en etapas:

- En el curado inicial se debe evitar la evaporación y mantener la temperatura de las probetas entre 16°C y 27°C, desde el momento mismo del moldeado cubriendo la superficie del hormigón con láminas de material impermeable y protegiendo el conjunto de probetas por todos sus lados con arena, aserrín o arpillera húmedas, dentro de un envase adecuado hasta el momento del desmolde.
- El desmolde de las probetas cilíndricas a de ser después de 20 horas de moldeadas, siempre que las condiciones de endurecimiento permitan un desmolde sin causar daños a la probeta.

- Una vez las probetas desmoldadas, se deben colocar a temperatura entre 17°C y 23°C y sumergidas en agua tranquila y saturada de cal o colocadas en una cámara con una humedad relativa igual o superior a 90%.
- En el traslado al laboratorio se debe proteger las probetas de golpes o raspaduras que puedan alterar sus aristas y superficies y mantenerlas saturadas de humedad hasta su recepción en el laboratorio. Si las probetas se encuentran desmoldadas, deben ser trasladadas en un plazo igual o superior a cinco días.
- Para el curado en el laboratorio de debe almacenar las probetas inmediatamente de recibidas, hasta el momento del ensayo, en las mismas condiciones de humedad y temperaturas que en las probetas desmoldadas.
- Para ensayar, de debe retirar las probetas de su curado inmediatamente antes de ensayar, protegiéndolas con arpilleras mojadas hasta el momento en que deban ser colocadas en la máquina de ensayo.

2.4.1.4 Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas

Una vez curadas las probetas se debe efectuar el ensayo a la rotura por compresión de probetas cúbicas y cilíndricas de hormigón, cuya metodología está establecida en la norma NCh1037.

En cuanto a los aparatos establece que la prensa de ensayo tendrá la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de resultados; tendrá un sistema de rotura que permita hacer coincidir la resultante de la carga aplicada con el eje de la probeta; entre otras.

El procedimiento para probetas cilíndricas es el siguiente (Ver Figura 2.4.1):

1. Medir dos diámetros perpendiculares entre si (d_1 y d_2) aproximadamente a la mitad de la altura de la probeta.
2. Medir la altura de la probeta en dos generatrices opuestas (h_1 y h_2) antes de refrentar las bases.
3. Expresar estas medidas con aproximación a 1mm.
4. Determinar la masa de la probeta antes de refrentar con aproximación a 50g.

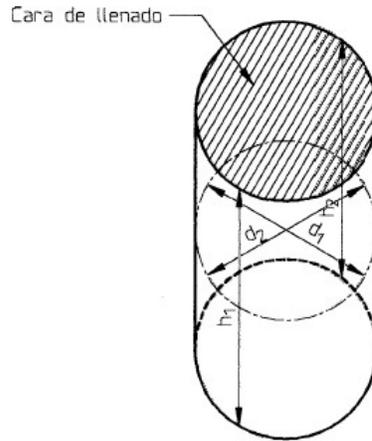


Figure 2.4.1: Sección de ensayo probeta cilíndrica.

Fuente: NCh1037.

Para el ensayo se debe limpiar la superficie de las placas y de las caras de ensayo de la probeta, luego colocar la probeta sobre la placa inferior alineando su eje central con el centro de esta placa. Luego se coloca la probeta asentada en una de sus caras planas refrentadas. Por último, se asienta la placa superior sobre la probeta, guiándola suavemente con la mano para obtener un apoyo de la placa lo más uniforme posible. Para así aplicar la carga de forma continua y sin choques, a una velocidad uniforme, que permita cumplir las siguientes condiciones:

- Alcanzar una franja de rotura de la probeta en un tiempo igual o superior a 100s.
- No superar la velocidad de $3.5\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{s}$.

Cuando se conoce aproximadamente la carga de rotura, será permisible aplicar la primera mitad de la carga a una velocidad mayor que la especificada anteriormente. Una vez fijada la velocidad y especialmente en la segunda mitad de la carga, no se hará modificaciones de ella hasta el término el ensayo. Por último, se registra la carga máxima P , expresada en N (kgf).

2.4.2 Método de Madurez

Desde la década de los setenta en Europa, investigadores Daneses (Freisleben y Hansen), Norteamericanos (Lew, Reichard, Malhotra, Naik, Grove, Cable y Ragdy) y uno Italiano (J. Carino), han demostrado que a partir del historial térmico del hormigón (Curva temperatura versus Tiempo), se puede estimar la resistencia del material a una determinada edad sin necesidad de ensayos mecánicos, a partir de correlaciones utilizando curvas de calibración resistencia-madurez obtenidas en laboratorio. [14].

Lo anterior se basa, en que a medida que el cemento fragua, y el efecto aglutinante se desarrolla en el material cementante como consecuencia de su reacción con el agua, ocurre un proceso químico de hidratación que genera calor, el cual es conocido como calor de hidratación. La madurez esta relacionada a esta reacción exotérmica y se interpreta cómo el área bajo la curva Temperatura-Tiempo de la mezcla durante el fraguado. En consecuencia, la madurez esta asociada al historial de temperatura del hormigón y se toma, generalmente, como el producto de las variable tiempo y temperatura.

Luego, “La teoría básica que sustenta el método de madurez es que dos hormigones con la misma madurez tendrán la misma resistencia, aunque cada uno puede haber estado expuesto a condiciones de curado diferentes” [15]. En otras palabras, dos mezclas con la misma relación agua-cemento y de características similares que se curan a diferentes temperaturas, pueden obtener valores de resistencia y madurez iguales a diferentes tiempos. De otra parte, la mezcla que esta curada a una temperatura superior, en un mismo instante presenta un mayor grado de hidratación y por lo tanto mayor resistencia y madurez. Véase figura 2.4.2.

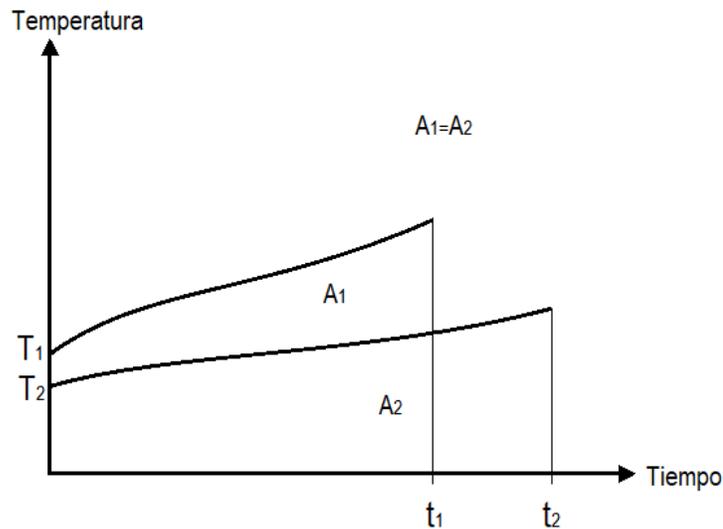


Figure 2.4.2: Método de madurez. Temperatura versus tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se menciona anteriormente, los efectos del tiempo y la temperatura en el aumento de la resistencia del hormigón se cuantifican mediante una función de madurez (factor temperatura-tiempo), que es indicativa de cuánta resistencia ha desarrollado el hormigón. El Instituto Nacional de Normalización puso en vigencia en el año 2018 la norma NCh3565 “Hormigón - Estimación de la resistencia mecánica - Método de la madurez”. La organización de normas ASTM internacional (American Society for Testing and Materials) desarrolló y publicó la norma C1074, la cual contiene acuerdos voluntarios de normas técnicas. Con lo que se estableció la práctica estándar para la estimación de la resistencia del hormigón mediante el método de madurez.

2.4.2.1 Terminología

Descripción de términos específicos para la norma ASTM C1074.

- Temperatura de referencia: Temperatura que se resta de la temperatura medida en el hormigón para el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la ecuación 2.4.1.
- Edad equivalente: Número de días u horas a una temperatura especificada, requeridos para producir una madurez igual a la madurez lograda por un período de curado a diferentes temperatura de la temperatura especificada.
- Madurez: Grado o medida del desarrollo de una propiedad de una mezcla de cemento.
- Función de madurez: Expresión matemática que utiliza la medida del historial de temperaturas de una mezcla cementosa durante el período de curado para calcular un índice que es indicativo de la madurez al final de este período.
- Índice de madurez: Indicador de madurez que se calcula a partir del historial de temperaturas de la mezcla cementosa utilizando la función de madurez.
- Método de madurez: técnica para estimar la resistencia del hormigón que se basa en la suposición de que las muestras de una determinada mezcla de hormigón alcanzan las mismas resistencias si alcanzan a su vez valores iguales del índice de madurez.
- Relación resistencia-madurez: Relación empírica entre la resistencia a la compresión de cilindros y el índice de madurez, que se obtiene del ensayo de muestras cilíndricas, cuyo historial de temperaturas ha sido registrado en el tiempo hasta su ensayo.

La relación resistencia-madurez es desarrollada en ensayos de laboratorio de la mezcla de hormigón que será utilizada. El historial de temperaturas del hormigón, para el cual la resistencia será estimada, se registra desde el momento de la colocación del cemento hasta el tiempo para el cual desea estimar la resistencia. Finalmente, utilizando el índice de madurez calculado y la relación resistencia-madurez, se estima la resistencia del hormigón. [16]

2.4.2.2 Significado y uso

La metodología propuesta por la norma ASTM C1074 puede ser utilizada para estimar in-situ la resistencia del hormigón, permitiendo el comienzo de actividades críticas de la construcción, tales como:

- Remoción de encofrado y reapuntalamientos.
- Postensado de elementos estructurales, tales como losas y vigas.
- Terminación de la protección en tiempo frío.
- Habilitación al tráfico en caminos.

De acuerdo con lo expuesto por la norma ASTM C1074, las mayores limitaciones del método de madurez son:

- El hormigón debe mantenerse en condiciones que permitan la hidratación del cemento.
- Para la estimación de la resistencia última a largo plazo, este método no toma en cuenta los efectos de la temperatura en hormigones a edades tempranas.
- El método necesita ser complementado por otras indicaciones de la resistencia potencial de la mezcla de hormigón.

La exactitud de la estimación de la resistencia depende, en parte, de la apropiada determinación de la función de madurez para la mezcla de hormigón usada en particular.

2.4.2.3 Funciones de madurez

La resistencia del hormigón está directamente correlacionada con el desarrollo de la madurez, puesto que en general las condiciones de curado (temperatura y humedad) determinan el proceso de hidratación de las partículas de cemento, de acuerdo con lo anterior, es posible definir una correlación mediante un modelo matemático de la resistencia en función de la madurez. Posibilitando que “La verificación de la evolución de la resistencia del hormigón en el mismo sitio de colocación se convierta en una posibilidad real mediante el seguimiento del desarrollo de madurez, lo cual permite implementar una práctica para el control de calidad más tecnificada y optimizar los procedimientos de diseño, producción, colocación, curado y manejo del hormigón” [14].

Hay dos alternativas para calcular el índice de madurez desde la medición del historial de temperaturas del hormigón. La ecuación de Nurse-Saul (ecuación 2.4.1), desarrollada en la década de los '50, asume que la velocidad de hidratación es una función lineal de la temperatura.

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_o) \cdot \Delta t \quad (2.4.1)$$

Dónde:

$M(t)$: Madurez a la edad t , $^{\circ}C \cdot \text{días}$ ó $^{\circ}C \cdot \text{horas}$.

Δt : Intervalo de tiempo, días u horas.

T_a : Temperatura promedio del hormigón durante cada intervalo de tiempo Δt , $^{\circ}C$.

T_o : temperatura de referencia, $^{\circ}C$.

El valor de temperatura de referencia que se adoptó fue de $-10^{\circ}C$, debido a que en esta temperatura prácticamente se suspende el proceso de hidratación del cemento y en consecuencia no hay incremento de resistencia.

La madurez también puede ser determinada mediante el método de Arrhenius, que considera la no linealidad en la tasa de hidratación del cemento, combinando mejor los efectos de las variables en la ganancia de resistencia. Éste método produce un índice de madurez en términos de una edad equivalente, a una temperatura de referencia, generalmente $20^{\circ}C$, requerida para producir una madurez igual a la alcanzada durante un periodo de curado a temperaturas diferentes a la temperatura de referencia. (Ver ecuación 2.4.2).

$$t_e = \sum_0^t e^{-Q \cdot (\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} \cdot \Delta t \quad (2.4.2)$$

Dónde:

t_e : Edad equivalente a una temperatura de referencia T_s , días u horas.

Q : Energía de activación dividida por la constante general de los gases, K .

T_a : Temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt , $^{\circ}C$.

T_s : Temperatura de referencia, K .

Δt : Intervalo de tiempo, días u horas.

La ecuación de Arrhenius es una mejor representación de la función temperatura-tiempo que la ecuación de Nurse-Saul cuando se espera una amplia variación en la temperatura del hormigón. Además, el enfoque de Nurse-Saul es limitado en que asume que la tasa de ganancia de resistencia es una función lineal. Sin embargo, La fórmula de Nurse-Saul es más ampliamente utilizada, principalmente debido a su simplicidad. Ambas funciones de madurez se consideran en la Norma ASTM C1074. [17]

2.4.2.4 Desarrollo de la relación resistencia-madurez

Para la obtención de la relación resistencia-madurez para una mezcla específica de hormigón, se debe preparar por lo menos 15 probetas cilíndricas de acuerdo con la norma ASTM C192. Para la obtención del historial de temperatura se debe introducir sensores de temperatura por lo menos a ± 15 mm de los centros de al menos 2 probetas y deben ser conectados a dispositivos de registro de temperatura.

Las probetas se deben curar en húmedo tal cómo lo indica la norma ASTM C511. Luego, los ensayos de compresión se deben llevar a cabo en 1, 3, 7, 14 y 28 días, tal como lo indica la norma ASTM C39. Se debe ensayar dos probetas para cada edad calculando la resistencia promedio. En caso de que el rango de la resistencia a la compresión de los dos cilindros se exceda del 10% de su resistencia promedio, se ensaya otro cilindro y se calcula el promedio de tres resultados.

Para cada edad de ensayo se debe realizar el registro del índice de madurez promedio para las probetas instrumentadas. Ya obtenido el índice de madurez, en un gráfico se plotea la resistencia a la compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez, definiendo la curva que mejor se ajuste a todos los datos. Finalmente, la curva resultante es la relación resistencia-madurez usada para estimar la resistencia de la mezcla de hormigón curado bajo otras condiciones de temperatura (condiciones registradas en la obra).

2.4.3 Comparación metodologías estudiadas

Dado que anteriormente se describe las características y metodologías de ambos métodos de control de resistencia a la compresión, a continuación la Tabla 2.4.3.1, muestra una comparativa de ambas.

Tabla 2.4.3.1: Comparación método convencional versus método de madurez.

Ítem	Método convencional	Método de madurez
¿Método normado en Chile?	Sí (NCh1037)	Si (NCh3565)
Obtención de resultados	A través de laboratorio (Ensayo de probetas)	in-situ (Control de temperatura en elementos de la estructura)
Confiable de resultados	En función de condición de curado de probetas	Altamente confiable en edades tempranas
Tiempo de espera obtención de resultados	Depende de laboratorio contratado	Resultados inmediatos
Evaluación de resistencia	Una vez ensayada la probeta a la edad especificada	En tiempo real
Tipo de ensayo	Destructivo (en probetas)	No destructivo

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Control de calidad del hormigón en Chile

El plan de muestreo debe quedar establecido en la norma de diseño o en la especificación particular de la obra. Si el plan de muestreo para el hormigón fresco no está especificado, deberá usarse por lo menos, lo indicado en la Tabla 2.5.0.1 .

Tabla 2.5.0.1: Plan de muestreo mínimo para hormigón fresco.

Procedencia del hormigón	Volumen de hormigón de la obra [m^3]	
Confeccionado en obra	>250	≤ 250
Volumen máximo de hormigón por muestra	100	50
Número mínimo de muestras	5	3
De central hormigonera	>250	≤ 250
Volumen máximo de hormigón por muestra	150	75
Número mínimo de muestras	5	3

Fuente: Norma NCh170.

De la Tabla 2.5.0.1 se desprende que un proyecto de edificación para uso habitacional de hormigón debe tomar muestras mínimo cada $150m^3$, a no ser que las especificaciones técnicas indiquen un plan de muestreo con frecuencia distinta.

2.5.1 Frecuencia de muestreo según tipo de proyecto

A pesar de que la norma chilena NCh170 indica una frecuencia de muestreo mínimo para hormigones frescos, es el calculista encargado del proyecto quien determina si la cantidad de muestras indicada por la norma es suficiente para llevar un control de calidad estricto. Al estudiar especificaciones técnicas de distintos proyectos habitacionales chilenos, destaca que el procedimiento de control de calidad de hormigón de estos, exige realizar ensayos a compresión de probetas de hormigón a un volumen mayor al exigido por la normativa, que va entre $50m^3$ y $100m^3$. A lo anterior se debe adicionar los ensayos realizados para autocontrol, cuya función es contrastar la calidad del hormigón efectivamente recibido en obra.

Para realizar un correcto análisis de frecuencia de muestreo separaremos el análisis según tipo de proyecto: obra privada y obra pública.

2.5.1.1 Proyecto obra pública

Los proyectos de obras públicas deben ser separados según el agente por el cual es emitido: Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU) o Ministerio de Obras Públicas (MOP).

El laboratorio de autocontrol del suministrador de hormigón fabrica probetas para la correcta gestión de calidad del proceso de producción, a lo que se debe sumar, las probetas realizadas por parte del cliente o constructora cuya función es contrastar la calidad del hormigón efectivamente despachado a la obra.

Generalmente, los contratos de proyectos de SERVIU y MOP en sus propuestas públicas consideran la inclusión de varios laboratorios de control de calidad. Además de los dos organismos mencionados anteriormente, el laboratorio regional de vialidad genera toma de muestras adicionales a las estipuladas en el contrato de obra, es decir, existe un sobre muestreo y un sobre costo sólo para controlar la calidad del hormigón. Esto implicaría que los proyectos de obra públicas son los con mayor tasa de sobre-muestreo en Chile. [19]

A modo de ejemplo, a continuación se cita el documento “Especificaciones técnicas generales obras civiles. Civil - estructural” de la “Gerencia desarrollo de proyectos subgerencia de OCCC y arquitectura” del Metro de Santiago [20]. En el que se establece para el control de resistencia del hormigón, lo siguiente:

- La ITO (Inspección Técnica de Obras) controlará todas aquellas etapas de la ejecución de los hormigones que estime necesarias, que hayan sido estipuladas en los documentos de proyectos o en estas especificaciones.
- El plan de controles a efectuar será establecido al comenzar la obra y comunicado al contratista, quien dará la información y facilidades necesarias para su ejecución, sin que ello implique modificaciones de costos y plazo de las obras.
- Sin embargo, independientemente de los controles efectuados por la ITO, el contratista deberá tener su propio control de calidad interno, que asegure un fiel cumplimiento de lo establecido en estas especificaciones técnicas, además de lo que indiquen los planos del proyecto y las instrucciones de la ITO.
- Salvo que la ITO lo determine en otra forma deberá tomarse una muestra para ensayos de resistencia por cada $50m^3$ de hormigón colocado en obra por cada tipo de hormigón, o bien una muestra diaria.
- Cada muestra de hormigón estará constituida por cuatro probetas cúbicas de 20cm de arista. Una de ellas, se ensayará a la ruptura por compresión a las 7 días y las tres restantes a los 28 días. El valor de la resistencia a los 28 días de una muestra será el promedio de las tres probetas ensayadas a esa edad.

Resumiendo, las especificaciones técnicas de la empresa Metro de Santiago establece una frecuencia de toma de muestra por cada $50m^3$ de hormigón colocado en obra, por cada tipo de hormigón, o bien una muestra diaria cualquiera sea la más frecuente. En cambio, lo establecido por la norma NCh170 (Ver Tabla 2.5.0.1), para hormigón proveniente de central hormigonera y volumen del hormigón de la obra superior a $250m^3$, es realizar toma de muestras cada $150m^3$, es decir, se realiza 200% de sobre-muestreo respecto al muestreo mínimo establecido por norma.

2.5.1.2 Proyecto obra privada

En Chile los proyectos de obra privada rigen la frecuencia de muestreo en base a dos documentos. Primeramente, en función de la norma NCh170 y eventualmente, por lo establecido por la especificación técnica del proyecto, siempre y cuando la frecuencia de muestreo sea mayor a la establecida por la norma.

Al recopilar especificaciones técnicas de proyectos de construcción de obras privadas de edificios de uso habitacional, se obtiene que en promedio se realiza 100% de sobre-muestreo respecto al muestreo mínimo establecido por norma.

A pesar de que en algunos proyectos de obras públicas y privadas se realiza toma de muestras con frecuencia mayor a la estipulada por la norma NCh170, cabe destacar (con respaldo en dicha norma) que tal cuota de sobre-muestreo no es requerida para el control de resistencia potencial.

2.6 Evaluación estadística de la resistencia mecánica

La ACI318 define un valor mínimo de resistencia a compresión para hormigón estructural (f'_c), sin establecer un valor límite máximo de este, es decir, las mezclas de hormigón dosificadas deben lograr una resistencia promedio a la compresión que exceda el valor de f'_c utilizado en los cálculos de diseño estructural.

El factor de mayoración que se aplica a f'_c para estimar la resistencia media requerida (f_{cr}) resulta de aplicar conceptos estadísticos, así se asegura que la resistencia de los ensayos del hormigón tengan una probabilidad alta de cumplir los criterios de aceptación de la resistencia.

La norma NCh1998 se basa en los criterios expuestos por la ACI328, estableciendo procedimientos de evaluación de la calidad del hormigón cuando la resistencia a compresión es la base de aceptación, los cuales son aplicables a las muestras extraídas según un plan de muestreo al azar de hormigón fresco endurecido. Estos procedimientos de evaluación tienen por objetivo determinar la conformidad de los resultados de la resistencia a compresión con respecto a la especificada y evaluar el nivel de control de ensayos. Cabe destacar que para los efectos de esta norma se supone que la resistencia a compresión del hormigón se distribuye en el lote de acuerdo a una curva de distribución normal.

2.6.1 Evaluación de los resultados de la resistencia mecánica

Esta norma entrega dos métodos de evaluación para el lote:

- Por grupos de muestras consecutivas (sólo si $N \geq 10$).
- Por el total de muestras.

El método elegido se estipula en las especificaciones particulares de la obra o en la norma de diseño correspondiente. En ausencia de ello deberá adoptarse el método de evaluación por muestras consecutivas, salvo que el número total de muestras del lote sea inferior a diez, en cuyo caso debe emplearse el método de evaluación por el total de muestras.

El método de evaluación por muestras consecutivas ejerce más presión sobre la calidad, ya que, después de las primeras dos muestras, hay una calificación muestra a muestra, hasta la última, lo que obliga a un permanente cuidado sobre la producción, ya que todas las resistencias influyen en la calificación total. En cambio, si los resultados del análisis por el total de muestras han estado bien, puede haber tendencia a cierta relajación al final de la producción.

Dado lo anterior, a continuación se describe el método de evaluación por grupos de muestras consecutivas, dado que este método será implementado para el análisis del control de calidad complementario.

2.6.1.1 Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas

Se considera que la resistencia de cada parcialidad del lote de hormigón es satisfactoria, si se cumplen las siguientes condiciones simultáneas:

- $f_3 \geq f_c + k_1$
- $f_i \geq f_0 = f_c - k_2$

En que:

f_3 : Resistencia media de las tres muestras consecutivas correspondientes a cada parcialidad del lote de hormigón, MPa.

f_c : Resistencia especificada a la rotura por compresión, MPa.

f_i : Resistencia individual de cada muestra, MPa.

f_0 : Límite inferior para la resistencia f_i de cada muestra. MPa.

k_1, k_2 : Constantes de evaluación.

Las constantes de evaluación k_1 y k_2 se obtiene de la Tabla 2.6.1.1. Dichas constantes se aplican tanto para probetas cúbicas como cilíndricas.

Tabla 2.6.1.1: Constantes de evaluación [MPa].

Fracción defectuosa aceptada [%]		Grado de hormigón			
		H5	H10	H15	H20 o superior
5	k_1	0.3	0.5	0.8	1.0
	k_2	0.6	1.2	1.9	2.5
10	k_1	0	0	0	0
	k_2	0.9	1.7	2.6	3.5
20	k_1	0.4	0.7	1.1	1.5
	k_2	1.4	2.7	4.1	5.5

Fuente: NCh1998.

En el caso que el lote de hormigón sometido a evaluación no cumpla con los requisitos de la norma NCh1998, se tomarán las medidas establecidas en las especificaciones particulares de la obra y la norma de diseño correspondiente. En ausencia de ellas, se podrán aplicar las medidas recomendadas en la Tabla 2.6.1.2.

Tabla 2.6.1.2: Medidas recomendadas según normativa chilena.

Antecedentes		Conclusiones	Recomendaciones
$f_3 \geq f_c + k_1$	$f_i \geq f_0$	El hormigón cumple la resistencia especificada	
$f_3 < f_c + k_1$	$f_i \geq f_0$	El hormigón no cumple la resistencia especificada	Informar a los proyectistas estructurales y considerar las penalizaciones establecidas en el contrato y sus documentos anexos.
$f_i < f_0$		El hormigón no cumple la resistencia especificada y cada resultado defectuoso debe ser considerado como un riesgo potencial	Investigación del hormigón correspondiente a los resultados defectuosos.

Fuente: NCh1998.

2.6.2 Investigación del hormigón correspondiente a los resultados defectuosos

En el caso de resistencias individuales f_i menores que el límite inferior f_0 , existe riesgo con respecto a la seguridad estructural y el hormigón afectado debe ser sometido a la investigación que ordenen los proyectistas. Sin perjuicio de lo anterior, es recomendable que se considere entre otras posibilidades, las siguientes acciones:

- Comprobar la validez del ensayo.
- Identificar la zona comprometida.
- Inspeccionar visualmente la zona y dejar constancia de los eventuales errores de colocación del hormigón.
- Realiza ensayos por métodos no destructivos.
- Extraer testigos del hormigón endurecido.

En caso de extraer testigos del hormigón endurecido, se debe extraer, como mínimo, tres testigos por cada resultado f_i defectuoso investigado. El hormigón se considera aceptable si el promedio aritmético de los tres testigos es igual o superior a $0.85f_c$ y cada resultado individual es igual o superior a $0.75f_c$.

Si la investigación confirma la existencia de hormigones defectuosos, el propietario de la obra adoptará las medidas que indiquen los proyectistas estructurales, algunas de las cuales pueden ser las siguientes:

- Rechazo del hormigón y exigencia de demolición y reposición.
- Aceptación del hormigón, condicionada a su reparación y/o refuerzo.
- Aceptación del hormigón sujeto a penalizaciones.

Independiente del método de evaluación estadístico aplicado, es posible partir de estos obtener la desviación estándar de los resultados de resistencia potencial de las muestras, dado que es indicativa de la calidad de fabricación del hormigón y por ende útil para la optimización de éste con la finalidad de reducir la cantidad de cemento en la dosificación.

2.7 Medición de huella de carbono como índice de sustentabilidad

Dado que se tiene como objetivo identificar el aporte a la sustentabilidad de la construcción del método complementario de control de calidad, debemos establecer cómo mediremos este aporte. Es aquí donde la huella de carbono cumple un rol fundamental. A continuación se describe que es la huella de carbono, como es el procedimiento de cálculo de esta y consideraciones.

2.7.1 Gases de efecto invernadero y huella de carbono

En 1997, más 100 líderes de distintos países firmaron el protocolo de Kioto sobre cambio climático, el cual busca un marco conjunto que permita enfrentar el cambio climático. En la cumbre de Kioto se alcanzó un acuerdo destinado a limitar las emisiones de seis gases de efecto invernadero (GEI): Dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). [21]

Se debe tener en cuenta que los GEI no contribuyen de igual forma al calentamiento de la atmósfera. Para tener en cuenta la contribución de cada gas, existe un parámetro denominado Potencial de Calentamiento Global (GWP, Global Warming Potential) que compara el poder de calentamiento de una masa de cierto gas de efecto invernadero con el poder de calentamiento de la misma masa de CO_2 (Ver Tabla 2.7.1.1).

Tabla 2.7.1.1: Potencial de calentamiento global (GWP).

Contaminante	GWP
CO_2	1
CH_4	23
N_2O	296
HFC	1.300
PFC	8.600
SF_6	22.200

Fuente: Inventario de emisiones a la atmósfera en la comunidad de aragón. 2006.

La huella de carbono (HC) mide la totalidad de emisiones de GEI por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, procedimiento o producto. Por lo tanto, el concepto de HC va más allá de la medición única del CO_2 emitido (masa en kg de CO_2e), ya que se tiene en cuenta todos los GEI que contribuyen al calentamiento global. Cabe mencionar que, la HC es una versión simplificada de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el que, en lugar de considerar varias categorías de impacto ambiental al mismo tiempo, se considera únicamente una de ellas, la relativa a Calentamiento Global. [22]

2.7.2 Procedimiento general de cálculo de huella de carbono

Para la descripción del procedimiento de cálculo de huella de carbono se utiliza como base lo indicado en el documento “Enfoques Metodológicos para el cálculo de la huella de carbono”, Desarrollado por el Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE). [23]

Existe dos tipos de enfoques metodológicos básicos para el cálculo de la huella de carbono: el primero centrado en organizaciones y el segundo centrado en el producto. hay alrededor de 60 metodologías para el cálculo de HC de productos, de estas, las más utilizadas se basan en el análisis de ciclo de vida (ACV). Estas metodologías consisten básicamente en recopilar toda la información sobre el consumo de materias primas y energía en cada una de las etapas de producción, y convertirla a emisiones de CO_2e .

A continuación se describe las principales tareas y cálculos a realizar para obtener la HC de productos.

2.7.2.1 Identificación de la cadena de suministradores, producto y unidad funcional

El ciclo de vida debe contemplar las emisiones derivadas de:

- Obtención, transformación, distribución de las materias primas.
- Actividades necesarias para convertir las materias primas en el producto terminado.
- Reciclaje o eliminación del producto.
- Almacenaje y transporte entre cada fase del proceso.
- Distribución del producto.
- Uso que el consumidor final haga del producto.

Es sumamente necesario determinar el producto a estudiar e identificar su unidad funcional así como todas las empresas que conforman la cadena de suministradores vinculada con el ciclo de vida elegido.

La cadena de suministradores que participa en la elaboración y distribución de un producto es una red con participación de muchas empresas relacionadas a partir de la adquisición de bienes y servicios, pero en la práctica se forma una cadena de suministradores lineal integrada por las empresas más representativa de la fase de materias primas, producción, distribución, consumo, eliminación y reciclaje.

2.7.2.2 Elaboración de mapas de procesos

Análisis de los procesos que generan emisiones de GEI de las empresas participantes en la cadena de suministradores. Para facilitar esta tarea se realizan mapas de procesos, el que es un gráfico que identifica todas las actividades que generan emisiones de GEI, incluyendo relaciones entre si.

Los mapas de procesos muestran de modo simple y claro cada uno de los input y output del proceso que generan GEI, abarcando el ciclo de vida completo del producto, visualizando las variadas relaciones de cada una de las fases.

2.7.2.3 Recogida de datos

Recopilación de información que brinde datos para estimar las emisiones generadas en los distintos procesos y actividades identificados en el mapa de procesos. Algunos de los datos necesarios son:

- Estimación de la cantidad de materiales y energía de cada uno de los procesos del mapa de procesos.
- Factores de emisión de las actividades implicadas en los procesos.

Si no se dispone de datos primarios del ciclo de vida estudiado, se debe recurrir a datos secundarios, los que se obtienen de fuentes externas relativas a actividades, procesos y productos similares a los estudiados.



Figure 2.7.1: Ciclo de vida del producto.

Fuente: BSI (2008b)

2.7.2.4 Cálculo de la huella de carbono

La norma PAS 2050 es una especificación para verificar la huella de carbono en el ciclo de vida de un producto o servicio. Creada por el BSI (British Standards Institution) en 2008, es una de las metodologías más usadas de forma voluntaria por las empresas.

De acuerdo a la PAS 2050, la HC se calcula multiplicando los datos de actividad por un factor de emisión unitario, que recoge las emisiones de CO_2e por dato de actividad unitario (Figura 2.7.2).



Figure 2.7.2: Formula huella de carbono.

Fuente: BSI (2008b)

2.7.2.5 Medidas para reducir la huella de carbono

Como premisa de partida, se señala que cualquier acción encaminada a reducir el consumo de electricidad y/o combustible redundará en menores emisiones y, por lo tanto, una menor huella de carbono vinculada a esos conceptos. Por ejemplo, eliminando consumos que no son necesarios (p. ej. la iluminación de estancias en periodos donde no se realiza ningún tipo de actividad); sustitución de maquinaria, equipos y cualquier otro tipo de aparato que consuma electricidad y/o combustibles, por otros más eficientes o induciendo mejoras en las infraestructuras que redunden en ahorro energético.

La adquisición de un determinado producto implica, al mismo tiempo, la adquisición de las cargas ambientales generadas en las fases de producción anteriores, de las que la empresa adquiriente se hace responsable, en este caso, cabe tratar de buscar proveedores que tengan certificado algún sistema de gestión ambiental o que, al menos, puedan demostrar prácticas recomendadas, como el uso de biocombustible, el reciclaje de materiales o una generación de residuos por tonelada baja.

La HC generada por los residuos se centra en el cómputo de las emisiones generadas en su tratamiento (incineración, enterramiento, preparación para su revalorización, etc.), incluyendo también las emisiones generadas en el transporte al vertedero o al punto donde vayan a ser tratados. La reducción de la HC pasa principalmente por generar la menor cantidad de residuos posibles. se deberá considerar la reducción de consumos innecesarios, su reutilización y reciclaje, y la búsqueda de una mayor eficiencia en la gestión de los materiales.

En el caso de los residuos que van a ser reciclados, la empresa productora del residuo computa sólo la huella de su preparación en la planta de tratamiento central (separación, clasificación, limpieza, etc.) De este modo, una misma cantidad de un mismo residuo que no se recicla y de otro que pase por este proceso, generará una huella menor en el último caso.

Capítulo III

Propuesta de control de calidad complementario

3.1 Control de la resistencia mecánica con método de madurez aplicado al sobre-muestreo establecido en ciertos proyectos de construcción

La intención de reemplazar el control de resistencias a través de probetas de hormigón por el método de madurez en la cuota de sobre-muestreo, es reducir los residuos de hormigón y el impacto medio ambiental de este. Para esto se debe definir el porcentaje promedio de sobre-muestreo, cubicar la cantidad de hormigón destinado a ensayos de sobre-muestreo y determinar la huella de carbono de una unidad de m^3 de hormigón.

3.1.1 Huella de carbono de las metodologías en estudio

Para estimar el beneficio medioambiental derivado del uso del método de madurez como control de resistencias mecánicas de hormigones en vez de la realización de ensayos de probetas a compresión (control de resistencia potencial), debemos definir las actividades asociadas a la aplicación de ambas metodologías (traslado, toma de muestras, aplicación del ensayo, etc), para así establecer la huella de carbono emitida por cada una de ellas, para finalmente calcular y comparar la huella de carbono de los métodos de interés (método de madurez y control de resistencia potencial).

3.1.1.1 Huella de carbono del control de resistencia potencial a través probetas de hormigón

Las actividades asociadas al control de resistencia potencial a través de probetas de hormigón que generan huella de carbono son las siguientes:

- Producción del hormigón utilizado en ensayo.
- Transporte de muestra al laboratorio.
- Realización ensayo en laboratorio.

A continuación se estima la huella de carbono asociada a cada una de las actividades nombradas anteriormente.

Huella de carbono de la producción del hormigón

La huella de carbono asociada a los hormigones convencionales de mayor uso en el país, específicamente de los hormigones G25 y G35 (NCh170), será la establecida por el documento “Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile” [24]. Este documento no considera en la huella de carbono del hormigón el reciclaje de los productos al final de su vida útil. Si no que sólo considera la fase de elaboración del producto. La siguiente figura muestra el mapa de procesos de producción del hormigón (Ver figura 3.1.1).

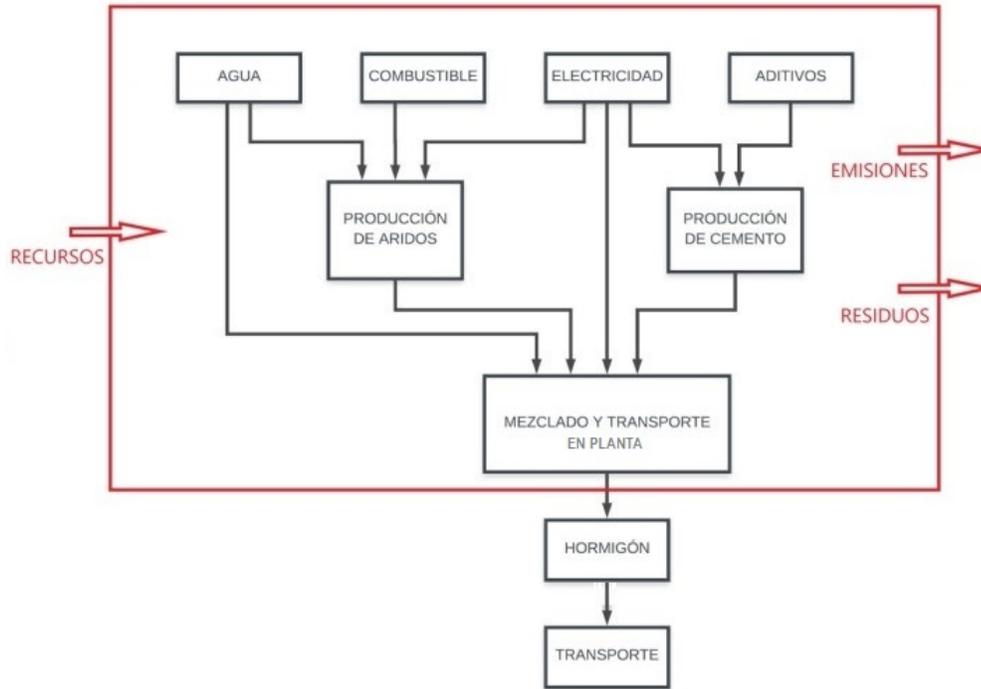


Figure 3.1.1: Mapa de procesos - producción del hormigón.

Fuente: Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile.

La unidad basal declarada corresponde a $1m^3$ de hormigón, y la dosificación considerada correspondiente a cada mezcla se muestra en la Tabla 3.1.1.1.

Tabla 3.1.1.1: Dosificaciones hormigón G25 y G35.

Producto [kg/m^3]	Hormigón	
	G25	G35
Cemento	280	360
Gravilla	990	920
Arena	900	890
Agua Extra	140	162

Fuente: Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile.

Para obtener la huella de carbono, el documento anteriormente nombrado ocupa la huella de carbono producto de la modelación hecha por la unidad de sustentabilidad Organizacional del centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) en el proyecto “ECOBASE - Construcción” [25, 26], el cual es el primer esfuerzo de investigación en Chile por generar los inventarios de ciclo de vida del hormigón. En la Tabla 3.1.1.2, se presentan los valores de la huella de carbono para las mezclas G25 y G35.

Tabla 3.1.1.2: Huella de carbono producción de hormigón G25 y G35.

Producto [$1m^3$]	Huella de carbono [$kg CO_2e$]
G25	230,8
G35	289,1

Fuente: Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile.

Cubicación muestra hormigón fresco destinado a ensayo de resistencia mecánica

Para la cubicación del hormigón destinado a sobre-muestreo se considera que una muestra consta de tres probetas cilíndricas. La norma NCh1017 establece que la dimensión de la base de los moldes cilíndricos debe ser preferentemente de 15cm y altura de 30cm. Luego, la norma NCh171 indica que el tamaño de la muestra de hormigón fresco debe ser superior a una y media vez el volumen necesario para efectuar los ensayos requeridos, y en ningún caso inferior a 30L. Con lo anterior se cubica el tamaño de muestra de hormigón fresco necesario para la toma de una muestra de hormigón destinado a ensayo de resistencia mecánica. (Tabla 3.1.1.3)

Tabla 3.1.1.3: Cubicación tamaño muestra hormigón fresco.

Volumen probeta cilíndrica	5,3L
Volumen 1 muestra (3 probetas)	16L
Tamaño muestra hormigón fresco según NCh171	40L

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior concluimos que para la toma de una muestra de ensayo se utiliza 40L de hormigón fresco. Finalmente, la huella de carbono asociada al hormigón producido para una toma de muestra se define en la tabla 3.1.1.4

Tabla 3.1.1.4: Huella de carbono producción de hormigón G25 y G35 para una muestra de 40L.

Producto	Huella de carbono
[40L]	[<i>kg CO₂e</i>]
G25	9,2
G35	11,6

Fuente: Elaboración propia

Huella de carbono del transporte de muestra al laboratorio

Para el cálculo de la huella de carbono asociado al transporte de muestra al laboratorio, se aplica el factor de emisión correspondiente a un vehículo ligero que utiliza combustible diésel en un viaje 30 km aproximadamente (ida y vuelta) dentro de la ciudad. Tal factor de emisión se rescató del documento “Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)” [29].

Tabla 3.1.1.5: Huella de carbono transporte de muestras.

Factor de emisión [g CO_2/km]	287,14
Distancia recorrida promedio ida y vuelta [km]	30
Huella de carbono transporte de muestra al laboratorio [kg CO_2e]	8,6

Fuente: Elaboración propia.

Huella de carbono de la aplicación del ensayo

Para estimar la huella de carbono de la aplicación, se requiere el consumo eléctrico de la máquina de ensayo, como también el factor de emisión de generación de energía eléctrica. tales valores se muestran a continuación.

Tabla 3.1.1.6: Huella de carbono aplicación ensayo.

factor de emisión generación energía eléctrica (SIC) [kg CO_2e / kwh] [27]	0,34
Consumo energía eléctrica maquina de ensayo [kwh][28]	0,8
Duración ensayo de compresión [min]	4
Huella de carbono de aplicación del ensayo a compresión [kg CO_2e]	0,018
Huella de carbono aplicación ensayo por muestra [kg CO_2e]	0,054

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, la Tabla 3.1.1.7 muestra la huella de carbono del control de resistencia potencial a través probetas de hormigón en función del tipo de hormigón utilizado.

Tabla 3.1.1.7: Huella de carbono del control de resistencia potencial a través probetas de hormigón G25 y G35.

Producto	Huella de carbono
-	[kg CO_2e x muestra]
G25	17,89
G35	20,22

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2 Huella de carbono de la aplicación del método de madurez

Una de las opciones para aplicar el método de madurez es la utilización de un sensor inalámbrico impermeable que permite el monitoreo y seguimiento en tiempo real de la temperatura y la resistencia de hormigón. El dispositivo se debe colocar en las barras de acero dentro del moldaje antes de verter el hormigón.

Para la estimación de la huella de carbono de la aplicación del método de madurez, se debe considerar las siguientes actividades:

- Fabricación del sensor inalámbrico.
- Importe del dispositivo
- Transporte sensor a obra.

A continuación se estima la huella de carbono asociada a cada una de las actividades nombradas anteriormente.

Fabricación del sensor inalámbrico: La huella de carbono asociada a la fabricación del sensor inalámbrico es 1,49 kg CO_2e , dato obtenido desde la empresa productora [30]. La figura 3.1.2 muestra el mapa de procesos de producción y transporte del sensor inalámbrico.

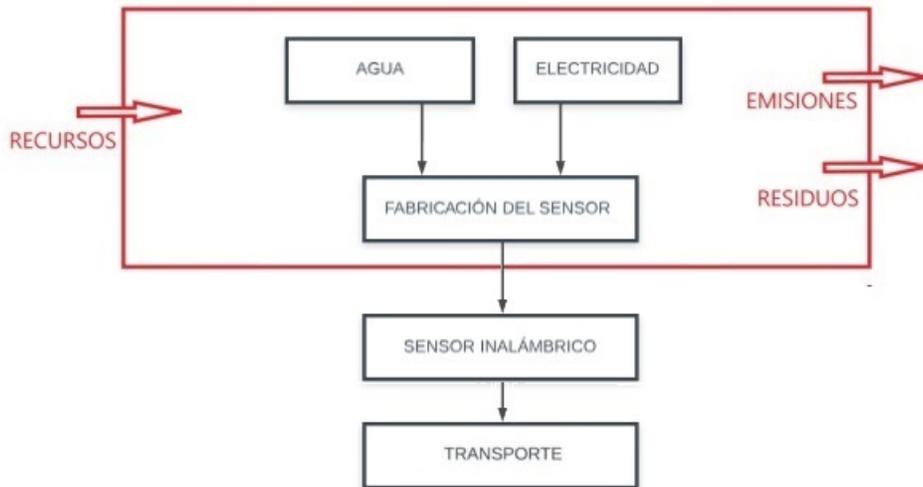


Figure 3.1.2: Mapa de procesos - fabricación sensor inalámbrico.

Fuente: Empresa productora.

Importación del sensor: El importe del sensor se realiza por vía aérea desde Canadá a Chile, pasando por Estados Unidos. Por lo que para calcular la huella se considera cada uno de los viajes, en base a lo dispuesto por el documento “ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology” [31]. La Tabla 3.1.1.8 muestra los datos asociados a este ítem.

Tabla 3.1.1.8: Huella de carbono transporte sensor.

Factor de emisión avión por kg transportado [kg CO_2e] [32]	10,98
Peso sensor [g]	50
Huella de carbono importación sensor [kg CO_2e]	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Transporte sensores a obra: Para el cálculo de la huella de carbono asociado al transporte del sensor a la obra, se aplica los mismos datos que se utilizó en el transporte de muestras a laboratorio. Pero dado que en un viaje se transporta todos los sensores, el valor de huella de carbono correspondiente al transporte de estos se suma sólo una vez.

Tabla 3.1.1.9: Huella de carbono transporte sensor a obra.

Factor de emisión [g CO_2/km]	287,14
Distancia recorrida promedio ida y vuelta [km]	30
Huella de carbono transporte de sensor a obra [kg CO_2e]	8,6

Fuente: Elaboración propia.

Resumiendo, la huella de carbono asociada a la aplicación del método de madurez es 10,64kg CO_2e .

3.1.2 Beneficio en CO_2e por reemplazo de metodología

Dado que se obtuvo la huella de carbono para la aplicación del método convencional de control de resistencias mecánicas y del método de madurez, es posible realizar la comparación de impacto ambiental de ambas metodologías.

Tabla 3.1.2.1: Comparación huella de carbono metodologías de control de resistencias mecánicas.

Tipo de hormigón utilizado [-]	G25	G35
Huella de carbono aplicación método convencional [kg CO_2e]	17,89	20,22
Huella de carbono aplicación método de madurez [kg CO_2e]	10,64	
Huella de carbono ahorrada por muestra [kg CO_2e]	7,25	9,58

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta un gráfico con los resultados anteriormente expuestos (Ver Figura 3.1.3).

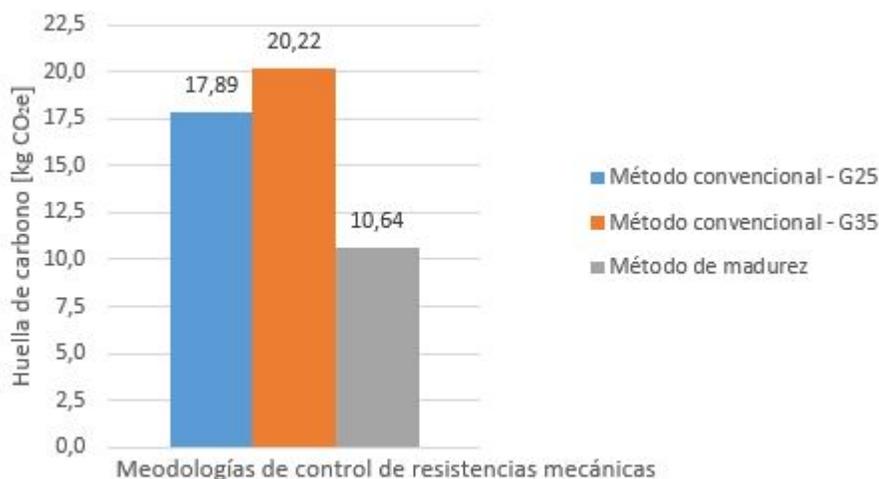


Figure 3.1.3: Comparación HC metodologías de control de resistencias mecánicas.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Optimización de la dosificación a través de análisis de evaluación estadística de resultados de resistencia obtenidos en proceso de control de calidad

El diseño de mezcla es un procedimiento por medio del que se determina las diferentes proporciones de los materiales a emplear para el hormigón de acuerdo al uso que tendrá y a las cualidades deseadas en cuanto a resistencia a la compresión, su durabilidad y trabajabilidad, así como el costo que representará el obtener la mezcla deseada.

Dado lo mencionado anteriormente, el diseño de mezcla no considera en su desarrollo (a menos que esté especificado) el impacto ambiental. El artículo “Impact of concrete quality on sustainability” [1] muestra como mejoras en la dosificación del hormigón juega un rol importante en el desarrollo de la producción con reducido impacto ambiental, y en consecuencia, contribuyendo al desarrollo sustentable en la construcción con hormigón.

3.2.1 Desplazamiento de la curva de resistencia

Tal cómo describe el punto 2.6.1.1 del presente documento, el análisis mediante grupos de muestras consecutivas (medias móviles) exige que la resistencia individual de cada muestra (f_i) sea mayor al límite inferior para la resistencia (f_o) el que depende de la resistencia especificada a la rotura por compresión (f_c), valor establecido conforme el grado del hormigón especificado.

El valor f_i de cada muestra depende en gran medida de la cantidad de cemento indicada en la dosificación, por lo que una disminución del cemento de la mezcla en función del tamaño de la brecha entre el menor valor de f_i del total de muestras y f_o desencadena que la curva de resistencia se desplace hacia la izquierda. Dicho cambio en los resultados, cumple con lo especificado en el análisis mediante grupos de muestras consecutivas, pero esta vez la dosificación está optimizada.

3.2.2 Disminución de la desviación estándar del conjunto de muestras

La dispersión de los resultados de resistencia a la compresión del hormigón, puede ser medida a través del parámetro estadístico de desviación estándar (S), que se define como el promedio de las desviaciones individuales de cada resultado con respecto a la media del total de muestras. Una S baja indica que la mayor parte de los resultados tienden a estar agrupados cerca del valor esperado, mientras que una S alta indica que los resultados se extienden sobre un rango de valores más alto. Por lo que S es representativo de cuán óptimo es el proceso de fabricación de hormigón.

Según el documento *Impact of concrete quality on sustainability*, al reducir la dispersión de los resultados de resistencia a la compresión media requerida del hormigón (f_{cr}), se reduce sustancialmente los problemas de resistencias bajas, por ende disminuye junto con los resultados defectuosos que podrían ser considerados riesgo potencial según NCh1998. Por otro lado, una baja desviación estándar reduce las sobre-resistencias registradas, lo que implicará un ajuste de cemento en la mezcla al optimizar la dosificación.

Dado lo anterior, el análisis de la dispersión de los resultados es un excelente indicador de la calidad de las mezclas de hormigón sustentable, contribuyendo a la optimización de esta, y disminuyendo la huella de carbono, por ende, su impacto ambiental.

A modo de ejemplo, a continuación la Tabla 3.2.2.1 muestra la resistencia promedio requerida (f_{cv}), calculada para la resistencia a compresión $f'_c = 27,6MPa$, basada en el ACI318 y ACI301, requerimientos para distintos niveles de calidad del hormigón (ACI 214R) como de la desviación estándar.

Tabla 3.2.2.1: Resistencia promedio requerida, calculada para la resistencia $f'_c = 27.6MPa$.

QC Standards (ACI 214R)	Excellent	Very Good	Good	Fair		Poor	
S [MPa]	2,4	3,1	3,8	4,5	5,2	6,6	8,6
f'_{cr} [MPa]	30,8	31,8	32,9	34,5	36,2	39,4	44,2
Cementitious content [kg/m^3]	265	273	284	298	311	339	380
CO_2e [kg/m^3]	275	283	293	307	321	348	390

Fuente: Impact of concrete quality on sustainability.

Según el mismo documento, los datos de la Tabla 3.2.2.1 se basa en la suposición de que 1kg de cemento representa un incremento de resistencia a la compresión de 0,15MPa. Finalmente, se estima que el contenido de cemento para la mezcla con S=8,6MPa es 43% más alto que para la mezcla con S=2,4MPa.

3.2.3 Optimización de la mezcla de hormigón

La mezcla de hormigón está compuesta por cemento, áridos (grava, gravilla, arena), aditivos, adiciones y agua. La optimización de la dosificación de la granulometría, aditivos (acelerador/retardador de fraguado, aireante, plástificante, etc) y adiciones (humo de sílice, ceniza volante, escoria de alto horno), puede reducir el contenido de cemento necesaria en la mezcla manteniendo o mejorando la sustentabilidad, rendimiento, costo, durabilidad y trabajabilidad. [33]

Del volumen total de la mezcla de hormigón, el cemento es el segundo componente en mayor abundancia (entre 25 y 40%), tanto por el nivel de contaminación que conlleva su producción como por su costo, es que en la optimización de la mezcla se busca reducir la dosis de cemento. Sin embargo, esta reducción debe respetar la dosis mínima requerida en función del requisito específico de durabilidad especificado por el calculista del proyecto, de acuerdo a cláusula 6 de la norma NCh170, la cual indica que el contenido de cemento no debe ser menor a $240\text{kg}/\text{m}^3$. Por otro lado, debido a que la disminución de la cantidad de cemento en la mezcla afecta la trabajabilidad de esta, será necesario la incorporación de aditivos, cuyo ítem no se desarrolla en el presente documento.

Capítulo IV

Aplicación del control de calidad complementario

Dada las propuestas de control de calidad complementario, en este capítulo se aplicará tales propuestas a un edificio habitacional de hormigón, el que ha de ser representativo de las estructuras de este tipo a nivel nacional. Con tal fin, en primer lugar se define la geometría del edificio habitacional en Chile. Seguidamente, se aplica el control de calidad complementario para finalmente, cuantificar el aporte de este. Dicho aporte es cuantificado en ahorro de m^3 de hormigón y en reducción de huella de carbono.

4.1 Tipificación edificio habitacional

4.1.1 Información general

Para caracterizar geoméricamente el edificio habitacional tipo en Chile (EHT), nos basaremos en la información brindada por el documento “Breve identificación del edificio ByB” [34] el cual tiene por objetivo identificar y describir los parámetros característicos de los edificios diseñados en la empresa “ByB Ingeniería Ltda”. La base de datos de edificios de hormigón armado tiene un total de 410 edificios (considerando sólo edificios de más de cuatro pisos) analizados entre los años 1994 y 2018. Los edificios son agrupados según su distribución territorial, presentándose con gran concentración en la Región Metropolitana (83%), siendo seguida con una presentación mucho menor por la Región del Maule (5%), la Región de Valparaíso (3%), la Región del Bío Bío (3%) y otras Regiones (6%) (Ver figura 4.1.1).

Distribución territorial

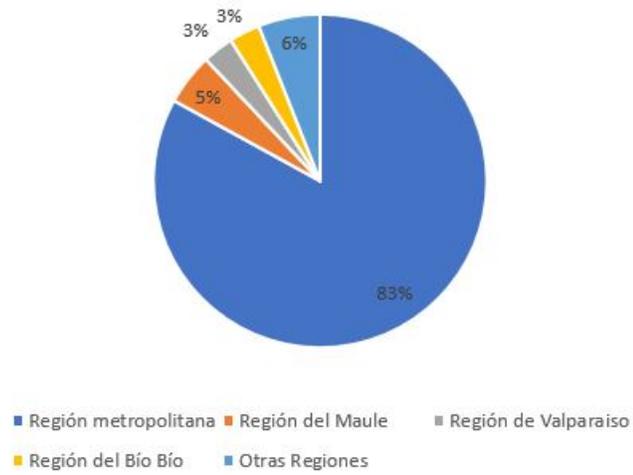


Figure 4.1.1: Cobertura Regional del Edificio ByB.

Fuente: Breve identificación del edificio ByB.

En lo relativo a su geometría, los edificios considerados en el presente estudio (entre 3 y 30 pisos) tienen entre 10m y 94m de altura (medida desde el nivel basal), con un valor promedio de 40m. El número de pisos sobre la superficie varía entre 4 y 30 con un promedio de 12. El número de subterráneos varía entre 0 y 6, con un promedio de 2 subterráneos.

La altura promedio por piso es de 2,96m, no obstante se debe considerar que en este cálculo la sala de máquinas no se contabiliza como un nivel, aún cuando si se incluye en la estimación de la altura basal. Además se debe aclarar que la altura total incluye la altura del sistema de fundación, es decir, ciertamente existe una sobreestimación de la altura por piso. Sin indicar las limitaciones en su estimación, el edificio chileno se ha estimado con una altura de 2,7m por piso.

La superficie promedio por piso, asumiendo una planta rectangular, permite establecer dimensiones típicas de 25m por 35m ($875m^2$). Notar que comúnmente la superficie por piso de los niveles superiores es inferior a la de plantas de subterráneos que cubren el doble o más superficie que la proyección de la torre. Dicha situación es incluso frecuente en proyectos que incluyen varias múltiples torres, estando estas dilatadas o no.

La Tabla 4.1.1.1 muestra la densidad de muros (razón entre la superficie de muros en cada dirección y la superficie de planta) en piso tipo y primer subterráneo, considerando un total de 60 edificios entre el 2007 y 2017. cabe destacar que al menos el 96% de los edificios mostraron una densidad de muros del piso tipo superior a 1,5% en una de sus dos direcciones de análisis.

Tabla 4.1.1.1: Rango y valor promedio de densidad de muros, edificio tipo ByB.

	Valor promedio	Rango
Piso tipo	2,88%	1,05% - 5,63%
Primer subterráneo	2,78%	0,89% - 5,25%

Fuente: Breve identificación del edificio ByB.

Existe una relación entre la altura o el número de pisos y la densidad de muros. La tendencia indica que a mayor altura, mayor es la densidad de muros. Un indicador práctico que se puede emplear, es el que muestra la Tabla 4.1.1.2.

Tabla 4.1.1.2: Relación rango de pisos con densidad de muro.

Rango pisos	Densidad de muro
Hasta 10	2,37%
10 - 20	3,17%
más de 20	3,21%

Fuente: Breve identificación del edificio ByB.

La última característica general del edificio ByB guarda relación con su masa y peso. La masa se calcula con el peso propio de los elementos estructurales y la contribución de otras cargas permanentes (ej. Rellenos de tierra o materiales de terminaciones). Considerando un edificio tipo con las siguientes características:

- Planta con densidad de muros promedio para un edificio entre 10 y 20 pisos (3,17%).
- Rango de espesores de losas de 0,15m y 0,2m.
- Altura entre piso de 2,5m.
- Se ignora el aporte de masa de las vigas.

Con los datos anteriores, se puede señalar que la masa total por unidad de área consistente con el cálculo anterior se encuentra en el rango 0,7-0,9 T/m^2 (Ver Tabla 4.1.1.3).

Tabla 4.1.1.3: Masa unitaria de una planta promedio del Edificio ByB.

Espesor losa	15 [cm]	20 [cm]
Densidad de muros	3,17%	3,17%
Superficie de losa	1 [m^2]	1 [m^2]
Superficie de muros	0,0634 [m^2]	0,0634 [m^2]
Masa en muros (M_M)	0,38 [T/m^2]	0,38 [T/m^2]
Masa en losas (M_L)	0,375 [T/m^2]	0,5 [T/m^2]
Masa total (M_T)	0,75 [T/m^2]	0,85 [T/m^2]

Fuente: Elaboración propia en base a documento Breve identificación del edificio ByB.

Con los datos anteriores es posible cubicar el hormigón de un edificio habitacional tipo, el que tiene las siguientes características:

- 12 pisos y 2 subterráneos
- Doble de dimensión de planta de subterráneo ($1.750m^2$) con respecto a planta de piso superior ($875m^2$).

Finalmente, se obtiene un rango de volumen de hormigón de 4.000-5.500 m^3 por edificio habitacional tipo.

4.1.2 Muestreo y sobre-muestreo en edificio habitacional tipo

Dado que el caso de estudio es un edificio habitacional tipo, el que es construido con hormigón procedente de central hormigonera, la toma de muestra debe ser realizada en base a lo establecido por norma NCh170, es decir, cada $150 m^3$ considerando un mínimo de 5 muestras. En contraste, dado lo establecido en el punto 5.1.2 del presente documento (Frecuencia de muestreo según tipo de proyecto - Proyecto obra privada) en promedio se realiza 100% de sobre-muestreo respecto al muestreo mínimo establecido, es decir, se considera que la toma de muestras se realiza cada $75m^3$ de hormigón, lo cual significa que en un edificio habitacional tipo en el cual no se considera la aplicación del método de madurez, se ha de realizar el método convencional (MC) entre 54 y 74 veces.

Tabla 4.1.2.1: Huella de carbono generada al aplicar método convencional en cuota total de control de resistencias mecánicas.

Característica	Rango	
Característica edificio habitacional tipo [-]	G25 - Losa 15cm	G35 - Losa 20cm
Cubicación hormigón EHT [m^3]	4.000	5.500
Cantidad de muestras [-]	54	74
utilización de hormigón [m^3]	2.2	3
Generación de HC [$kg CO_2e$]	965,8	1496,1

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.1.2.1 muestra que en un edificio tipo en el que se realiza 100% de sobre-muestreo aplicando solamente el método convencional, genera una huella de carbono debido al control de resistencias mecánicas entre $13 ton CO_2e$ y $18ton CO_2e$.

4.2 Aplicación del método de madurez para el sobre-muestreo contemplado para control de resistencias mecánicas de una obra de edificación

Según lo establecido en el punto 4.1.1 (Tipificación edificio habitacional tipo - Información general) la cantidad de hormigón utilizado en un edificio habitacional tipo es entre $4.000m^3$ y $5.500m^3$, al considerar la aplicación del método convencional en la cuota de muestreo y método de madurez en la cuota de sobre muestreo, este último ha de ser realizado entre 27 y 37 veces.

La siguiente tabla, muestra la huella de carbono (HC) en un edificio habitacional tipo al aplicar control de resistencia potencial con probetas de hormigón en cuota de ensayo mínima indicada en norma NCh170 complementado con el método de madurez (MM) en cuota de sobre-muestreo de control de resistencias mecánicas, considerando para el edificio habitacional de menor cubicación hormigón grado G25 y para el de mayor cubicación hormigón grado G35, siendo estos casos extremos que permiten obtener un rango de ahorro de huella de carbono.

Tabla 4.2.0.1: Huella de carbono generada al aplicar método de madurez en cuota de sobre-muestreo de control de resistencias mecánicas.

Característica	Rango	
	G25 - Losa 15cm	G35 - Losa 20cm
Característica EHT [-]		
Cubicación hormigón EHT [m^3]	4.000	5.500
Cantidad de muestras de cada método [-]	27	37
HC al aplicar MC en cuota mínima según NCh170 [$kg CO_2e$]	482,9	748,1
HC al aplicación MM en cuota de sobre-muestreo [$kg CO_2e$]	287,3	393,7

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Tabla 4.2.0.2 señala que al complementar ambos métodos de control de calidad del hormigón se disminuye la huella de carbono en un rango de 20% y 24% por edificio habitacional tipo.

Tabla 4.2.0.2: Beneficio de complementar método convencional de control de calidad con método de madurez aplicado a cuota de sobre-muestreo.

Característica	Rango	
Característica EHT [-]	G25 - Losa 15cm	G35 - Losa 20cm
Cubicación hormigón EHT [m^3]	4.000	5.500
HC al aplicar sólo control de resistencia potencial [$kg CO_2e$]	965,8	1.496,1
HC generada al complementar ambos métodos [$kg CO_2e$]	770,2	1.141,7
HC ahorrada al complementar ambos métodos [$kg CO_2e$]	195,6	354,4
Disminución porcentual HC [%]	20	24

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Optimización de la dosificación del hormigón suministrado a través de análisis de evaluación estadística de resultados de resistencia

La aplicación de la optimización de la dosificación de la mezcla de hormigón se realizará a 6 sets de datos correspondientes a edificios de hormigón de uso habitacional de tamaño y características similares a las del edificio tipo descrito en el punto 4.1, los que corresponde a hormigón grado G25 y G35, con docilidad entre 10 y 14 cm. Cada sets de datos contiene los resultados de ensayos de resistencia a la compresión a través del método convencional. La Tabla 4.3.0.1 muestra la característica de cada mezcla, la cantidad de muestras y cantidad de cemento por cada una.

Tabla 4.3.0.1: Identificación de datos para cada edificio habitacional tipo (EHT).

EHT	Tipo mezcla	Cantidad cemento [kg/m^3]	Cantidad muestras [-]	Desviación estándar [MPa]
1	G25(90)-20-10	280	100	3,5
2	G25(90)-20-14	300	85	2,7
3	G25(90)-40-10	270	100	3
4	G25(90)-40-12	270	73	3,1
5	G35(90)-20-10	320	80	3,9
6	G35(90)-40-10	310	82	3,5

Fuente: Reportes de carga hormigón G25 y G35.

4.3.1 Aplicación evaluación estadística

Cada uno de los sets de datos fueron evaluados estadísticamente mediante grupos de muestras consecutivas descrito en el punto 2.6.1 del presente documento. En cada uno de los resultados el hormigón cumple la resistencia especificada. Ver Anexo A.

4.3.2 Desplazamiento de la curva de resistencia

A continuación la Tabla 4.3.2.1 muestra cuánto disminuye la cantidad de cemento por metro cúbico de mezcla de hormigón al aplicar el desplazamiento de la curva de resistencia en cada uno de los edificios estudiados. La huella de carbono asociada a la producción de 1kg de cemento es 0,8 $kg CO_2e$. [35]

Como consecuencia de la disminución de la cantidad de cemento por metro cúbico de mezcla de hormigón, se genera una disminución de la resistencia a la compresión promedio (de \bar{f}_{ico} a \bar{f}_{icd}) esto debido a que todos los valores f_i se desplazan hacia la izquierda, conservando su distribución, es decir, conservando la desviación estándar. Lo anterior queda representado la figura 4.3.1 la que contiene dos gráficos; EHT1 y EHT5, con hormigón G25 y G35 respectivamente. En tales figuras, la curva azul es generada con los datos originales de resistencia a la compresión y la curva gris con los datos desplazados.

Tabla 4.3.2.1: Consecuencia de desplazar la curva de resistencia.

EHT	Δf_i [MPa]	f_{ico} [MPa]	f_{icd} [MPa]	#Cem cd [kg/m^3]	Δ Cem [kg/m^3]
1	2,2	35	33	263	17
2	3,2	34	31	272	28
3	3,8	35	31,3	241	29
4	3,1	34,5	31,4	246	24
5	1,9	43,7	41,9	306	14
6	2,0	44,3	42,3	296	14

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

Δf_i : Diferencia entre f_o y menor valor de f_i , MPa.

\bar{f}_{ico} : Resistencia a la compresión promedio de la curva original, MPa.

\bar{f}_{icd} : Resistencia a la compresión de la curva desplazada, MPa.

#Cem cd: Cantidad de cemento en la mezcla de la curva desplazada, kg/m^3 .

Δ Cem: Diferencia entre cantidad de cemento curva original y curva desplazada, kg/m^3 .

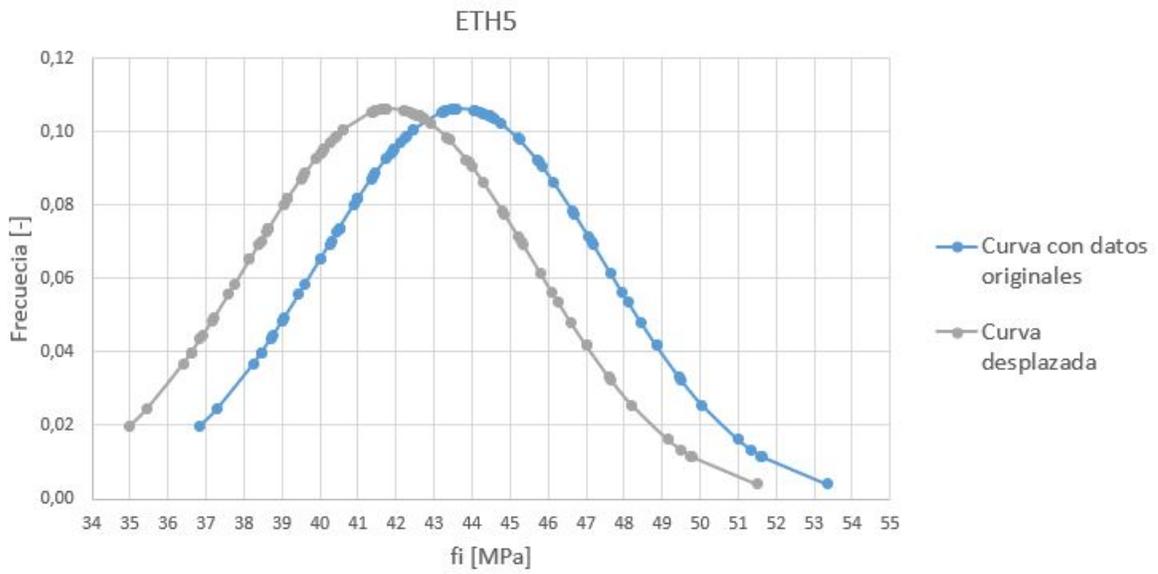
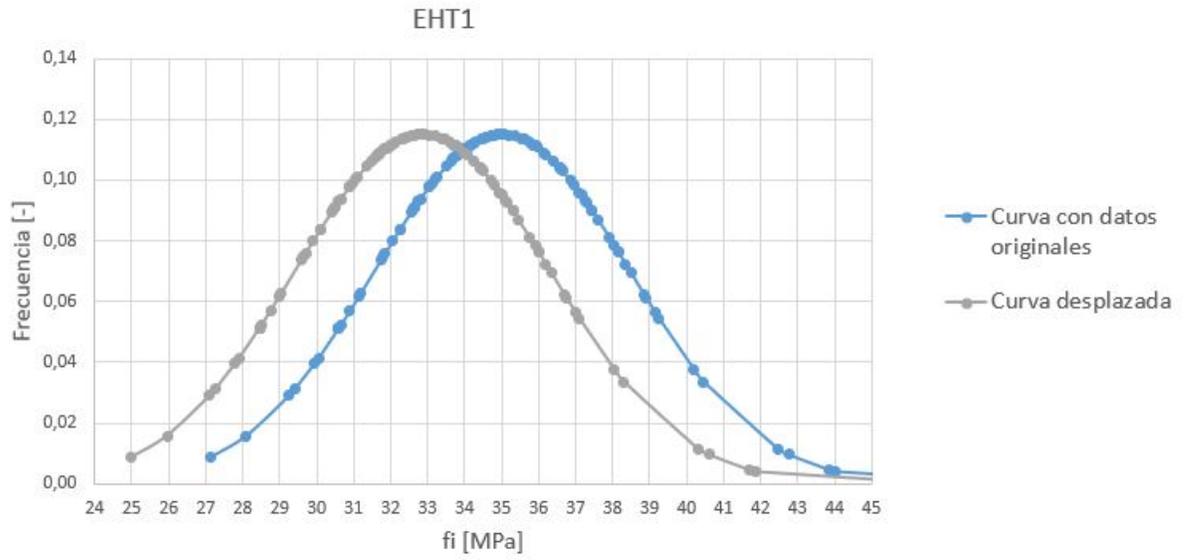


Figure 4.3.1: Curva de resistencia - Desplazamiento de curva - EHT1 y EHT5.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.3.2.2 se puede apreciar la cantidad de cemento ahorrado en una edificación habitacional tipo para cada tipo de mezcla, al aplicar el desplazamiento de la curva de resistencia. Junto con la huella de carbono ahorrada como consecuencia de la disminución de cemento utilizado. De esta tabla se puede concluir que al aplicar optimización de la mezcla a través del desplazamiento de la curva de resistencia, en un EHT construido con hormigón G25 es posible ahorrar entre 68 *ton* y 116 *ton* de cemento, lo que es equivalente a un rango entre 54.400 *kg CO_{2e}* y 92.800 *kg CO_{2e}*. Por otro lado, en un EHT construido con hormigón G35 es posible ahorrar 77 *ton*, lo cual tiene una huella de carbono asociada de 61.600 *kg CO_{2e}*.

Tabla 4.3.2.2: Beneficio de desplazar la curva de resistencia en EHT.

EHT	Ahorro de cemento [<i>ton</i>]	Disminución huella de carbono [<i>kg CO_{2e}</i>][35]
1	68	54.400
2	112	89.600
3	116	92.800
4	96	76.800
5	77	61.600
6	77	61.600

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Disminución de la desviación estándar del conjunto de muestras

La siguiente tabla muestra la cantidad de cemento requerida por metro cúbico tanto con los datos originales de cada edificio habitacional tipo estudiado, como también para desviaciones estándares menores, calificadas en la tabla 2.2.1 como muy buenas (desviación estándar igual a 3,1MPa) y excelente (desviación estándar igual a 2,4MPa), asignando además a cada una de éstas el respectivo promedio de resistencia mecánica a la compresión de las muestras correspondiente al proyecto.

Al analizar la disminuir de la desviación estándar (δ) de la resistencia mecánica a la compresión de las muestras, el menor valor f_i aumenta su distancia respecto a f_o , provocando que el desplazamiento de la curva de resistencia sea mayor que en el estudio anterior (caso en el que no se modifica δ), representado en la figura 4.3.2 la que contiene dos gráficos; EHT2 y EHT6, con hormigón G25 y G35 respectivamente. En tales figuras, la curva azul es generada con los datos originales de resistencia a la compresión, la curva naranja con la desviación estándar reducida hasta el valor calificado como excelente y la curva gris con los datos desplazados, siendo estos datos los correspondientes a los generados al disminuir la desviación estándar..

Tabla 4.3.3.1: Consecuencia de disminuir la desviación estándar del conjunto de muestras.

EHT	δ [MPa]	f_i [MPa]	#Cem [kg/m^3]	Δ Cem [kg/m^3]	
1	Original	3,5	35	280	-
	Muy buena	3,1	32,5	260	20
	Excelente	2,4	31	248	32
2	Original	2,7	34	300	-
	Muy buena	2,4	30,6	269	31
3	Original	3	35	270	-
	Muy buena	2,4	30,7	236	34
4	Original	3,1	34,5	270	-
	Muy buena	2,4	30,5	239	31
5	Original	3,9	43,7	320	-
	Muy buena	3,1	41,1	301	19
	Excelente	2,4	39,9	292	28
6	Original	3,6	44,3	310	-
	Muy buena	3,1	41,8	293	17
	Excelente	2,4	40,9	286	24

Fuente: Elaboración propia.

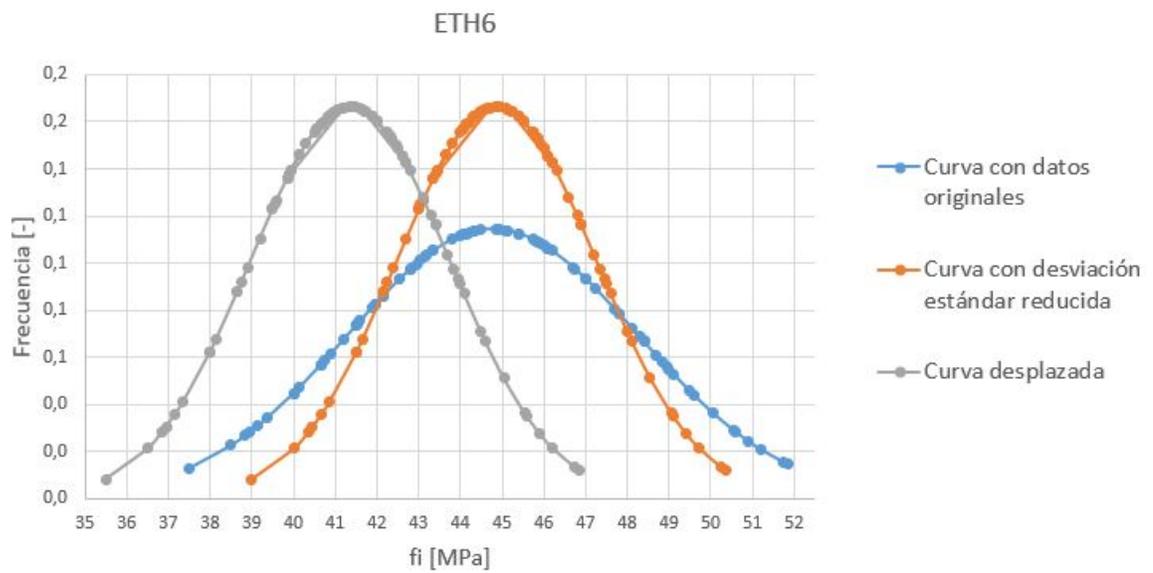
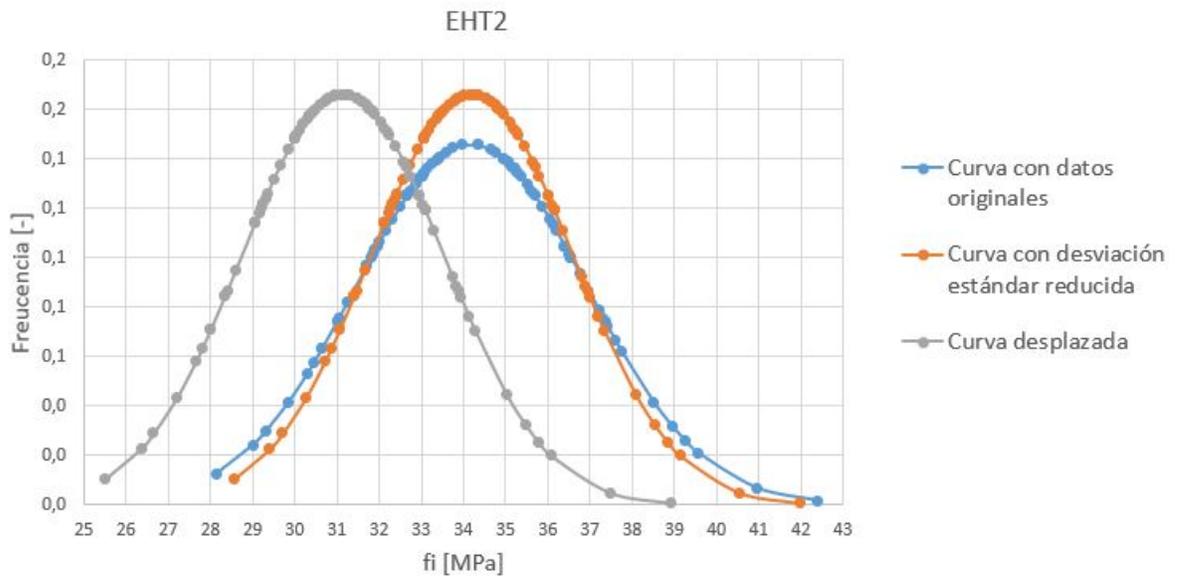


Figure 4.3.2: Curva de resistencia - disminución de desviación estándar y desplazamiento de curva - EHT2 y EHT6.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.3.3.2 se puede apreciar la cantidad de cemento ahorrado en una edificación habitacional tipo para cada tipo de mezcla, al disminuir la desviación estándar al valor catalogado como excelente y desplazando la curva de resistencia. También la tabla muestra la huella de carbono ahorrada como consecuencia de la disminución de cemento utilizado. De esta tabla se puede concluir que al aplicar optimización de la mezcla a través de la disminución de a desviación estándar y el correspondiente desplazamiento de la curva de resistencia, en un EHT construido con hormigón G25 es posible ahorrar entre 124ton y 136ton de cemento, lo que es equivalente a un rango entre 99.200kg CO₂e y 108.800kg CO₂e. Por otro lado, en un EHT construido con hormigón G35 es posible ahorrar entre 132ton y 154ton, lo cual tiene una huella de carbono asociada a un rango entre 105.600kg CO₂e y 123.200kg CO₂e.

Tabla 4.3.3.2: Beneficio de disminuir la desviación estándar y desplazar la curva en EHT.

EHT	Ahorro de cemento [ton]	Disminución huella de carbono [kg CO ₂ e][35]
1	128	102.400
2	124	99.200
3	136	108.800
4	124	99.200
5	154	123.200
6	132	105.600

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo V

Conclusión

El control de calidad del hormigón suministrado a la obra se realiza en conformidad a lo especificado en las normas respectivas, las que evidencian un proceso complejo, que al depender de tantas etapas y variables, generan resultados con una alta desviación estándar. Esto provoca dos cosas. Por un lado, el calculista del proyecto de construcción señala la realización de más ensayos que los estipulados por la normativa, generando incluso más de un 100% de sobre-muestreo, y por otro, la central hormigonera realiza un diseño de mezcla con resistencia mayor a la requerida para así aumentar la probabilidad de que cada resistencia individual (f_i) sea mayor al límite inferior de resistencia (f_o), donde esta resistencia adicional es resultado de una mezcla con mayor cantidad de cemento. Como consecuencia de ambas situaciones se genera un aumento en el uso de cemento, una mayor generación de residuos, y por ende, un aumento de la huella de carbono.

Este documento propone un método complementario de control de calidad del hormigón basado en dos metodologías. Una de ellas es emplear el método de madurez en la cuota de sobre-muestreo del hormigón. La metodología descrita en el ítem 3.1, da cuenta de que la aplicación de este método es bastante acotada en comparación al método convencional, siendo imprescindible el correcto desarrollo de la relación resistencia-madurez para la obtención de resistencias in-situ. Dicha sencillez confiere confianza en los resultados obtenidos en edades tempranas. Luego, la Tabla 2.4.3.1 contiene una comparación de ambos métodos en distintos aspectos: tipo de ensayo, tiempo de espera de obtención de resultados y confiabilidad de éstos. La finalidad de esta tabla es mostrar que las características de cada método se complementan, y por lo tanto, es beneficioso la integración de ambos.

En efecto, la propuesta de aplicación del método de madurez no intenta reemplazar el uso del método convencional, más bien se propone como método complementario de control de calidad del hormigón, debido a que el método convencional entrega resistencias potenciales de las probetas ensayadas que son base para la comparación con la resistencia de diseño, en cambio, el método de madurez entrega resistencia real a edades tempranas, por lo que es ideal complementar ambas metodologías.

La segunda propuesta que compone el método complementario de control de calidad del hormigón, se refiere a la aplicación de la evaluación estadística de la resistencia mecánica de las muestras correspondientes al muestreo convencional que se efectúa conforme al contrato de construcción. La finalidad de esta metodología, descrita en el ítem 3.2, es ajustar la dosificación de cemento de la mezcla de hormigón al disminuir la desviación estándar registrada en el control de resistencia potencial, desencadenando un impacto en la dosificación de la mezcla de hormigón como consecuencia directa de la disminución de la desviación estándar. Disminuir la desviación estándar es un objetivo que sin duda está en todo proceso productivo, pero no siempre se alcanzan niveles aceptables por los altos costos involucrados (recursos humanos, maquinaria y materiales de características uniformes, como por ejemplo: utilización de varias fracciones granulométricas de áridos para asegurar una curva granulométrica estable a lo largo del proceso).

De manera general, la aplicación del método complementario de control de calidad descrita en el capítulo III consta de pasos sencillos de realizar, que no requieren de herramientas ni materiales difíciles de conseguir y que permiten analizar los resultados fácilmente. Por ejemplo, la propuesta de aplicación del método de madurez en la fracción correspondiente al sobre-muestreo de hormigones, requiere disponer de sensores que miden la temperatura en función del tiempo, relacionando estos datos con la resistencia del hormigón in-situ.

Los métodos y herramientas de control de calidad convencionales aplicados en la construcción y descritos en el capítulo II, no consideran el factor de sustentabilidad como uno de sus focos principales, pero hoy en día resulta imprescindible tomar en cuenta que la industria del cemento es la industria proveedora de materiales con mayor consumo de energía y emisión de CO_2 a la atmósfera. Por este motivo, es trascendental que las especificaciones y el control de calidad consideren a la sustentabilidad como uno de sus focos primarios, siendo el método complementario de control de calidad propuesto en este trabajo, un aporte significativo en esta área en desarrollo, tanto para el muestreo como para la optimización de las mezclas. Es más, la aplicación de esta metodología no sólo aporta a la sustentabilidad en la construcción, además incorpora nuevos tipos de análisis y tecnologías, cumpliendo con el propósito de contribuir a lo establecido por el Programa estratégico nacional en productividad y construcción sustentable.

Dado que uno de los objetivos de este trabajo es identificar el aporte a la sustentabilidad en la construcción de las propuestas mencionadas anteriormente, se consideró la huella de carbono como índice de sustentabilidad, lo que se expresa en CO_2e , medida universal utilizada para señalar el potencial de calentamiento global asociado a los gases de efecto invernadero. Cabe destacar la complejidad de establecer su valor para cada proceso involucrado, por lo que fue necesario realizar estimaciones en base a estudios nacionales e internacionales. Finalmente, utilizar esta unidad de medida aporta a la intención de disminuir el impacto ambiental de los procedimientos estudiados

Para la aplicación del control de calidad complementario a un caso real y posterior análisis de resultados, fue necesario establecer el tipo de estructura representativa de la construcción en Chile. Pero dado que la base de datos utilizada contempla proyectos analizados desde el año 2007, la edificación habitacional tipo obtenida no sólo representa a estructuras actuales, si no que también permite visualizar como han ido evolucionando geométricamente los proyectos hasta el año 2017.

Al aplicar el método de madurez en sobre-muestreo de control de resistencias mecánicas, en el edificio habitacional tipo, se disminuye la huella de carbono entre $196kg CO_2e$ y $354ton CO_2e$ (ver Tabla 4.2.0.2), lo que corresponde en promedio al 22% de la huella de carbono asociada al ítem de control de resistencias mecánicas del hormigón. Es más, dicha disminución de huella de carbono también significa que se limita la generación de residuos asociados a la toma de muestras y ensayos, lo que corresponde a $1,5 m^3$ de hormigón por edificio habitacional tipo.

Al ocupar análisis estadístico por muestras consecutivas según norma NCh1998, cada uno de los 6 proyectos de edificio habitacional tipo estudiados cumple lo establecido por la norma, ya que verifican la resistencia especificada. Con esto, se realizó desplazamiento de la curva de resistencia, manteniendo constante la desviación estándar de las resistencias mecánicas. De la Tabla 4.3.2.2 se concluye que se genera un ahorro de cemento entre 6% y 11% (entre 68 ton y 116 ton) en los proyectos construidos con hormigón G25 y un 5% de ahorro de cemento para proyectos construidos con hormigón G35 (77 ton aproximadamente).

Luego, al disminuir la desviación estándar del conjunto de muestras de cada proyecto, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 4.3.3.2. De esto se concluye que se ahorra entre un 10% y un 13% de cemento (entre 124 ton y 136 ton) en los proyectos construidos con hormigón G25 y un 9% (123.200 ton) en proyectos construidos con hormigón G35. La disminución de la desviación estándar es responsabilidad tanto de la empresa hormigonera, como de quienes aplican el método convencional de control de resistencias en obra, dado que ambos llevan a cabo actividades implícitas en el proceso de obtención de resistencias potenciales.

La aplicación del análisis estadístico genera una disminución de la cantidad de cemento de la mezcla, sin embargo, es necesario respetar lo indicado por la norma NCh170, que señala que la dosificación de cemento debe considerar la durabilidad del elemento a construir, estableciendo como mínimo $240\text{kg}/\text{m}^3$ de cemento o la mínima que indique el calculista. Además, la disminución de cemento en la mezcla no solo genera una dosificación más sustentable, si no que también altera la trabajabilidad del hormigón fabricado, siendo necesaria la incorporación de aditivos. El tipo y cantidad de aditivos a incorporar en la mezcla no son sujetos de estudio en este trabajo, dado que no pertenecen al alcance del mismo.

Por último, se concluye que la utilización del método complementario de control de calidad es un método de aplicación sencilla y su uso disminuye la generación de residuos y huella de carbono, aportando a una construcción más sustentable y consciente con el medio ambiente. Se propone como línea de investigación, validar mediante un estudio de casos la disminución de generación de residuos y huella de carbono al implementar el control de calidad complementario propuesto aquí.

Bibliografía

- [1] G.H. KUSUMA, J. BUDIDARMAWAN & A. SUSILOWATI. 2015. *Impact of concrete quality on sustainability*. Procedia engineering. Vol.125. p.p 754-759.
- [2] P. MARTINEZ. 2005. *Construcción Sustentable: rol y posibilidades de desarrollo del hormigón como material sustentable*. Revista Ingeniería de construcción. Vol.20. N°3. p.p 91-100.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH170. *Hormigón - Requisitos generales*. Chile.
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH1017. *Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción*. Chile.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH1037. *Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. Chile.
- [6] INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. 2006. *Pruebas de resistencia a la compresión del concreto. El concreto en la obra: Problemas, causas y soluciones*. México.
- [7] G. CUEVAS. *Cámara Chilena de la construcción. Importancia del laboratorio de faena en el control de los hormigones en la edificación moderna*. Chile.
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH1998. *Hormigón - Evaluación estadística de la resistencia mecánica*. Chile.
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH148. *Cemento - terminología, clasificación y especificaciones generales*. Chile.
- [10] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH163. *Áridos para morteros y hormigones . Requisitos generales*. Chile.
- [11] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH1498. *Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos*. Chile.
- [12] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH2182. *Hormigón y mortero . Aditivos - Clasificación y requisitos*. Chile.
- [13] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCH171. *Hormigón - Extracción de muestras de hormigón*. Chile.
- [14] R. N. QUIMBA. 2012. *Adecuada aplicación del control térmico y de madurez del concreto (calorimetrías del concreto) en la determinación de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda*. Colombia.
- [15] J.D. SOTA, F.A. AVID, M. CHURY & P. MOREIRA. *CINPAR 2014. Medida de la madurez del hormigón de pavimentos urbanos para determinar su resistencia. Diseño de equipamiento*. En X CONGRESO INTERNACIONAL sobre Patología y Recuperación de Estructuras. 4 al 6 de Junio de 2014. Santiago, Chile.

- [16] ASTM INTERNATIONAL C1074. 2004. *Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method.*
- [17] N.J. CARINO & R.C. TANK. 1992. *Maturity Functions for Concrete Made With Various Cements and Admixtures.* ACI Materials Journal. Vol 89. No. 2.
- [18] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI. *Requisitos de reglamento para concreto estructural.* Cap19.
- [19] GRUPO BDL. 2018. *[En Línea]. Santiago. Chile. Recuperado de: <http://www.grupobdl.cl>*
- [20] METRO DE SANTIAGO. GERENCIA DE DESARROLLO DE PROYECTOS SUBGERENCIA DE OOC Y ARQUITECTURA. *Especificación técnicas generales obras civiles. Civil - Estructural.* p.p 67.
- [21] NACIONES UNIDAS. 1998. *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.* Kioto, Japón.
- [22] IHOBE. SOCIEDAD PUBLICA DE GESTIÓN AMBIENTAL. 2017. *Análisis del ciclo de vida y huella de carbono.*
- [23] L. M. JIMÉNEZ. OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA. *Enfoques metodológicos para el cálculo de la huella de carbono.*
- [24] J. F. ALBORNOZ. 2015. *Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile.* Memoria de ingeniero civil. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. p.p 22-63.
- [25] FUNDACIÓN CHILE. CONSORCIO POR LA SUSTENTABILIDAD. [ONLINE]. <http://www.consorciorporlasustentabilidad.cl/ecobase/construccion/> [Consulta: 10 noviembre 2018]
- [26] CONSORCIO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. CDT. 2013. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE. [ONLINE]. <http://www.construccion-sustentable.cl> [Consulta: 10 noviembre 2018]
- [27] MINISTERIO DE ENERGÍA. INDICADORES AMBIENTALES. [ONLINE]. <http://www.minenergia.cl/indicadoresambientales> [Consulta: 03 enero 2018]
- [28] CONTROLS GROUP. [ONLINE]. [/http://www.controls-group.com/spa/](http://www.controls-group.com/spa/) [Consulta: 09 enero 2019]
- [29] COMISIÓN INTERDEPARTAMENTAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO. 2011. *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).*
- [30] R. BELLIDO. HUELLA DE CARBONO SENSOR INALÁMBRICO [EN LÍNEA]. <rbellido@bdl.cl> [consulta: 27 diciembre 2018]
- [31] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATIONMISIÓN. 2017. *ICAO Carbon Emissions Calculator.* Versión 10.

- [32] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATIONMISIÓN. CARBON EMISSIONS CALCULATOR. [ONLINE]. <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset> [Consulta: 03 enero 2019]
- [33] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 234R. *Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*. Michigan. Estados Unidos.
- [34] S. GUTIÉRREZ. 2018. *R004 Breve identificación del edificio ByB*. Santiago Chile.
- [35] EMISIONES DE CARBONO POR PARTE DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO VS. CEMENTO VERDE. 2016. *Revista Civilizate 8:12-13*.

Anexo A Reportes de carga de hormigon G25 y G35

Tabla 1: EHT1 - H030(90)-20-10 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k ₁ ?	¿f _i >f ₀ =f _c -k ₂ ?
1	39,9	38,4	39,2			SI
2	35,4	34,6	35,0			SI
3	35,8	37	36,4	36,9	SI	SI
4	37,6	38,7	38,2	36,5	SI	SI
5	37,5	38,8	38,2	37,6	SI	SI
6	32,3	33	32,7	36,3	SI	SI
7	38,5	37,3	37,9	36,2	SI	SI
8	33,2	34,7	34,0	34,8	SI	SI
9	34,4	35,2	34,8	35,6	SI	SI
10	39,8	40,6	40,2	36,3	SI	SI
11	36,6	35,1	35,9	37,0	SI	SI
12	49,6	48,2	48,9	41,7	SI	SI
13	39	38,7	38,9	41,2	SI	SI
14	42,7	42,2	42,5	43,4	SI	SI
15	40,1	38,4	39,3	40,2	SI	SI
16	43,1	42,4	42,8	41,5	SI	SI
17	34,3	33,3	33,8	38,6	SI	SI
18	34,6	34,4	34,5	37,0	SI	SI
19	33,4	33,9	33,7	34,0	SI	SI
20	32,6	33,5	33,1	33,7	SI	SI
21	38,6	36,6	37,6	34,8	SI	SI
22	34,2	35,2	34,7	35,1	SI	SI
23	35	36,1	35,6	36,0	SI	SI
24	30,7	30,5	30,6	33,6	SI	SI
25	36,7	37,9	37,3	34,5	SI	SI
26	37,4	37,1	37,3	35,1	SI	SI
27	32,8	33,3	33,1	35,9	SI	SI
28	34,6	32,9	33,8	34,7	SI	SI
29	40,9	40	40,5	35,8	SI	SI
30	33,6	35,6	34,6	36,3	SI	SI
31	30,7	30,5	30,6	35,2	SI	SI
32	35,7	36,6	36,2	33,8	SI	SI
33	31,5	29,8	30,7	32,5	SI	SI
34	31,5	32	31,8	32,9	SI	SI
35	30,2	31	30,6	31,0	SI	SI
36	36,8	37,4	37,1	33,2	SI	SI
37	35,7	36,7	36,2	34,6	SI	SI
38	33,3	34,4	33,9	35,7	SI	SI
39	27,2	27,1	27,2	32,4	SI	SI
40	34,4	33	33,7	31,6	SI	SI
41	34,1	33,9	34,0	31,6	SI	SI

42	26,8	29,4	28,1	31,9	SI	SI
43	36	35,8	35,9	32,7	SI	SI
44	37,1	36,6	36,9	33,6	SI	SI
45	29,9	30,2	30,1	34,3	SI	SI
46	35,9	34,5	35,2	34,0	SI	SI
47	31,8	30,6	31,2	32,2	SI	SI
48	38,2	36,7	37,5	34,6	SI	SI
49	32,5	31,6	32,1	33,6	SI	SI
50	39,2	38,6	38,9	36,1	SI	SI
51	34,4	33,2	33,8	34,9	SI	SI
52	33,5	34,1	33,8	35,5	SI	SI
53	32,5	32,7	32,6	33,4	SI	SI
54	30,6	31,2	30,9	32,4	SI	SI
55	37,4	38,7	38,1	33,9	SI	SI
56	36,3	36,8	36,6	35,2	SI	SI
57	37,4	35,9	36,7	37,1	SI	SI
58	34,4	33,8	34,1	35,8	SI	SI
59	34,1	34,2	34,2	35,0	SI	SI
60	36,9	38	37,5	35,2	SI	SI
61	44,1	43,6	43,9	38,5	SI	SI
62	34,6	34,3	34,5	38,6	SI	SI
63	32,4	32,1	32,3	36,9	SI	SI
64	34	33,7	33,9	33,5	SI	SI
65	39	38	38,5	34,9	SI	SI
66	32	34,5	33,3	35,2	SI	SI
67	34,6	34,6	34,6	35,5	SI	SI
68	35,4	35,8	35,6	34,5	SI	SI
69	38,2	38,5	38,4	36,2	SI	SI
70	34,7	35,4	35,1	36,3	SI	SI
71	34,5	32,5	33,5	35,6	SI	SI
72	32,1	33	32,6	33,7	SI	SI
73	36,2	34,5	35,4	33,8	SI	SI
74	28,5	30,3	29,4	32,4	SI	SI
75	32,8	33,4	33,1	32,6	SI	SI
76	32,3	34,1	33,2	31,9	SI	SI
77	36	37,1	36,6	34,3	SI	SI
78	34,9	33,6	34,3	34,7	SI	SI
79	33,3	34,4	33,9	34,9	SI	SI
80	43,5	44,5	44,0	37,4	SI	SI
81	34,3	35,6	35,0	37,6	SI	SI
82	31,5	32,1	31,8	36,9	SI	SI
83	33,1	32,5	32,8	33,2	SI	SI
84	36,2	37	36,6	33,7	SI	SI
85	34,5	33,6	34,1	34,5	SI	SI
86	36,9	36,3	36,6	35,8	SI	SI
87	32,1	33,2	32,7	34,4	SI	SI

88	35,6	35,9	35,8	35,0	SI	SI
89	31,1	32,6	31,9	33,4	SI	SI
90	33,2	32,3	32,8	33,5	SI	SI
91	31,8	32,7	32,3	32,3	SI	SI
92	35,4	36,5	36,0	33,7	SI	SI
93	36,8	37,5	37,2	35,1	SI	SI
94	34,8	35	34,9	36,0	SI	SI
95	34,8	33,8	34,3	35,5	SI	SI
96	36,4	37,5	37,0	35,4	SI	SI
97	29,4	29,1	29,3	33,5	SI	SI
98	30,6	31,7	31,2	32,5	SI	SI
99	33,4	34,9	34,2	31,5	SI	SI
100	30,1	29,8	30,0	31,8	SI	SI

Tabla 2: EHT2 - H030(90)-20-14 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k ₁ ?	¿f _i >f ₀ =f _c -k ₂ ?
1	32,8	32,7	32,8			SI
2	37,7	37	37,4			SI
3	36	36,8	36,4	35,5	SI	SI
4	34,6	34,9	34,8	36,2	SI	SI
5	32,9	32,4	32,7	34,6	SI	SI
6	34,3	36,3	35,3	34,2	SI	SI
7	32,7	31,9	32,3	33,4	SI	SI
8	42,1	42,7	42,4	36,7	SI	SI
9	37,8	37,4	37,6	37,4	SI	SI
10	39,6	39,5	39,6	39,9	SI	SI
11	32,2	33,1	32,7	36,6	SI	SI
12	32,8	33,1	33,0	35,1	SI	SI
13	31,3	30,7	31,0	32,2	SI	SI
14	30,1	31,2	30,7	31,5	SI	SI
15	41,3	40,6	41,0	34,2	SI	SI
16	33,3	32	32,7	34,8	SI	SI
17	36	36,4	36,2	36,6	SI	SI
18	31,8	32,1	32,0	33,6	SI	SI
19	32,4	32,9	32,7	33,6	SI	SI
20	32,3	31,7	32,0	32,2	SI	SI
21	34,2	35,7	35,0	33,2	SI	SI
22	27,8	28,5	28,2	31,7	SI	SI
23	29	29,6	29,3	30,8	SI	SI
24	29,2	28,8	29,0	28,8	SI	SI
25	36,5	35,2	35,9	31,4	SI	SI
26	31,9	31,5	31,7	32,2	SI	SI
27	36,3	37,2	36,8	34,8	SI	SI
28	36,2	36,9	36,6	35,0	SI	SI
29	34,3	35,8	35,1	36,1	SI	SI
30	36,5	35,6	36,1	35,9	SI	SI
31	37,8	37	37,4	36,2	SI	SI
32	35,2	35,2	35,2	36,2	SI	SI
33	33,7	33,2	33,5	35,4	SI	SI
34	32,9	32,8	32,9	33,8	SI	SI
35	31,7	31,7	31,7	32,7	SI	SI
36	32,3	32	32,2	32,2	SI	SI
37	32,5	31,3	31,9	31,9	SI	SI
38	32,8	33,3	33,1	32,4	SI	SI
39	30,9	31,1	31,0	32,0	SI	SI
40	35,9	37,2	36,6	33,5	SI	SI
41	31,1	30,2	30,7	32,7	SI	SI

42	30,4	29,3	29,9	32,4	SI	SI
43	33,9	34,8	34,4	31,6	SI	SI
44	32,7	33,3	33,0	32,4	SI	SI
45	33,2	32,8	33,0	33,5	SI	SI
46	32,9	32,4	32,7	32,9	SI	SI
47	34,6	35,3	35,0	33,5	SI	SI
48	33,5	33	33,3	33,6	SI	SI
49	36,9	36,2	36,6	34,9	SI	SI
50	31,8	31,9	31,9	33,9	SI	SI
51	35	35,3	35,2	34,5	SI	SI
52	35,7	34,7	35,2	34,1	SI	SI
53	33,2	34	33,6	34,7	SI	SI
54	33,1	33,6	33,4	34,1	SI	SI
55	39,5	39	39,3	35,4	SI	SI
56	36	36,2	36,1	36,2	SI	SI
57	32	31,6	31,8	35,7	SI	SI
58	30,9	31,6	31,3	33,1	SI	SI
59	38,8	39,1	39,0	34,0	SI	SI
60	35,4	35,1	35,3	35,2	SI	SI
61	37,5	38	37,8	37,3	SI	SI
62	35,3	36	35,7	36,2	SI	SI
63	33,2	32,9	33,1	35,5	SI	SI
64	35,7	35,7	35,7	34,8	SI	SI
65	35,4	35,3	35,4	34,7	SI	SI
66	30,3	30,3	30,3	33,8	SI	SI
67	35,4	35,8	35,6	33,8	SI	SI
68	33,5	34	33,8	33,2	SI	SI
69	30,6	30,3	30,5	33,3	SI	SI
70	34,6	35,5	35,1	33,1	SI	SI
71	37,2	37,4	37,3	34,3	SI	SI
72	32,5	32,9	32,7	35,0	SI	SI
73	36,1	34,9	35,5	35,2	SI	SI
74	33,8	32,5	33,2	33,8	SI	SI
75	36,2	36,6	36,4	35,0	SI	SI
76	36,9	37,5	37,2	35,6	SI	SI
77	36,3	36,7	36,5	36,7	SI	SI
78	31,2	32,2	31,7	35,1	SI	SI
79	32,4	32,6	32,5	33,6	SI	SI
80	38,1	38,9	38,5	34,2	SI	SI
81	31,1	31	31,1	34,0	SI	SI
82	33,2	33,6	33,4	34,3	SI	SI
83	34,9	34,4	34,7	33,0	SI	SI
84	34,3	34,4	34,4	34,1	SI	SI
85	34	33,9	34,0	34,3	SI	SI

Tabla 3: EHT3 - H030(90)-40-10 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k1?	¿f _i >f ₀ =f _c -k2?
1	33,2	32,2	32,7			SI
2	34	35,7	34,9			SI
3	31,8	32,3	32,1	33,2	SI	SI
4	32,4	33,5	33,0	33,3	SI	SI
5	34,7	35,8	35,3	33,4	SI	SI
6	31,7	33,2	32,5	33,6	SI	SI
7	39,2	37,7	38,5	35,4	SI	SI
8	44,1	42,4	43,3	38,1	SI	SI
9	33,9	32,8	33,4	38,4	SI	SI
10	33,3	32	32,7	36,4	SI	SI
11	31	32,7	31,9	32,6	SI	SI
12	36,7	30,1	33,4	32,6	SI	SI
13	37,5	37,7	37,6	34,3	SI	SI
14	38	37,4	37,7	36,2	SI	SI
15	38,2	37,8	38,0	37,8	SI	SI
16	35,3	36,1	35,7	37,1	SI	SI
17	33,8	32,9	33,4	35,7	SI	SI
18	33,3	33,1	33,2	34,1	SI	SI
19	31,7	29,8	30,8	32,4	SI	SI
20	33,2	35,4	34,3	32,8	SI	SI
21	35,7	36,5	36,1	33,7	SI	SI
22	32,8	32,2	32,5	34,3	SI	SI
23	33,1	32,3	32,7	33,8	SI	SI
24	34,3	33,6	34,0	33,1	SI	SI
25	33,2	34,6	33,9	33,5	SI	SI
26	34,5	35,4	35,0	34,3	SI	SI
27	31,9	30,6	31,3	33,4	SI	SI
28	38,7	38,4	38,6	34,9	SI	SI
29	36,5	35,1	35,8	35,2	SI	SI
30	33,3	32,5	32,9	35,8	SI	SI
31	33,9	35,1	34,5	34,4	SI	SI
32	34,5	34	34,3	33,9	SI	SI
33	38,8	38,2	38,5	35,8	SI	SI
34	35,1	35,3	35,2	36,0	SI	SI
35	33,8	34,7	34,3	36,0	SI	SI
36	33,6	34,9	34,3	34,6	SI	SI
37	30,6	32	31,3	33,3	SI	SI
38	33,9	33,8	33,9	33,1	SI	SI
39	34,4	34,2	34,3	33,2	SI	SI
40	33,9	32,4	33,2	33,8	SI	SI
41	36,4	35,2	35,8	34,4	SI	SI

42	32,8	32,7	32,8	33,9	SI	SI
43	34	34,3	34,2	34,2	SI	SI
44	32,7	33,2	33,0	33,3	SI	SI
45	38,3	37,5	37,9	35,0	SI	SI
46	30,2	30,3	30,3	33,7	SI	SI
47	33,2	32,8	33,0	33,7	SI	SI
48	38,1	38,9	38,5	33,9	SI	SI
49	31,1	32,3	31,7	34,4	SI	SI
50	40,1	40,8	40,5	36,9	SI	SI
51	34,8	35,9	35,4	35,8	SI	SI
52	34,8	34,1	34,5	36,8	SI	SI
53	34	34,3	34,2	34,7	SI	SI
54	40,6	39,9	40,3	36,3	SI	SI
55	40,2	40,1	40,2	38,2	SI	SI
56	34,2	35,3	34,8	38,4	SI	SI
57	34,1	33,9	34,0	36,3	SI	SI
58	39	38,7	38,9	35,9	SI	SI
59	29,1	29,7	29,4	34,1	SI	SI
60	37,1	38,8	38,0	35,4	SI	SI
61	34,3	33,2	33,8	33,7	SI	SI
62	30,1	29,8	30,0	33,9	SI	SI
63	38	38,6	38,3	34,0	SI	SI
64	31,5	33,2	32,4	33,5	SI	SI
65	31,9	32,3	32,1	34,3	SI	SI
66	37	37,9	37,5	34,0	SI	SI
67	34,5	34	34,3	34,6	SI	SI
68	35,3	36,3	35,8	35,8	SI	SI
69	42,3	43	42,7	37,6	SI	SI
70	33,7	34,5	34,1	37,5	SI	SI
71	34,8	33,8	34,3	37,0	SI	SI
72	36,6	37,5	37,1	35,2	SI	SI
73	37,9	36,7	37,3	36,2	SI	SI
74	28,2	29,4	28,8	34,4	SI	SI
75	31,9	31,5	31,7	32,6	SI	SI
76	35,5	34,5	35,0	31,8	SI	SI
77	38,9	37,8	38,4	35,0	SI	SI
78	32,4	31,1	31,8	35,0	SI	SI
79	37,4	36,2	36,8	35,6	SI	SI
80	31	31,9	31,5	33,3	SI	SI
81	33,1	34	33,6	33,9	SI	SI
82	37,6	36,7	37,2	34,1	SI	SI
83	40,5	39,7	40,1	36,9	SI	SI
84	39,4	37,7	38,6	38,6	SI	SI
85	34	34	34,0	37,6	SI	SI
86	38,8	37,4	38,1	36,9	SI	SI
87	34,6	35,9	35,3	35,8	SI	SI

88	41,6	40,1	40,9	38,1	SI	SI
89	33,3	31,9	32,6	36,2	SI	SI
90	38,4	36,9	37,7	37,0	SI	SI
91	32,7	31,6	32,2	34,1	SI	SI
92	35,2	34,1	34,7	34,8	SI	SI
93	37,7	38,9	38,3	35,0	SI	SI
94	37	36	36,5	36,5	SI	SI
95	37,7	37	37,4	37,4	SI	SI
96	38,7	39,2	39,0	37,6	SI	SI
97	33,9	32,9	33,4	36,6	SI	SI
98	40,9	42,8	41,9	38,1	SI	SI
99	34,8	34,6	34,7	36,7	SI	SI
100	37,3	36,9	37,1	37,9	SI	SI

Tabla 4: EHT4 - H030(90)-40-12 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k ₁ ?	¿f _i >f ₀ =f _c -k ₂ ?
1	36,3	37,9	37,1			SI
2	35,4	35,7	35,6			SI
3	38,2	37,4	37,8	36,8	SI	SI
4	39	38	38,5	37,3	SI	SI
5	41,7	42,1	41,9	39,4	SI	SI
6	37,4	36,5	37,0	39,1	SI	SI
7	36,7	38,1	37,4	38,8	SI	SI
8	33,2	33,1	33,2	35,8	SI	SI
9	38,3	38,6	38,5	36,3	SI	SI
10	36	35,2	35,6	35,7	SI	SI
11	31,9	32,9	32,4	35,5	SI	SI
12	32,2	32,9	32,6	33,5	SI	SI
13	32,8	31,4	32,1	32,4	SI	SI
14	35	35,7	35,4	33,3	SI	SI
15	34,6	34,2	34,4	34,0	SI	SI
16	33	32,6	32,8	34,2	SI	SI
17	36	35,2	35,6	34,3	SI	SI
18	37,3	37,6	37,5	35,3	SI	SI
19	34,9	36,1	35,5	36,2	SI	SI
20	30,9	29,6	30,3	34,4	SI	SI
21	31,2	30	30,6	32,1	SI	SI
22	37,6	38,3	38,0	32,9	SI	SI
23	36,4	35,2	35,8	34,8	SI	SI
24	37,6	36,9	37,3	37,0	SI	SI
25	35,7	36,8	36,3	36,4	SI	SI
26	32,3	31,6	32,0	35,2	SI	SI
27	31	29,9	30,5	32,9	SI	SI
28	31,9	33	32,5	31,6	SI	SI
29	44,8	45,1	45,0	36,0	SI	SI
30	31	32,6	31,8	36,4	SI	SI
31	33,5	32,2	32,9	36,5	SI	SI
32	36,4	36,4	36,4	33,7	SI	SI
33	37	37,9	37,5	35,6	SI	SI
34	33,8	34,5	34,2	36,0	SI	SI
35	32,9	33,5	33,2	34,9	SI	SI
36	34,4	32,6	33,5	33,6	SI	SI
37	40,8	40,8	40,8	35,8	SI	SI
38	39,1	40,4	39,8	38,0	SI	SI
39	32,7	33,3	33,0	37,9	SI	SI
40	33,6	34,2	33,9	35,6	SI	SI
41	30,9	29,8	30,4	32,4	SI	SI

42	37,1	37,4	37,3	33,8	SI	SI
43	33,9	35	34,5	34,0	SI	SI
44	36,4	35,9	36,2	36,0	SI	SI
45	36,6	38,2	37,4	36,0	SI	SI
46	33	34,2	33,6	35,7	SI	SI
47	31	30,8	30,9	34,0	SI	SI
48	34,2	35,2	34,7	33,1	SI	SI
49	34,3	33,2	33,8	33,1	SI	SI
50	33,2	34,6	33,9	34,1	SI	SI
51	34,8	36,1	35,5	34,4	SI	SI
52	34,3	35,4	34,9	34,7	SI	SI
53	32,2	32,1	32,2	34,2	SI	SI
54	31,9	32,8	32,4	33,1	SI	SI
55	34,1	34	34,1	32,9	SI	SI
56	36,4	36,5	36,5	34,3	SI	SI
57	33,3	33,4	33,4	34,6	SI	SI
58	32,4	31,6	32,0	33,9	SI	SI
59	28,7	27,7	28,2	31,2	SI	SI
60	27,4	28,7	28,1	29,4	SI	SI
61	33,4	32,3	32,9	29,7	SI	SI
62	32,7	31,3	32,0	31,0	SI	SI
63	32,1	30,6	31,4	32,1	SI	SI
64	37,5	36,6	37,1	33,5	SI	SI
65	31,7	31,2	31,5	33,3	SI	SI
66	32,8	33,3	33,1	33,9	SI	SI
67	34,4	35,7	35,1	33,2	SI	SI
68	30,1	30,5	30,3	32,8	SI	SI
69	34,8	35,2	35,0	33,5	SI	SI
70	31,4	31,9	31,7	32,3	SI	SI
71	32,8	32,7	32,8	33,1	SI	SI
72	31,2	31,5	31,4	31,9	SI	SI
73	38,8	37,9	38,4	34,2	SI	SI

Tabla 5: EHT5 - H040(90)-20-10 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k ₁ ?	¿f _i >f ₀ =f _c -k ₂ ?
1	42,8	44,2	43,5			SI
2	47,7	46,4	47,1			SI
3	37,9	38,6	38,3	42,9	SI	SI
4	45,8	44,7	45,3	43,5	SI	SI
5	43,0	44,2	43,6	42,4	SI	SI
6	38,6	38,3	38,5	42,4	SI	SI
7	41,5	37,4	39,5	40,5	SI	SI
8	41,0	41,0	41,0	39,6	SI	SI
9	43,4	44,8	44,1	41,5	SI	SI
10	42,2	42,3	42,3	42,5	SI	SI
11	44,3	44,5	44,4	43,6	SI	SI
12	41,6	42,3	42,0	42,9	SI	SI
13	38,4	39,1	38,8	41,7	SI	SI
14	37,2	36,0	39,0	39,9	SI	SI
15	41,1	40,9	41,0	39,6	SI	SI
16	44,4	44,2	44,3	41,4	SI	SI
17	44,7	43,4	44,1	43,1	SI	SI
18	36,1	35,9	40,0	42,8	SI	SI
19	40,3	40,7	40,5	41,5	SI	SI
20	46,9	46,4	46,7	42,4	SI	SI
21	43,4	43,5	43,5	43,5	SI	SI
22	40,5	40,0	40,3	43,5	SI	SI
23	45,9	44,5	45,2	43,0	SI	SI
24	47,7	48,5	48,1	44,5	SI	SI
25	41,1	42,6	41,9	45,1	SI	SI
26	53,0	53,7	53,4	47,8	SI	SI
27	41,1	43,1	42,1	45,8	SI	SI
28	38,9	40,3	39,6	45,0	SI	SI
29	36,9	37,7	37,3	39,7	SI	SI
30	36,6	37,1	36,9	37,9	SI	SI
31	40,0	40,6	40,3	38,2	SI	SI
32	42,0	40,0	41,0	39,4	SI	SI
33	38,4	39,7	39,1	40,1	SI	SI
34	50,0	48,9	49,5	43,2	SI	SI
35	40,2	40,7	40,5	43,0	SI	SI
36	41,3	42,5	41,9	43,9	SI	SI
37	67,2	64,5	51,0	44,5	SI	SI
38	50,0	50,1	50,1	47,7	SI	SI
39	39,1	40,9	40,0	47,0	SI	SI

40	42,6	40,9	41,8	43,9	SI	SI
41	41,4	41,3	41,4	41,0	SI	SI
42	45,2	46,3	45,8	43,0	SI	SI
43	37,9	39,0	38,5	41,9	SI	SI
44	44,5	44,7	44,6	42,9	SI	SI
45	43,0	41,9	42,5	41,8	SI	SI
46	43,2	43,2	43,2	43,4	SI	SI
47	44,4	45,1	44,8	43,5	SI	SI
48	42,1	40,7	41,4	43,1	SI	SI
49	48,5	49,2	48,9	45,0	SI	SI
50	46,3	46,0	46,2	45,5	SI	SI
51	41,6	43,3	42,5	45,8	SI	SI
52	43,9	43,3	43,6	44,1	SI	SI
53	41,3	40,5	40,9	42,3	SI	SI
54	41,5	42,4	42,0	42,2	SI	SI
55	43,6	43,0	43,3	42,1	SI	SI
56	42,7	43,8	43,3	42,8	SI	SI
57	48,2	47,1	47,7	44,7	SI	SI
58	38,6	38,8	38,7	43,2	SI	SI
59	43,8	42,8	43,3	43,2	SI	SI
60	44,5	44,5	44,5	42,2	SI	SI
61	40,3	40,7	40,5	42,8	SI	SI
62	44,4	44,2	44,3	43,1	SI	SI
63	43,9	44,5	44,2	43,0	SI	SI
64	42,8	41,8	42,3	43,6	SI	SI
65	46,8	47,6	47,2	44,6	SI	SI
66	44,6	44,3	44,5	44,7	SI	SI
67	50,9	52,3	51,6	47,8	SI	SI
68	44,3	44,6	44,5	46,8	SI	SI
69	49,7	49,3	49,5	48,5	SI	SI
70	51,0	52,3	51,7	48,5	SI	SI
71	46,6	46,8	46,7	49,3	SI	SI
72	45,8	45,9	45,9	48,1	SI	SI
73	48,5	49,2	48,9	47,1	SI	SI
74	47,7	49,2	48,5	47,7	SI	SI
75	42,1	40,8	41,5	46,3	SI	SI
76	46,3	45,1	45,7	45,2	SI	SI
77	40,2	40,8	40,5	42,6	SI	SI
78	46,9	47,4	47,2	44,5	SI	SI
79	48,4	47,5	48,0	45,2	SI	SI
80	51,6	51,1	51,4	48,8	SI	SI

Tabla 6: EHT6 - H040(90)-40-10 - Evaluación del lote por parcialidades mediante grupos de muestras consecutivas.

N° Muestra	X1 [MPa]	X2 [MPa]	f _i [MPa]	f ₃ [MPa]	¿f ₃ >f _c -k ₁ ?	¿f _i >f ₀ =f _c -k ₂ ?
1	43,4	44,3	43,9			SI
2	48,0	48,9	48,5			SI
3	41,0	40,4	40,7	44,3	SI	SI
4	39,9	40,4	40,2	43,1	SI	SI
5	42,7	41,9	42,3	41,1	SI	SI
6	39,6	39,4	39,5	40,7	SI	SI
7	43,3	44,1	43,7	41,8	SI	SI
8	40,0	40,3	40,2	41,1	SI	SI
9	38,7	38,0	38,4	40,7	SI	SI
10	43,6	44,4	44,0	40,8	SI	SI
11	42,6	42,7	42,7	41,7	SI	SI
12	41,6	43,3	42,5	43,0	SI	SI
13	43,2	43,8	43,5	42,9	SI	SI
14	33,0	33,4	38,0	41,3	SI	SI
15	36,9	37,1	37,0	39,5	SI	SI
16	40,9	41,3	41,1	38,7	SI	SI
17	35,6	36,1	38,9	39,0	SI	SI
18	47,6	48,8	48,2	42,7	SI	SI
19	45,8	47,2	46,5	44,5	SI	SI
20	44,7	44,2	44,5	46,4	SI	SI
21	43,1	42,6	42,9	44,6	SI	SI
22	42,0	42,1	42,1	43,1	SI	SI
23	39,8	39,2	39,5	41,5	SI	SI
24	39,8	40,7	40,3	40,6	SI	SI
25	43,9	43,4	43,7	41,1	SI	SI
26	42,4	42,2	42,3	42,1	SI	SI
27	41,6	41,3	41,5	42,5	SI	SI
28	43,4	42,3	42,9	42,2	SI	SI
29	44,6	42,7	43,7	42,7	SI	SI
30	46,5	45,9	46,2	44,2	SI	SI
31	44,2	44,5	44,4	44,7	SI	SI
32	40,8	42,0	41,4	44,0	SI	SI
33	41,1	39,7	40,4	42,1	SI	SI
34	41,3	40,8	41,1	41,0	SI	SI
35	44,9	45,8	45,4	42,3	SI	SI

36	40,5	42,8	41,7	42,7	SI	SI
37	47,7	49,0	48,4	45,1	SI	SI
38	45,3	44,0	44,7	44,9	SI	SI
39	48,7	48,3	48,5	47,2	SI	SI
40	43,9	43,2	43,6	45,6	SI	SI
41	43,1	43,5	43,3	45,1	SI	SI
42	45,1	45,8	45,5	44,1	SI	SI
43	41,7	41,2	41,5	43,4	SI	SI
44	47,3	47,1	47,2	44,7	SI	SI
45	45,8	45,2	45,5	44,7	SI	SI
46	47,8	48,0	47,9	46,9	SI	SI
47	46,7	45,8	46,3	46,6	SI	SI
48	49,8	51,0	50,4	48,2	SI	SI
49	47,6	45,9	46,8	47,8	SI	SI
50	44,1	43,6	43,9	47,0	SI	SI
51	44,5	46,0	45,3	45,3	SI	SI
52	38,8	38,5	38,7	42,6	SI	SI
53	47,6	47,6	47,6	43,8	SI	SI
54	50,3	51,1	50,7	45,7	SI	SI
55	42,4	42,3	42,4	46,9	SI	SI
56	44,6	44,6	44,6	45,9	SI	SI
57	51,1	51,4	51,3	46,1	SI	SI
58	47,9	47,7	47,8	47,9	SI	SI
59	50,0	49,1	49,6	49,5	SI	SI
60	43,1	42,3	42,7	46,7	SI	SI
61	48,7	48,5	48,6	47,0	SI	SI
62	44,6	46,1	45,4	45,6	SI	SI
63	41,2	40,8	41,0	45,0	SI	SI
64	45,1	45,5	45,3	43,9	SI	SI
65	45,0	46,4	45,7	44,0	SI	SI
66	44,1	45,7	44,9	45,3	SI	SI
67	44,0	45,8	44,9	45,2	SI	SI
68	38,7	38,2	38,5	42,8	SI	SI
69	40,8	41,2	41,0	41,5	SI	SI
70	44,5	44,2	44,4	41,3	SI	SI
71	45,8	45,4	45,6	43,7	SI	SI
72	49,2	49,0	49,1	46,4	SI	SI
73	39,6	39,7	39,7	44,8	SI	SI
74	48,4	51,8	50,1	46,3	SI	SI
75	50,4	47,6	49,0	46,3	SI	SI

76	46,2	46,8	46,5	48,5	SI	SI
77	50,0	50,1	50,1	48,5	SI	SI
78	45,8	45,4	45,6	47,4	SI	SI
79	47,8	46,8	47,3	47,7	SI	SI
80	44,5	40,6	42,6	45,2	SI	SI
81	50,7	52,0	51,4	47,1	SI	SI
82	48,2	47,6	47,9	47,3	SI	SI