



Universidad de la República
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura

TESIS DE MAESTRÍA

**Hormigón de alto desempeño:
evaluación de costos y viabilidad
del empleo de HAR y HAC en Uruguay**

Marianela Siqueira Ríos

Montevideo, Uruguay
Mayo, 2020



Hormigón de alto desempeño: evaluación de costos y viabilidad del empleo del HAR y HAC en Uruguay

Autor: Marianela Siqueira Ríos

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster.

Tutores: Dr. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale
Mag. Ing. Ramiro Rodríguez

Montevideo, Uruguay
Mayo, 2020

Siqueira Ríos, Marianela

Hormigón de alto desempeño: evaluación de costos y viabilidad del empleo de HAR y HAC en Uruguay / Marianela Siqueira Ríos. Montevideo, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2020.

93p.; 29,7 cm.

Tutores: Dr. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale

Mag. Ing. Ramiro Rodríguez

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, 2020.

Referencias bibliográficas p. 88 – 94.

1. Hormigón, 2. Hormigón de alto desempeño, 3. Hormigón de alta resistencia, 4. Hormigón autocompactante, 5. Costos, 6. Viabilidad económica. I. Rodríguez de Sensale, Gemma / Rodríguez, Ramiro. II. Universidad de la República, Programa de Posgrado Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura. III. Hormigón de alto desempeño: evaluación de costos y viabilidad del empleo de HAR y HAC en Uruguay.

Resumen

En la presente tesis de Maestría se propone analizar la utilización de los hormigones de alta resistencia (HAR) y hormigones autocompactantes (HAC) en obras de arquitectura en el medio uruguayo.

Si bien dichos materiales han sido utilizados profusamente a nivel mundial desde la década del 70 y 90 del siglo XX respectivamente, en Uruguay su uso se ha hecho más frecuente en las últimas décadas con el fin de cumplir las exigencias de mayor rentabilidad y/o calidad en terminación del hormigón.

En esta tesis se estudia la viabilidad económica de los hormigones de alto desempeño (HAD), se compara los HAR con los hormigones convencionales (HC) y se investiga cómo son utilizados los HAC en nuestro medio y sus costos reales.

Con este fin, se plantea el estudio de tres casos concretos, a saber: un edificio con destino vivienda con HAD en primeros niveles donde se utilizaron hormigones de hasta $F_{ck} = 60$ MPa; un edificio con destino hotel con HAD en las fundaciones debido a las características del suelo y en los primeros niveles con una resistencia a la compresión a los 28 días de $F_{ck} = 45$ MPa; y un hotel con hormigón $F_{ck} = 30$ MPa ejecutado en la década del 90, el cual significó un desafío en su época para las empresas locales proveedoras de hormigón ya que fue uno de los primeros hormigones en ejecutarse con una resistencia a la compresión de estas características, que hoy es un HC pero en la década del 90 era la máxima resistencia lograda en el medio uruguayo.

Los resultados obtenidos en los mencionados estudios demuestran que el menor volumen que implica la utilización de HAD en lugar de HC hacen su utilización más rentable —no obstante su costo mayor por m^3 — al disminuir las cantidades de hormigón requeridas por la estructura.

En virtud de estas y otras consideraciones desarrolladas a lo largo de la presente tesis, se concluye que la utilización en nuestro medio del HAR es viable económicamente.

Asimismo, la señalada viabilidad económica se da concomitantemente con otros beneficios, tales como:

- la reducción de la dimensión de los pilares y el consiguiente aumento del área en planta;

- la utilización de menores volúmenes de hormigón en pilares, los cuales en el estudio de caso 3 significaron una reducción del volumen de hormigón para resistencias de $F_{ck} = 60 \text{ MPa}$ y $F_{ck} = 45 \text{ MPa}$ de un 50% y 32% respectivamente;
- el consiguiente ahorro en el consumo de los materiales necesarios para su fabricación —que en los estudios de casos 1 y 2 alcanzó el 5% de los costos totales del volumen del hormigón;
- la reutilización de residuos de otras industrias.

La oportunidad de acceder a los beneficios indicados requiere que desde la industria de la construcción local se trabaje en la formación específica —incluyendo profesionales, técnicos y personal obrero— con respecto al HAD y concretamente a su puesta en obra, dejando atrás la práctica de utilizar el HAD en todas las piezas de la estructura, empleándolo solamente en aquellas donde estrictamente es requerido, y con las resistencias correctas.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Justificación de la investigación	1
1.2. Objetivo de la investigación	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3. Estructura de la tesis	5
1.4. Alcance de la investigación	5
2. Hormigón de alto desempeño (HAD): estado del arte sobre sus costos y viabilidad económica.	6
2.1. Consideraciones generales sobre HAD	6
2.1.1 Consideraciones sobre hormigones de alta resistencia (HAR)	7
2.1.2 Consideraciones sobre hormigones autocompactantes (HAC)	13
2.2. Análisis de costos.	22
2.2.1 Consideraciones generales.	22
2.2.2 Modelos de costos.	26
2.3 Estado del arte de los HAD y su viabilidad económica: análisis de costos en la utilización de HAD.	32
3. Metodología	39
3.1. Consideraciones generales	39
3.2. Estrategia de la investigación	40
3.3. Diseño de la investigación	43
3.4. Descripción de las tareas de investigación	45
3.4.1 Diagnóstico	45
3.4.2 Estudio de costos	46
3.4.3 Implementación	50
3.4.4 Validación	51
4. Estudio de casos, resultados y discusión	53
4.1 Estudio de casos	54
4.1.1 Caso 1 - Edificio de viviendas con HAD en primeros niveles.	54
4.1.2 Caso 2 - Edificio de hotel con HAD en los primeros niveles	56
4.1.3 Caso 3 - Hotel con HC Fck = 30 MPa	58
4.2 Costos a considerar en los casos de estudio.	59

4.3	Resultados - Costos de los casos estudiados	64
4.3.1	Caso 1 – Edificio de viviendas con HAD en primeros niveles	64
4.3.2	Caso 2 – Edificio de hotel con HAD en los primeros niveles (2011)	66
4.3.3	Caso 3 – Hotel con HC Fck = 30 MPa (1986)	70
4.4	Discusión	74
5.	Conclusiones y sugerencias para futuras investigaciones	83
5.1	Conclusiones	83
5.2	Sugerencias para futuras investigaciones	85
	Referencias bibliográficas	86

Lista de figuras

Figura 2.1	Mecanismo de bloqueo (SKARENDAHL Y PETTERSSON, 2000)	19
Figura 2.2	Ventajas del HAD C85 en comparación con el C45: a) Ahorro de consumo de hierro. b) Ahorro en dimensiones (BREITENBUCHER (1998))	33
Figura 3.1	Síntesis del proceso de la investigación (elaboración propia)	43
Figura 3.2	Diseño de la investigación (Elaboración propia)	44
Figura 4.1	Primer caso de estudio: (a) Planta de subsuelo de estacionamientos. (b) Planta tipo de la torre de viviendas. (c) Planta del primer nivel del centro comercial y estacionamientos. (d) Render parcial del complejo. (e) Render general del centro comercial y torres (Fuente: archivo estudio GP)	55
Figura 4.2	Segundo caso de estudio: Vistas de la fachada principal del hotel (Fuente: archivo estudio GP)	56
Figura 4.3	Planta Nivel 2 (Fuente: archivo estudio GP)	57
Figura 4.4	(a) Corte transversal. (b) Corte longitudinal (Fuente: archivo estudio GP)	57
Figura 4.5	Tercer caso de estudio: (a) y (b) Ubicación del hotel. (c) Corte esquemático de la torre del hotel. (d) Fachada principal (Fuente: archivo estudio GP)	58
Figura 4.6	Corte caso 1	64
Figura 4.7	Cronograma de avance del hormigón	67
Figura 4.8	Pilares existentes	70
Figura 4.9	Pilares Fck = 60 MPa.	73
Figura 4.10	(a) Pilares con resistencia existente Fck = 30 MPa. (b) Pilares con resistencia Fck = 60 MPa.	74
Figura 4.11	Costo de HAC para diferentes resistencias.	79
Figura 4.12	Ahorro de costo (%) por m ³	80

Lista de tablas

Tabla 2.1	Requisitos mecánicos del cemento portland normal, según UNIT 20 (2017)	9
Tabla 2.2	Ejemplos de HAR en Uruguay.	13
Tabla 2.3	(a) Ejemplos de edificios con HAC en Uruguay. (b) Ejemplo de complejo de viviendas unifamiliares con sistema Forsa con HAC en Uruguay año 2019.	21
Tabla 2.4	Consumo de materiales para la ejecución de un nivel de hormigón con Fck = 21 a 60 MPa (elaboración propia con base en DAL MOLIN et al (2007)	34
Tabla 2.5	Costo comparativo de estructura de hormigón con Fck = 21 a 60 MPa (valores en dólares americanos) (elaboración propia con base en DAL MOLIN et al (2007)	34
Tabla 2.6	Consumo de materiales para la ejecución de la estructura de hormigón para los modelos 1 y 2	36
Tabla 2.7	Costo en reales para la ejecución de la estructura de hormigón para los modelos 1 y 2.	36
Tabla 2.8	Análisis por área de construcción. Datos teóricos edificios 1 y 2 (GUIMARÃES, 2000)	37
Tabla 2.9	Análisis por área de construcción. Datos teóricos edificios 1 y 3 (GUIMARÃES, 2000)	37
Tabla 2.10	Análisis por área de construcción. Datos reales edificios 1 y 2 (GUIMARÃES, 2000)	38
Tabla 2.11	Análisis por área de construcción. Datos reales edificios 1 y 3 (GUIMARÃES, 2000)	38
Tabla 3.1	Dosificaciones para distintos hormigones (RODRÍGUEZ et al, 2007)	48
Tabla 3.2	Resistencia a la compresión y otras características del hormigón a los 28 días (RODRÍGUEZ et al, 2007).	48
Tabla 3.3	Costo de las dosificaciones para hormigones según tabla 3.1 (elaboración propia)	49
Tabla 3.4	Relación costos por m ³ y MPa (elaboración propia)	50
Tabla 3.5	Validación de la investigación (Elaboración propia).	52
Tabla 4.1	Cotización del m ³ de los hormigones suministrados por la empresa 1.	60
Tabla 4.2	Cotización del m ³ de los hormigones suministrados por la empresa 2	60
Tabla 4.3	Cotización del m ³ de los hormigones suministrados por la empresa 3.	60
Tabla 4.4	Insumos necesarios para la ejecución de 1m ³ de pilares de hormigón armado	61
Tabla 4.5	Resumen de incidencias para pilares dado por empresas de plaza.	61
Tabla 4.6	Valores de mercado diciembre 2017.	62

Tabla 4.7	Rendimientos de 1m ³ de HC Fck = 300 MPa, basado en tabla de rendimientos teórica de Caviglia, calculados con valores de mercado a diciembre 2017.	63
Tabla 4.8	Resumen sobre incidencia de componentes del hormigón armado en 1m ³ para pilares calculado en esta tesis. Donde Δ es la diferencia entre tabla 4.5 y resultados obtenidos en esta tesis.	63
Tabla 4.9	Metros cúbicos total edificio caso 1.	64
Tabla 4.10	Metros cúbicos de hormigón según la resistencia a compresión a los 28 días de edad.	65
Tabla 4.11	Costo total de hormigón en masa.	66
Tabla 4.12	Cantidad en m ³ de hormigón para el caso 2 hotel para las diferentes resistencias en MPa (elaboración propia).	68
Tabla 4.13	Reducción de costos entre situación real y situación hipotética (elaboración propia).	68
Tabla 4.14	Rubrado empresa constructora a fecha de licitación.	69
Tabla 4.15	Hormigón armado que plantea empresa constructora.	69
Tabla 4.16	Volumen de hormigón total de los pilares con hormigón de resistencia a la compresión real.	71
Tabla 4.17	Comparación entre hormigón de resistencia a la compresión Fck = 60 MPa y Fck = 45 MPa.	71
Tabla 4.18	Dosificación para HAR con CCA.	75
Tabla 4.19	Dosificación para HAC con CCA.	75
Tabla 4.20	Comparativa del costo de m ³ de hormigones HC y HAD para empresa 1.	76
Tabla 4.21	Dosificación ACI (2007)	79
Tabla 4.22	Resultado en estado fresco y endurecido, ACI (2007).	79
Tabla 4.23	Dosificación y propiedades para HAC a los 28 días	80

Lista de abreviaturas, siglas y símbolos

a/(c+CCA)	Relación agua/(cemento + ceniza de cáscara de arroz)
a/p	Relación agua/pasta
ABC	Actividad Basada en Costos, del inglés Activity Based Costing
ACI	Instituto Americano del Hormigón, del inglés American Concrete Institute
ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
BCU	Banco Central del Uruguay
BRL	Real brasileño
C20	Hormigón con resistencia característica Fck de 20 MPa
C25	Hormigón con resistencia característica Fck de 25 MPa
C30	Hormigón con resistencia característica Fck de 30 MPa
C45	Hormigón con resistencia característica Fck de 45 MPa
C60	Hormigón con resistencia característica Fck de 60 MPa
CCA	Ceniza de cáscara de arroz
CP	Cemento Portland
CPN	Cemento Portland Normal
COQ	Costos de la calidad, del inglés Cost of Quality
CSIC	Comisión Sectorial de Investigación Científica
CAPEX	Costos de inversión, del inglés Capital Expenditures
DFX	Diseño por factores
Fck	Resistencia característica a la compresión del hormigón a los 28 días
HC	Hormigón convencional
HAD	Hormigón de alto desempeño
HAR	Hormigón de alta resistencia
HAC	Hormigón autocompactante
HMAR	Hormigones de muy alta resistencia
ICPA	Instituto del Cemento Portland Argentino
IPC	Índice de Precios del Consumo
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
MPa	Mega Pascal
UNE	Norma Española
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
USD	Dólares americanos
UYU	Pesos uruguayos
OPEX	Costos operacionales, del inglés Operative Expenditures
PEF	Polvo de Electrofiltro
SP	Superplastificante
VEA	Aditivos moduladores de la viscosidad
Δ	Delta, empleado en capítulo 2 y 4

1. Introducción

1.1 Justificación de la investigación

En la industria de la construcción la utilización del hormigón como material estructural significó grandes ventajas en la ejecución de obras de arquitectura e ingeniería. En las últimas décadas el desarrollo de los nuevos tipos de hormigones mejorando sus prestaciones apuntó a contemplar otras necesidades que fueron surgiendo, según el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA, 2000) “El mundo moderno exige al hombre superar problemas ingenieriles cada vez mayores: ambientes más agresivos, mayores alturas de colocación, menores tiempos para el desencofrado, etc...”.

El estudio de estos nuevos hormigones se ha enfocado fundamentalmente en sus prestaciones, de allí que son hormigones con mejores prestaciones que el convencional, o sea, hormigones de alto desempeño, dejando en segundo plano un parámetro fundamental a la hora de evaluar su utilización, que es el aspecto económico, ya sea en cuanto a su costo y/o viabilidad. Siguiendo a MASCARO (2004), se puede afirmar que generalmente se conoce muy poco al respecto de las relaciones entre las decisiones de proyecto y el costo total de la edificación, aunque ellas existen y son muy claras. Hoy en día se torna indispensable analizar los aspectos económicos de las decisiones arquitectónicas y cómo influyen en la decisión del costo final de un edificio. Dada la falta de conocimiento de la influencia relativa de cada una de las variables que integran el costo total de la obra por parte de los técnicos es frecuente enfrentarse a limitaciones presupuestarias muy grandes y al tratar de paliar este problema, inmediatamente se trata de limitar y economizar en todos los ítems posibles, obteniendo como resultando la pérdida de calidad, está sensiblemente más significativa que la economía obtenida, disminuyendo en vez de aumentar la relación calidad-costo.

A nivel local, los hormigones de alto desempeño (HAD) son materiales poco conocidos, lo que significa que en los casos puntuales en que se recurre a los

mismos, sean subutilizados. En este sentido, se puede afirmar que actualmente la industria de la construcción uruguaya se encuentra atrasada en la utilización de los HAD en relación con los países desarrollados.

Lejos nos encontramos del nivel alcanzado en la utilización del hormigón durante las primeras décadas del siglo XX, cuando era posible relevar en Uruguay el mismo nivel de desarrollo en la utilización del hormigón que en Europa, situación que posicionaba al país como uno de los pioneros en América en la utilización del hormigón armado, participando del cambio de paradigma que significaba dejar atrás la utilización de sistemas constructivos tradicionales para incorporar un nuevo material, el hormigón armado. Según ACEVEDO (1905), es destacable el rol que asumió la academia en este proceso de implementación de nuevas tecnologías para la construcción, trasladando y adaptando a nuestro medio los sistemas constructivos utilizados en Europa.

Casi un siglo después, tanto la industria como la academia han dejado de lado esta posición de vanguardia en la utilización de nuevos sistemas constructivos, constatándose solo algunos casos puntuales de utilización de los HAD, así como un abordaje académico parcial al estudio del mismo, obviando profundizar en su incidencia en los costos del proyecto.

La industria de la construcción uruguaya utiliza sistemas constructivos fundamentalmente tradicionales, donde el conocimiento se genera y se transmite en la obra a través de la experiencia. Salvo por el uso de nuevas maquinarias, se construye de la misma manera que hace décadas.

Es en este contexto que se visualiza la ausencia de un acercamiento profundo a la utilización de los HAD, y más concretamente al estudio de su viabilidad económica desde la etapa del anteproyecto o del diseño, sin lugar a dudas un elemento clave a la hora de optar por cualquier sistema constructivo. Cabe traer a colación las afirmaciones de CHANDÍAS (2006), "...el costo siempre fue la llave que abrió el camino de la construcción de un proyecto, pero hoy, su conocimiento previo es decisivo, tanto que podemos decir sin eufemismo alguno que el costo es parte del diseño...".

Se detecta como un problema la necesidad de obtener un costo real y válido del HAD de una forma rápida y clara para que el técnico pueda optar por el uso de este material, aclarando al comitente las ventajas y su precio ya que la pregunta clave en el momento de optar por el material es saber su costo primario. También es conveniente analizar luego y evaluar la viabilidad económica y en el tiempo, cuándo y dónde emplearlo para que la rentabilidad sea positiva.

La presente investigación busca brindar un panorama de evaluación económica en la utilización del HAD lo más claro posible para una tesis de Maestría.

Se selecciona el tema de la presente investigación con la certeza de que, a pesar de la complejidad dada por la variabilidad e incertidumbre que involucran las actividades en esta industria, se debería abordar el tema desde una perspectiva diferente a la tradicional.

La investigación se basará en estimar los costos del HAD el cual no es un número fijo, ya que implica:

- Evaluar los riesgos y preverlos en los estimativos.
- Identificar y documentar las posibles causas de variaciones en los estimativos.
- Evaluar las diferentes alternativas de costos.
- Conocer el grado de exactitud de la estimación.
- Estar atento a ajustes a medida que avanza el proyecto.

De aquí que la pregunta clave de esta investigación es cómo evaluar un nuevo material en la industria de la construcción si todavía no es muy conocido en el medio uruguayo y cómo hacer para costearlo si hoy en día no hay una utilización frecuente y tampoco existe personal idóneo en el tema.

Al investigar y querer estimar un precio existe un vacío en cuanto a la bibliografía referente a cómo cotizar, ya que la misma se encuentra desactualizada, no contempla la utilización de nuevos materiales y, menos aún, cómo llegar a un costo adecuado de este nuevo material (el HAD), sobre todo considerando que usualmente las empresas de hormigón premezclado que celan sus dosificaciones, tal como sucede en un medio de reducidas dimensiones como el nuestro. Según JOHNSON Y KAPLAN (1988), a partir de la tercera década del siglo XX y hasta los años 80 no ha habido una evolución significativa de los costos y la gestión, debido sobre todo a la preponderancia de los factores de veracidad y fiabilidad de los datos proporcionados por la contabilidad de costos para valorar estados financieros frente a su utilidad para la gestión y la toma de decisiones.

Interesa el desarrollo de un método para poder cotizar y analizar la viabilidad económica de los HAD con facilidad con el fin de aportarles al profesional y al comitente una herramienta que les permita obtener una estimación de costos lo más cercana posible a la realidad de un proyecto con la utilización de este nuevo material.

Desde el punto de vista del comitente interesa su empleo por ejemplo en obras de grandes superficies donde se quiera colocar pocos pilares, edificios en altura en los cuales las secciones de los pilares en los pisos inferiores pueden reducirse de forma importante, generando mayor espacio para el programa (por ejemplo, más lugares para estacionar autos en estacionamientos subterráneos).

Para STASIOWSKI (1999) la arquitectura e ingeniería son profesiones centenarias y su oferta de servicios tradicional va perdiendo competitividad, se debe producir un cambio de orientación en el sentido de una oferta más global y ágil que inevitablemente conducirá a una revalorización de la empresa y, por extensión, de toda la profesión.

En este sentido es posible considerar como un aporte para renovar la oferta de servicios de estas profesiones, la generación de un trabajo donde se estudie la viabilidad económica de la utilización de nuevos materiales como ser los HAD para el medio uruguayo.

1.2 Objetivo de la investigación

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de la tesis es desarrollar un análisis de los costos en la producción de HAD, en particular HAR y HAC para su utilización en la construcción de edificios en nuestro medio.

1.2.2 Objetivos específicos

Hoy en día existen variedades de HAD dentro de los cuales se encuentran los HAR y HAC. Los objetivos específicos de esta investigación serán evaluar sus costos puestos en obra y determinar su viabilidad en comparación al HC en nuestro medio para estos dos tipos de hormigones, y en el caso de los HAC determinar su grado de utilización en Uruguay.

La elección de estos dos tipos de HAD se debe a que su utilización en Uruguay es cada vez más grande y necesaria.

A partir del objetivo general surgen las siguientes interrogantes:

¿Qué factores inciden a la hora de cotizar hormigones de alto desempeño?

¿Cuáles son las diferencias de los costos directos entre HC y HAD?

¿Es posible verificar su viabilidad económica?

1.3 Estructura de la tesis

La tesis consta de 5 capítulos.

El primer capítulo es una introducción, trata la justificación, objetivos, alcance y estructura de la investigación.

El segundo capítulo trata sobre los HAD y costos en la industria de la construcción.

En el tercer capítulo se estudia el método de investigación desarrollando la estrategia y se describen las tareas de investigación.

En el cuarto capítulo se desarrollan los estudios de casos, se obtienen resultados y se discuten.

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y sugerencias para futuras investigaciones.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas.

1.4 Alcance de la investigación

El diseño de la investigación no es experimental, es teórico.

El alcance de esta investigación se limita a estudiar los costos y viabilidad económica de dos de los distintos tipos de HAD: el HAR y el HAC, que se seleccionaron debido a sus prestaciones y empleo en nuestro país.

Se analizará el costo de estos tipos de HAD tomando en cuenta los valores suministrados por varias empresas de hormigón premezclado del medio y empresas constructoras que lo ejecutan estudiando también su puesta en obra. Se dejará para un estudio futuro el análisis de costos para otros HAD.

2. Hormigón de alto desempeño (HAD): estado del arte sobre sus costos y viabilidad económica

En este capítulo se realizará un estado del arte donde se analizarán los costos de los hormigones y su viabilidad económica, para llevar a cabo este análisis previamente se presentan consideraciones generales sobre los hormigones de alto desempeño (HAD).

Se comienza con el punto 2.1 con las consideraciones generales de los HAD donde se desarrollará los tipos de hormigones estudiados en esta tesis: hormigones de alta resistencia (HAR) y hormigones autocompactantes (HAC).

Luego en el punto 2.2 se desarrolla una síntesis del análisis de costos.

Por último, en el 2.3 se presenta el estado del arte sobre los costos de los HAD y su viabilidad económica.

2.1 Consideraciones generales sobre HAD

NEVILLE y AITCIN (1999) al abordar la definición del HAD argumentan que la expresión “hormigón de alto desempeño” no es muy afortunada ya que la mayoría de sus aspectos no son fundamentalmente diferentes del hormigón que hemos estado empleando, pues no contiene ningún ingrediente nuevo y no involucra nuevas prácticas en la obra. De hecho, el HAD evolucionó gradualmente durante los últimos 15 años más o menos, principalmente por la producción de hormigón con resistencias cada vez más altas: 80, 90, 100, 120 MPa, y a veces inclusive mayores. Actualmente, en algunas partes del mundo pueden producirse de manera rutinaria resistencias de 140 MPa, pero el HAD no es lo mismo que el HAR. El énfasis ha cambiado de una resistencia muy alta a otras propiedades deseables en algunas circunstancias. Estas son: alto módulo de elasticidad, alta densidad, baja permeabilidad y resistencia a algunas formas de ataque.

Según NEVILLE y AITCIN (1999) los ingredientes para los hormigones convencionales (HC) y HAD son iguales, pero esto no es enteramente correcto. Primero, el HAD con frecuencia contiene humo de sílice, mientras que el HC por lo regular no lo incluye. Segundo, el HAD generalmente, aunque no siempre, contiene ceniza volante o escoria de alto horno granulada y molida (o escoria, para abreviar), o ambos materiales.

ACI (2000) define al HAD como aquel hormigón que cumple con los requisitos especiales de desempeño y uniformidad que no siempre pueden ser alcanzados rutinariamente usando sólo materiales convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado. Esta descripción incluiría a los HAC, los de contracción compensada, los compactados con rodillo y otros tipos de “hormigones especiales”. Sin embargo, en la mayoría de los casos, cuando se habla de elaborar un HAD se apunta a un objetivo claro y definido: obtener un material que, en estado fresco, presente una alta trabajabilidad, por razones de economía y calidad constructiva; mientras que en estado endurecido se comporte como una “roca” maciza, lo más homogénea posible, de elevada compacidad, estabilidad dimensional y durabilidad.

Debido a la gran utilización del hormigón como material de construcción, tanto en arquitectura como en ingeniería, surge la necesidad de contar con hormigones con propiedades distintas al HC que permitan atender y solucionar nuevas exigencias de mercado, proyecto, tiempo, costos, etc., entre la gran variedad de HAD que existen. En esta tesis se estudiarán únicamente dos tipos, el hormigón de alta resistencia (HAR) y el hormigón autocompactante (HAC) ya que en la industria de la construcción en nuestro país son los que se requieren en mayor medida, por lo que se estudiarán estos dos tipos de HAD a continuación.

2.1.1 Consideraciones sobre hormigones de alta resistencia (HAR)

Para ACI (1998) el HAD se define como “un hormigón que cumple con la combinación de desempeño especial y requisitos de uniformidad, combinación que no puede ser rutinariamente conseguida usando solamente los componentes tradicionales y prácticas normales de mezcla, colocación y curado”. Dentro de los HAD se encuentran los HAR que ACI 363R-10 (2010) define como aquellos hormigones que presentan una resistencia a la compresión de 55 MPa o mayor.

La elaboración de HAR que cumpla adecuadamente con los requerimientos de trabajabilidad, asentamiento, desarrollo de resistencia a la compresión simple y

durabilidad, da lugar a la realización de controles exigentes a los materiales de construcción.

En Chicago en la década de los 70 se lograban hormigones de entre 65 y 80 MPa, siendo los pioneros en el desarrollo de estos hormigones, sin embargo, hoy en día en Uruguay estas resistencias se consideran muy altas.

Según JIMÉNEZ MONTOYA (2009) en España se consideran HAR aquellos cuya resistencia característica de compresión F_{ck} en probeta cilíndrica 15x30 a 28 días, supera los 50 MPa sin rebasar los 100 MPa y se consideran como hormigones de muy alta resistencia (HMAR) aquellos cuya resistencia supera los 100 MPa, denominándose hormigones convencionales los de F_{ck} igual o menor de 50 MPa.

Para Uruguay, en la actualidad dado el avance tecnológico y la poca mano de obra especializada, los hormigones a partir de 45 MPa ya son considerados como HAR.

Puede decirse que las altas resistencias comprenden las tres propiedades principales de todo hormigón: resistencia, durabilidad y trabajabilidad.

Una buena trabajabilidad para JIMÉNEZ MONTOYA (2009) significa que la masa de hormigón fresco debe tener una elevada fluidez sin que llegue a producirse segregación; esta propiedad depende de las características de los materiales constituyentes y de su dosificación. Además, la masa debe ser capaz de pasar entre las armaduras de los elementos que se está hormigonando, lo que depende de la forma y disposición de tales armaduras.

El problema de conseguir un hormigón de alta resistencia consiste en cómo reducir la cantidad de agua de amasado sin que ello afecte a la trabajabilidad del hormigón. Este problema se soluciona, en parte, mediante el empleo de superfluidificantes, que permiten reducciones de agua de hasta un 30% con efectos secundarios mucho menores que los correspondientes a los fluidificantes, y en parte, mediante el empleo de adiciones como la micro-sílice o las cenizas volantes, etc. MEHTA Y MONTEIRO (1994).

La calidad y el desempeño de cada ingrediente pasan a ser fundamentales en determinado momento, a medida que la resistencia aumenta hacia el valor buscado, pero algunos aspectos son más críticos que otros. Algunos de ellos tienen una influencia mucho mayor en el factor económico del hormigón de alto

desempeño, y determinan su competitividad, no solo con respecto al acero sino también al hormigón convencional.

ACI 363R-10 (2010) recomienda que los materiales necesarios para producir un HAR deben atender requisitos que favorezcan la trabajabilidad y la resistencia mecánica, de forma más estricta que los materiales utilizados en hormigones convencionales.

ALMENDRA FREITAS (2005) dice que para obtener un HAR son necesarios inevitablemente materiales adecuados que posibiliten el desempeño deseado.

Los materiales que se emplean para realizar un HAR son: cemento, agregados, agua, aditivos y eventualmente adiciones.

En la norma uruguaya UNIT 20 figuran cementos hasta el CPN 50, siendo los más utilizados los CPN 40, ya que es muy difícil obtener CPN 50 o mayor. Como indica la tabla 2.1 de la NORMA UNIT 20/2017 sobre requisitos físicos:

Requisitos mecánicos					
Categoría	Resistencia a la compresión (MPa)				Ensayo de referencia
	2 días	7 días	28 días		
CPN 30	-	Mín. 16	Mín. 30	Máx. 50	UNIT-ISO 679:2009
CPN 40	Mín. 10	-	Mín. 40	Máx. 60	
CPN 50	Mín. 20	-	Mín. 50	-	

Tabla 2.1 - Requisitos mecánicos del cemento portland normal, según UNIT 20 (2017).

De acuerdo con la recomendación de ACI 363R-10 (2010), los agregados pequeños de origen natural, como las arenas, son ideales para el uso en HAR debido a su forma redondeada y a su textura suave, ya que en este caso la mejor distribución granulométrica favorece a una mejor trabajabilidad y adaptación a la forma del encofrado. Módulos de finura con valores por debajo de 2,5 resultan hormigones muy viscosos dificultando su uso. Se recomiendan módulos de finura con valores cercanos a 3,0, o sea arenas más gruesas, que proporcionan una pequeña reducción en la cantidad de agua de mezclado para un hormigón con la misma trabajabilidad y mejor resistencia a la compresión.

Los agregados y el agua a ser empleados para HAR deben cumplir con los requisitos necesarios para realizar un HC (UNIT 1050, 2005) teniendo en cuenta

que a mayor resistencia requerida se debe prestar mayor atención a la selección de los agregados a utilizar (AITCIN, 2000).

Otros componentes son los aditivos como los superplastificantes que, según JIMÉNEZ MONTOYA (2009), AITCIN (2000), MEHTA Y MONTEIRO (1994), provocan una gran dispersión de las partículas de cemento, impidiendo la floculación de las mismas, con lo que se reduce mucho el agua intersticial y se consigue mejorar considerablemente la hidratación del conglomerante. Se logra así aumentar la plasticidad de la masa con relaciones agua/cemento muy bajas, lo que conduce a obtener hormigones muy trabajables, muy poco porosos y de alta resistencia.

Para JIMÉNEZ MONTOYA (2009) en cuanto a las adiciones como la acción de la microsilíce sobre el hormigón es doble; por una parte, actúa como árido fino, mejorando la red capilar y disminuyendo el tamaño de los poros; por otra, dado su carácter puzolánico, se combina con la cal libre del cemento formando silicatos, es decir, nuevos compuestos resistentes.

Las cenizas volantes para JIMÉNEZ MONTOYA (2009) proporcionan a la masa del hormigón mayor plasticidad y menor calor de hidratación. Al sustituir parte del cemento por ceniza volante se reduce la demanda de agua de la masa y las resistencias disminuyen a cortas edades si bien aumentan a largo plazo.

Con la aportación simultánea de microsilíce y superplastificantes a una masa de hormigón de dosificación adecuada puede reducirse notablemente la relación agua/cemento, obteniéndose masas muy trabajables, uniformes y poco segregables, aptas para su colocación por bombeo. Se obtienen así hormigones muy resistentes, impermeables y de gran durabilidad.

Según NEVILLE (2006) la relación agua cemento es el factor que controla la resistencia, debido a que el volumen relativo del espacio originalmente ocupado por el agua determina el volumen total de la materia sólida en el hormigón endurecido. En términos muy generales, mientras más alto sea el volumen del material sólido, mayor será la resistencia a la compresión. De ahí que en el HAD, al igual que en el HC, la resistencia a los 28 días es una función de la relación agua/cemento.

También para MEHTA (1999) y HELENE (1997) la baja relación agua/cemento generalmente utilizada en los HAR asegura tanto una buena resistencia como una buena durabilidad.

La trabajabilidad es la propiedad en estado fresco más importante para el HAR, la ACI 116R-00 (2000) define la trabajabilidad como la propiedad del hormigón o mortero terminado de mezclar que determina la facilidad y homogeneidad con las cuales se puede mezclar, colocar, compactar y acabar.

En cuanto a las propiedades del HAR en estado endurecido la resistencia a la compresión es la característica más significativa según ALMENDRA FREITAS (2005), su especificación es de primordial importancia tanto para el dimensionado de las estructuras como para la dosificación del material.

De acuerdo con AITCIN (1998) la rotura del hormigón siempre se desarrollará en la parte más débil, la fractura, en especial en la compresión que es un proceso del tipo “eslabón débil”. Por lo tanto, además del número, tamaño, y forma de los poros, su distribución espacial o concentración local es un factor importante en la rotura.

Según AITCIN (2000) para HAR el curado es el procedimiento fundamental ya que es el responsable por mantener el agua necesaria de hidratación del cemento durante el endurecimiento, ya que una pérdida muy rápida de agua, que ya es poca debido a la baja relación agua/aglomerante, puede afectar la resistencia mecánica y causar retracción.

ALMENDRA FREITAS (2005) señala que los HAR presentan menor tendencia a la microfisuración, debido a que la pasta posee pocos vacíos y por lo tanto es menor la diferencia del comportamiento elástico entre las fases.

Según la recomendación ACI 363R-10 (2010), la retracción del HAR es similar al HC pero gracias al uso de los superplastificantes es posible minimizar la cantidad de agua y la retracción. Debido a su alto consumo de cemento y bajo consumo de agua difiere de lo que ocurre en los HC manifestándose principalmente en la retracción plástica, la retracción autógena y la retracción por secado.

En cuanto a la dosificación de los HAR, para AITCIN (2000) es importante la evaluación de técnicas de dosificación específicas, debido a que en estos hormigones la trabajabilidad depende fuertemente del uso de aditivos plastificantes y superplastificantes, más que del consumo de agua.

BALZAMO et al. (2012) afirman que la mezcla óptima es aquella que para la misma propiedad requerida del hormigón minimiza costos, en cuanto se alcancen las especificaciones, pero entendidos los costos del hormigón en sí

mismo y los costos de operaciones de dosificación en laboratorio y de producción en central, así como de colocación en obra. Existen mezclas exitosas usadas, que son generalmente consultadas cuando se diseña un nuevo hormigón para una determinada resistencia, pero no aplicables por extrapolación a cualquier cemento, aditivo, adición u agregado utilizado. Aunque los métodos de dosificación de hormigones difieren entre sí, mantienen factores comunes en su desarrollo.

Los factores principales a considerar en el diseño de una mezcla de hormigón son en lo que se refiere al estado fresco: la trabajabilidad; al estado endurecido: la resistencia mecánica, la durabilidad u otras especificaciones; y a la economía: el costo.

Respecto a los aspectos económicos de la dosificación, es deseable que los materiales utilizados deban ser técnicamente aceptables y al mismo tiempo, económicamente ventajosos. En este aspecto influye el factor de escala de obra, como es el caso de proyectos importantes, donde los agregados — materiales comúnmente más baratos—, se usan en cantidades significativas y ante competencia de proveedores, pocos centavos del costo impactan en gran medida en los costos finales del hormigón.

Una consideración clave desde el punto de vista económico y de la sustentabilidad, es la disminución del costo relativamente elevado del cemento respecto a los otros componentes significativos del hormigón.

En el trabajo de RODRÍGUEZ et al (2007) se presenta la ceniza de cáscara de arroz (CCA) para uso como adición en hormigones. Por una parte, cuando se produce mediante incineración controlada es una puzolana altamente activa, por lo que tiene la capacidad de aumentar la resistencia del hormigón a edades tempranas. Por otra parte, cuando se quema industrialmente sin condiciones controladas se pueden optimizar sus características (granulometría, superficie específica) para que se comporte como una puzolana. Estas adiciones tienen una influencia favorable sobre la resistencia y durabilidad del hormigón. Las ventajas técnicas, económicas, ambientales y de energía ofrecidas por el hormigón estructural que contiene CCA puzolánica han estimulado el desarrollo de la investigación sobre las propiedades de este material.

El actual desafío es lograr incorporar materiales más económicos en reemplazo del cemento (escoria, cenizas volantes, residuos industriales) generando una economía indirecta que representa la utilización adecuada de los residuos,

reduciendo la contaminación ambiental y el uso de la energía y preservando las fuentes de recursos naturales.

En la tabla 2.2 pueden verse algunos ejemplos de la utilización de HAR en edificios en Uruguay.

OBRAS EN URUGUAY DONDE SE UTILIZÓ HAR					
Obras	Descripción	Fecha	Ubicación	Resistencia del HAR MPa	Imagen
Puente de Las Américas	Puente colgante, tiene 488 metros de longitud, con un tramo aéreo de 140 metros, y se encuentra sostenido por 30 tirantes de acero	Inicio de obras: octubre 2002, inaugurado en 2005	Av. Giannattasio, Ciudad de la Costa, Montevideo	Fck a los 28 días 45 MPa	
Torre de Antel	El complejo posee cuatro edificaciones: la torre de las telecomunicaciones, el edificio de clientes, el museo y el auditorio.	Fin de obras: 2002	Guatemala 1075 y Paraguay, Montevideo	Fck a los 28 días 45 MPa en pilares de los primeros niveles	
WTC Torre 4	Edificio privado con 125m de altura tiene 40 niveles y consta de 53450 m ² construidos - Destino: oficinas.	Inicio de obras: 2009, inaugurado en 2013	Dr. L. Bonavita y Cr. Luis E. Lecueder, Montevideo	Fck a los 28 días 45 MPa en pilares de los 4 primeros niveles	
Torres Nuevocentro	Torres de viviendas, constan de 22 pisos, totalizando 210 unidades de 1, 2 y 3 dormitorios	Inicio de obras: setiembre 2012, inaugurado en 2016	Avenida Luis Alberto de Herrera y Bulevar Artigas, Montevideo	Fck a los 28 días 60 MPa en pilares losas y vigas de los primeros niveles	
Hotel Hilton	El proyecto se compone por subsuelo, planta baja y 17 niveles; 172 habitaciones, salas de reuniones, restaurante, piscina interior	Inicio de obras: setiembre 2013, inaugurado en 2015	Av. Dr. Luis Bonavita, Montevideo Shopping, Montevideo	Fck a los 28 días 45 MPa en pilares losas y vigas de los primeros niveles	
Edificio Look Brava	Consta de 26 pisos con viviendas más dos subsuelos de estacionamientos, planta baja y entrepiso, con altos estándares de calidad	Inicio de obras: 2012, inaugurado en 2017	Av. Del Mar, 20100 Punta del Este, Maldonado	Fck a los 28 días 50 MPa en pilares del núcleo hasta PB. En los dos niveles de subsuelo en planta baja y entrepiso 40 MPa	
Edificio oficinas palermo	Contará con dos subsuelos de parking, 17 pisos de oficinas y un último piso destinado para una terraza panorámica	Inicio de obras 2017, inaugurado en 2019	La Cumparsita e Ing. Carlos María Morales, Rambla Rep. Argentina, Montevideo	Fcka los 28 días 45 MPa en pilares pantalla del núcleo	

Tabla 2.2. Ejemplos de HAR en Uruguay.

2.1.2 Consideraciones sobre hormigones autocompactantes (HAC)

Los HAC según OKAMURA (1997) son los hormigones capaces de fluir en el interior del encofrado, llenando de forma natural el volumen del mismo, pasando entre las barras de armaduras, consolidando únicamente bajo la acción de su propio peso, sin compactación interna o externa, de allí que el esparcimiento en estado fresco es la característica que diferencia al HAC del HC.

BURON et al. (2006) mencionan que las características prestacionales específicas que aporta la autocompactabilidad son:

- Gran facilidad de colocación que permite que el hormigón alcance lugares de difícil acceso y rellene completamente secciones con elevada densidad de armaduras.

- Elimina los medios de compactación, ahorrando la energía correspondiente y evitando el elevado nivel de ruido que genera la vibración.
- Mejora la seguridad y salud en la obra al evitar, durante el proceso de puesta en obra del hormigón, el uso de mangueras con conductores de electricidad, la generación de ruidos y la realización de una actividad poco ergonómica como es el vibrado interno de la sección de hormigón.
- Mejora las condiciones medio ambientales en el entorno de las obras al evitar ruidos y reducir los plazos de ejecución.
- Es un material adecuado para colocarlo mediante bombeo.
- Ahorra el costo de los equipos de compactación y el correspondiente a la conservación y mantenimiento de los mismos, así como el inmovilizado en lista de repuestos.
- Ahorra el consumo de energía, generalmente eléctrica, utilizada en el proceso de puesta en obra del hormigón.
- Mejora la calidad de acabado de las superficies vistas, aumentando su uniformidad como consecuencia de eliminar la heterogeneidad que produce el vibrado.
- Acorta los plazos de ejecución.
- Aumenta el número de puestas del encofrado en la misma cantidad de tiempo.
- Aumenta la productividad del proceso de puesta en obra del hormigón.
- Reduce el costo global de la obra.

BALZAMO et al. (2012) mencionan que el aspecto sobresaliente del HAC se relaciona con las condiciones que presenta en estado fresco. Estos hormigones son capaces de deformarse por acción de su propio peso, llenando los encofrados sin necesidad de vibración interna o externa y con capacidad para sortear obstáculos, como por ejemplo, la presencia de armaduras. Las ventajas más significativas de estos hormigones se vinculan, entonces, con una rápida y muy simple colocación sin compactación mecánica, unida a un mejoramiento en las condiciones de seguridad e higiene durante la etapa constructiva, debido a un menor nivel de ruido que se genera al no existir la compactación.

VALCUENDE et al. (2007) afirman que una de las dificultades que plantea la fabricación de este tipo de hormigones es la estabilidad de la mezcla, pues a medida que aumenta la fluidez del material, su resistencia a la segregación disminuye.

La segregación —que puede producirse durante el transporte, vertido y tras la puesta en obra— es un fenómeno que se trata de explicar mediante modelos matemáticos. Alguno de estos modelos permite determinar el tamaño máximo del árido que puede permanecer en suspensión en una mezcla.

Para JIMÉNEZ MONTOYA (2009) en relación a los materiales componentes del HAC no difieren esencialmente de los HC, a excepción del tamaño máximo del árido, que suele ser menor.

Los cementos son los mismos, siendo conveniente emplear cementos de bajo calor de hidratación —especialmente cuando se trata de hormigones grandes macizos—, dado que la dosis de cemento suele ser más alta que en los hormigones tradicionales. Tanto el valor máximo de la relación a/c como la cantidad máxima de cemento por m³ de hormigón, deben cumplir las limitaciones establecidas para el HC.

Para confeccionar los HAC en nuestro país puede utilizarse cualquier tipo de cemento, que cumpla con las especificaciones de la norma UNIT 20; 2017.

En su tesis doctoral VILANOVA (2009) comenta que existen cementos no convencionales que por sus características son muy apropiados para elaborar hormigón autocompactante, como el cemento con alto contenido de belita (40%-70%) que hace que se obtengan mayores resistencias a largo plazo y un menor calor de hidratación (UOMOTO Y OZAWA, 1999). Esto último es muy significativo, pues en la elaboración de hormigón autocompactante se utilizan generalmente grandes cantidades de cemento, lo cual favorece enormemente la retracción y la consecuente fisuración del hormigón, de allí la importancia de utilizar un cemento de bajo calor de hidratación. Por otro lado, la utilización de cementos más finos, debido a su mayor velocidad de hidratación, contribuye a ganar resistencia en el hormigón (NEVILLE, 2002).

Por lo que para RODRIGUEZ et al. (2006) los agregados deben cumplir las normas UNIT 84 y 82 así como con UNIT 1050.

En relación a los agregados CAÑIZARES (2012) dice que la cantidad de cemento que se recomienda está entre 350 kg/m³ y 500 kg/m³. Valores mayores a 500 kg/m³ pueden traer problemas por aumento de retracciones y valores cercanos o inferiores a 350 kg/m³ exigen la inclusión de otro material fino como filler, puzolana, escoria de altos hornos, microsíllice, etc.

Asimismo agrega que en relación a los agregados, los áridos que se utilizan para confeccionar los HAC son los mismos que los utilizados para hormigones convencionales con la limitación del tamaño máximo; la mayoría de los investigadores indican que no deben ser mayores a 20 mm (3/4”).

Las arenas naturales (rodadas) por su forma redondeada favorecen la trabajabilidad del hormigón; las trituradas aumentan el rozamiento interno, necesitando mayor cantidad de agua para lograr el mismo resultado que las naturales.

Otro factor que se debe considerar en las arenas es el contenido de finos, mayor porcentaje de finos implica mayor cohesión y mayor requerimiento de agua, los finos no deben ser perjudiciales para el hormigón.

VILANOVA (2009) señala que al igual que en la elaboración de los hormigones convencionales, el agua de amasado del HAC para que sea apta debe de estar limpia y encontrarse libre de impurezas para no producir alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en el fraguado y en su endurecimiento, ni permitir reducciones en sus resistencias o afectar su durabilidad. Su misión, aparte de la hidratación del cemento y de los demás componentes activos, es de actuar como lubricante haciendo que la masa en estado fresco sea trabajable y también la de crear espacios en la pasta para albergar los productos resultantes de la hidratación del cemento.

El empleo de aditivos para BALZAMO et al. (2012) ya viene condicionado por las características de la estructura, el modelo constructivo o las condiciones del medio ambiente a que estarán expuestos. A menudo también permite reducir los costos de construcción por medio de mayor productividad, o disminución de algún material componente.

La norma IRAM 1663, define a los aditivos como: “Material que, aparte del cemento, los agregados y el agua empleados normalmente en la preparación del hormigón, puede incorporarse durante o después de la preparación del pastón con el objeto de modificar alguna o varias de sus propiedades en forma deseada”.

Para la elaboración de HAC es indispensable el uso de aditivos para obtener la autocompactabilidad como se verá haciendo referencia al HAC en estado fresco.

Según BASF (2009) el empleo de adiciones es imprescindible para satisfacer la demanda de finos que requiere el HAC. En general, las cenizas ofrecen grandes resultados en aplicaciones donde no se demande elevada resistencia inicial o se requiera elevado mantenimiento de la consistencia. El empleo de cenizas permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su puzolanicidad. El uso de filler, al ser una adición no reactiva, implica trabajar con mayores cantidades de cemento, pero es igualmente válida para conseguir el efecto reológico. En el caso de la nanosílice, la forma más cómoda de usarlo es en suspensión: MEYCO MS 685, debemos considerar el agua que aporta para calcular la cantidad de agua a añadir para una relación agua/cemento determinada.

Como hace mención ÁLVAREZ (2014) el filler es el nuevo elemento añadido al HAC que tiene como propósito fundamental dar una mejor fluidez, trabajabilidad y cohesión. También reduce el calor de hidratación y la permeabilidad, disminuye la fisuración por retracción y térmica, se considera que su función es básicamente física. Los filler minerales pueden ser inertes o activos. Los inertes son los finos con base de carbonato cálcico (filler calizo) y filler dolomítico, siendo el primero el más utilizado, ya que es el más económico, no aumenta la cantidad del contenido de cemento, y puede dar buenas propiedades reológicas. El filler activo son las puzolanas naturales que reaccionan con la portlandita en el proceso de hidratación del cemento, que a la vez incrementa la resistencia, fundamentalmente la resistencia a compresión, a largo plazo del hormigón, así como en la permeabilidad y durabilidad.

Según RODRÍGUEZ et al. (2016), todas las adiciones deben cumplir los requisitos para fillers establecidos en la norma UNE EN 12620; para las puzolánicas además deben cumplirse las normas UNIT 1035 y 1047.

Debido a las características reológicas especiales de los HAC se emplean adiciones para mejorar y mantener la trabajabilidad, así como para regular la cantidad de cemento y reducir de esta forma el calor de hidratación.

Para VILANOVA (2009), el comportamiento del HAC en estado fresco, difiere mucho con respecto al del HC; de hecho, los ensayos para su caracterización son distintos. Esas características en estado fresco deben cumplir con tres requisitos fundamentales a la hora de elaborar el HAC: capacidad de paso, capacidad de llenado y resistencia a la segregación.

La autocompactabilidad es la principal propiedad en estado fresco del HAC y que lo diferencia del hormigón convencional. La evaluación de las propiedades en estado fresco del HAC se puede realizar de dos maneras. La primera es mediante el estudio de los parámetros reológicos y, la segunda es mediante la realización de ensayos.

Para CREMADES (2011) la reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materiales sometidos a tensiones. Desde los años 70 se ha avanzado mucho en el estudio de la reología del hormigón en su estado fresco, de allí que se hayan diseñado métodos de dosificación de HAC.

La trabajabilidad del HAC se puede evaluar por la capacidad de llenado, capacidad de paso y resistencia a la segregación.

Una mezcla de HAC solo puede clasificarse como autocompactante si se cumplen las tres características mencionadas.

Hay algunos métodos para testear el HAC en estado fresco, pero ninguno de ellos es enteramente satisfactorio ya que el principal obstáculo que se tiene relativo a estos hormigones es la ausencia de un método único de ensayo para evaluar las distintas características.

Es preciso evaluar las tres características en el diseño inicial de la mezcla de HAC para garantizar que se satisfagan todos los aspectos.

Según DE LA PEÑA (2000) entre los muchos métodos de ensayo propuestos para evaluar la capacidad de autocompactación del hormigón, se destacan el escurrimiento de cono, la caja L, el tipo U y el embudo V, los cuales se describen más adelante. Además de los mencionados, están el reómetro, el anillo J y algunos aparatos especiales para medir la capacidad de llenado simulando secciones con alta densidad de armaduras. El objetivo de los ensayos es determinar la fluidez necesaria y la cohesión suficiente para que no se produzca segregación en la mezcla.

Para AGRINATI (2008) la capacidad de relleno es la característica relacionada con la movilidad y fluidez del hormigón. El hormigón tiene que deformarse y moldearse al encofrado únicamente bajo la acción de su propio peso y sin la ayuda de medios mecánicos externos. Para obtener una capacidad de relleno adecuada es necesario reducir la fricción entre las partículas sólidas y mejorar la deformabilidad de la pasta. La fricción entre las partículas sólidas de la mezcla

(árido grueso y fino) reduce la deformabilidad del hormigón. Una forma de reducir la fricción es reducir el contacto entre las partículas, disminuyendo el volumen de áridos, aumentando el volumen de pasta, y optimizando el esqueleto granular con el aumento de finos.

La forma más eficaz para mejorar la deformabilidad de la pasta es utilizar superfluidificantes. Estos reducen la tensión de inicio de flujo del hormigón mejorando su fluidez sin perjudicar la viscosidad. La utilización de agua para mejorar el flujo del hormigón tiene el inconveniente de que también reduce la viscosidad de la mezcla, aumentando el riesgo de segregación.

Para SKARENDAHL Y PETTERSSON (2000) la capacidad de paso refiere a la capacidad del hormigón para atravesar las armaduras u otros objetos que se quieren dejar embebidos en el hormigón. El grado necesario de esta característica depende de la cantidad de armadura, la separación entre barras, y de los otros obstáculos que tiene que atravesar el hormigón.

El bloqueo del hormigón se produce cuando el tamaño máximo del árido es demasiado grande y/o cuando el contenido del árido grueso es demasiado alto. En la figura 2.1 se puede ver cómo funciona el mecanismo de bloqueo.

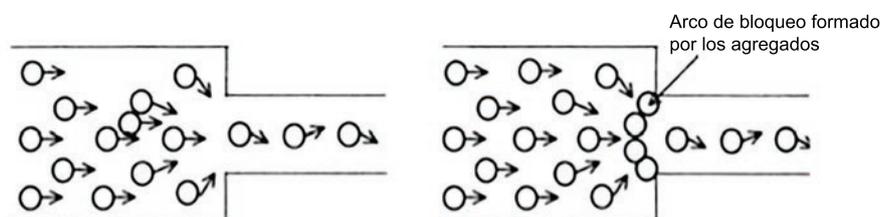


Figura 2.1. Mecanismo de bloqueo (SKARENDAHL Y PETTERSSON, 2000)

Para AGRANATI (2008) el segundo requisito de autocompactabilidad es la resistencia a la segregación. La segregación del hormigón ocurre cuando los componentes del hormigón se separan y su distribución no es homogénea. Se puede manifestar de varias formas, como exudación, separación del árido grueso, o distribución no uniforme de los poros de aire. El HAC, al ser más fluido, está más propenso a la segregación que el hormigón convencional. La resistencia a la segregación está relacionada con la viscosidad de la mezcla. El hormigón tiene que tener un nivel adecuado de viscosidad para mantener la composición homogénea de la mezcla. Una mezcla altamente viscosa tampoco es buena, porque reduce demasiado la velocidad de deformación, y el hormigón fluye muy despacio. Se puede mejorar la resistencia a la segregación reduciendo

el contenido de árido, el tamaño máximo del árido grueso, la relación agua/finos o utilizando aditivos moduladores de la viscosidad (VEA).

Para CREMADES (2011) la robustez se puede considerar como la capacidad de la mezcla del HAC de mantener las propiedades en estado fresco, antes y después del vertido de una amasada o de amasadas sucesivas. Debido a la composición de la mezcla y debido a algunos pequeños cambios en los contenidos de los ingredientes de la mezcla, la robustez depende de una serie de condiciones que incluyen la composición e historia de la mezcla, esto es la energía de corte, la velocidad de corte y la aplicación específica.

El HAC podría ser más sensible a los cambios que el HC a causa de su diseño de mezcla más complejo. Las variaciones de sus propiedades se atribuyen a los efectos específicos de los ingredientes en las propiedades reológicas de la mezcla y los efectos de las propiedades físicas (tamaño y densidad específica) del árido.

Para MARTÍNEZ (2008) el HAC, a diferencia del HC, necesita un diseño inicial más exhaustivo y cuidadoso de la mezcla, esto se debe a que se garantiza que se suministra, no sólo con las prestaciones de resistencia y durabilidad necesarias sino con la característica de ejecutarse por sí mismo, sin ayuda externa. Por lo tanto, el proceso de dosificación del HAC comprende mayor exactitud y cuidado que el llevado a cabo en el HC, lo que conlleva la necesidad de un cambio de mentalidad en el campo de la construcción.

Los requisitos que debe cumplir un HAC son alta fluidez, falta de segregación y bajo riesgo de bloqueo, y tales requisitos se alcanzan aportando a la mezcla de hormigón un alto volumen de pasta de cemento (entre 35% y 40%), un bajo volumen de áridos gruesos, una baja relación agua/finos y el uso de plastificantes de última generación. Todos los componentes de la mezcla influyen en las características del hormigón, y la diversidad de estos componentes dentro del mercado hace difícil la determinación de un tipo o dosificación de materiales para los HAC.

Los criterios de dosificación que se proponen normalmente para los hormigones autocompactantes se pueden clasificar en dos grupos según MARTINEZ (2008): los que se guían por referencias más o menos generales fijando las proporciones definitivas mediante ensayos de laboratorio y los que siguen métodos de dosificación específicos para aproximar las dosificaciones. El primer caso es el más utilizado.

En la tabla 2.3 se pueden ver algunos ejemplos empleados en el medio uruguayo.

Obras en Uruguay donde se utilizó HAC				
Obras	Descripción	Fecha	Ubicación	Imagen
Discount Bank también conocido como Edificio Montevideo Waterwork & Co	El edificio fue construido en 1857 para la compañía Waterworks Company. Ahora alberga la sede del Discount Bank Uruguay s.A.	En los años 2000-2001: reparación y restauración y en el 2012 se utilizó autocompactante para reparaciones	Misiones 1399. Montevideo	
Reparaciones Colector	Reparaciones en tramos del colector maestro de Montevideo en presencia de agua	2000- 2001		
Reparaciones alero Hipódromo de Maroñas	Pista de 2.065 metros por 24 metros de ancho y pista auxiliar de 2.000 metros. Tiene una capacidad para 2.426 personas sentadas y alrededor de 5.500 de pie	Se inauguró en 1889, se remodeló y puso a punto iniciando su actividad oficial de carreras el 29 de junio de 2003	José María Guerra 3540. Montevideo	
Represa de Baygorria	La represa de Baygorria es una central hidroeléctrica perteneciente a UTE, se realizaron reparaciones en el 2008 con HAC	Fue inaugurada el 8 de julio de 1960, se realizaron reparaciones en el 2008	Se ubica sobre el Río Negro, a 307 kilómetros de su desembocadura, entre los departamentos de Río Negro y Durazno	
Edificio de oficinas	Edificio destinado a oficinas con pilares en HAC	Inaugurado en el 2011	25 de Mayo y Juncal. Montevideo	
Planta potabilizadora Sauce	La ampliación de la obra consiste en colocar filtros y realizar nuevas obras en la planta potabilizadora de Laguna del Sauce.	Comienzos de obras 2015. Fin 2018	Maldonado	
Cooperativa Con Nuestro Esfuerzo	Se trata de un complejo de viviendas de ayuda mutua	Comienzos de obras 2017. Inaugurada.	Hipólito Yrigoyen 2036. Montevideo	
44 Pakwai	Edificio de vivienda planta baja y 4 niveles	Comienzos de obras 2017. Inaugurado.	Pilcomayo 7488 bis. Montevideo	
Town Park	Se trata de un complejo de viviendas de 5 edificios de 10 pisos. Ejecutados con sistema de encofrados metálicos, pantallas y pilares con hac	Comienzos de obras 2018. Inaugurado	Av. Millán 4250. Montevideo	

(a)

Casas URU - Hormigón autocompactante / Sistema Forsa
Año de construcción 2019. Lagomar, Canelones



Complejo de viviendas unifamiliares realizados con Sistema Forsa completamente con HAC. El Sistema Forsa consta de moldes metálicos donde todos los muros, tanto interiores como exteriores, son realizados con HAC, con un espesor de 10cm llenados desde arriba. Cada vivienda tiene 70 m² y se utilizan 3 camiones de hormigón. La cubierta es hormigón convencional por razones económicas.

(b)

Tabla 2.3 - (a) Ejemplos de edificios con HAC en Uruguay. (b) Ejemplo de complejo de viviendas unifamiliares con sistema Forsa con HAC en Uruguay año 2019.

2.2 Análisis de costos

2.2.1 Consideraciones generales

A priori arquitectura y economía pueden parecer mundos muy distantes, sin embargo, siguiendo a BRUNO KLESS (2016), es posible encontrar un vínculo muy interesante entre estas dos disciplinas. La arquitectura obliga a pensar en términos muy complejos los espacios, las necesidades del programa, los componentes, los tiempos de ejecución y los costos asociados; variables todas que se afectan recíprocamente y que es necesario considerar tanto individualmente como en su conjunto, combinadas entre sí. Esta necesidad de combinar distintas variables es también una herramienta básica de la economía. El volumen de inversión, la tasa de retorno, los plazos, los riesgos asociados son variables diferentes, pero, en el fondo, lo importante es cómo se combinan.

MATTOS (2006) señala que independientemente de la localización, de los recursos, del plazo del cliente y del tipo de proyecto, una obra es una actividad económica y como tal el costo es un aspecto primordial de la misma. Para el mencionado autor la consideración de los costos se manifiesta en las etapas iniciales del proyecto, aun antes del inicio de las obras, en la fase de presupuestación, cuando se realiza la estimación de los costos de la ejecución de obra. El primer paso para quien se dispone a llevar adelante un proyecto es estimar su costo, lo cual es básicamente un ejercicio de previsión. Muchos ítems influyen y contribuyen a la determinación del costo del proyecto. La técnica de presupuestación engloba la identificación, descripción, cuantificación, análisis y valorización de un gran número de ítems. Como el presupuesto es preparado antes de hacerse efectiva la construcción del proyecto, es necesario realizar diversos estudios a los efectos de que no existan vacíos en la composición del costo, así como tampoco consideraciones fuera de lugar.

De acuerdo a HALPIN (1997), citado en un artículo publicado por NOGUERA y RINCON DE PARRA (2008) los costos en el sector de la construcción están asociados a los recursos que se requieren para colocar físicamente los elementos de construcción en el proyecto. Estos costos incluyen lo referido a materiales, mano de obra, maquinarias, equipos, instalaciones y herramientas, subcontratos y cualquier otro costo que no se identifica, de manera directa, con una determinada obra o contrato.

Continuando con los conceptos desarrollados por MATTOS (2006), las principales características de todo presupuesto son:

- **La aproximación.** El presupuesto sirve para dar una idea más o menos aproximada del valor real. Cuanto más exacto y criterioso es el presupuesto menor será el margen de error. En la aproximación de un presupuesto están incorporados diversos ítems: mano de obra, materiales, equipos, y costos indirectos.
- **La especificidad.** No se puede hablar de un presupuesto generalizado de un mismo proyecto para diferentes ciudades, siempre es necesario adaptar el presupuesto al lugar donde se determine el mismo.
- **La temporalidad.** Un presupuesto realizado tiempo atrás ya no es válido en el día de hoy, esto se debe a la fluctuación de los costos, a la alteración de impuestos, a la evolución de métodos constructivos, a diferentes escenarios financieros y gerenciales.

Complementando lo expresado por el citado autor, se trae a colación lo expresado por SUÁREZ SALAZAR (2005), en cuanto el análisis de un costo es, en forma genérica, la evaluación de un proceso determinado. Este último autor indica las siguientes características en el análisis de un costo:

- Es **aproximado**: la evaluación monetaria del costo no puede ser matemáticamente exacta ya que se basa en condiciones “promedio” de consumos, insumos y desperdicios.
- Es **específico**: cada proceso constructivo se integra en base a sus condiciones periféricas de tiempo, lugar y secuencia de eventos, por lo que el costo no puede ser genérico.
- Es **dinámico**: la mejora constante de materiales, equipos, procesos constructivos, técnicas de planeación, organización, dirección, control, incremento de costos de adquisiciones, perfeccionamiento de sistemas impositivos, de prestaciones sociales, etc., hacen necesario actualizar constantemente los análisis de costos.

Es posible identificar tres grandes etapas de trabajo en la elaboración de un presupuesto, según MATTOS (2006):

1. **Estudio del proyecto.** Se deben interpretar y estudiar sus condiciones técnicas y contractuales.

2. Composición de costos. Esta segunda etapa es el proceso de determinación de los distintos costos que inciden para la ejecución de la actividad, individualizándolos por insumo o de acuerdo a otros requisitos preestablecidos. Implica individualizar tareas, realizar metrajes, identificar costos directos e indirectos y las leyes sociales asociadas.

Los costos directos son aquellos directamente asociados a la tarea de campo. Representan el valor presupuestado de los servicios metrados. La unidad básica es la composición de costos, que pueden ser unitarios o globales.

Los costos indirectos son aquellos que no están directamente asociados a la tarea de campo en sí, pero que son requeridos para que las tareas puedan ser realizadas. Aquí son cuantificados los gastos del personal técnico, personal de soporte, los gastos generales de la obra como oficina técnica, etc. En otras palabras, pueden identificarse por sustracción, como aquel costo que no aparece como mano de obra, material o equipamiento en las composiciones de costos unitarios del presupuesto.

3. Etapa de cierre del presupuesto. Es aquella donde se incorpora el beneficio de la empresa. De esta forma se obtiene una planilla final de precios.

Según AITCIN (2000) la selección final de un material específico se basa generalmente en factores económicos.

Si bien recientemente han surgido herramientas digitales alternativas para la estimación de costos (ej.: modelo BIM, Project, etc.), a los efectos de esta tesis se toma la decisión de aplicar herramientas y metodologías conocidas y utilizadas en plaza, como son planillas Excel, las cuales permiten acceder a un costo estimado, rápido, claro y de forma ágil, en concordancia con lo expresado por CHANDÍAS (2006). El citado autor desarrolló un sistema de planillas donde establece que por medio del cómputo métrico se miden todos los subsistemas constructivos que integran el sistema constructivo de una obra de ingeniería o arquitectura, con el objeto de:

- a) establecer el costo de la misma o de cada uno de sus subsistemas;
- b) determinar la cantidad de materiales necesarios para ejecutarla;
- c) elegir la opción más conveniente.

Este autor sostiene que no obstante la simplicidad de este método y sus fundamentos, el cómputo métrico supone el conocimiento de los procedimientos

constructivos de la obra, y su éxito depende, en gran medida, de una experiencia sólida y una actitud vigilante en el trabajo.

La planilla es una herramienta que permite la carga de información de manera ágil y arroja como resultado los datos necesarios para la cuantificación matemática e inductiva, combinando las ventajas de un software con la experiencia del operador obtenida en obras con similares características realizadas.

Según LUNA (2010) una vez que se lleva a cabo el primer análisis de precios unitarios y la presupuestación con el uso de planillas Excel, es posible apreciar la facilidad que brinda para su entendimiento y manejo, además de la versatilidad que ofrece para hacer ajustes y cambios en los datos e información que se tienen y adaptarlos a las condiciones reales de la obra proyectada. También permite obtener valores exactos del análisis del precio unitario, de la exposición de insumos y de otros presupuestos hechos. No obstante, su confiabilidad depende de la confiabilidad de la información ingresada.

Es preciso aclarar que si bien CAVIGLIA (2005) desarrolló con anterioridad un sistema de planillas para realizar los presupuestos, este sistema se aparta del objeto de esta tesis, el cual no pretende analizar los costos fijos, sino estimaciones rápidas con la cual se puedan tomar decisiones arquitectónicas. Compartimos lo expresado por MASCARO (2004) en cuanto a que los técnicos proyectistas no dominan el factor económico a la hora de tomar decisiones sobre el proyecto, por lo que analizar el costo de cada parte de los edificios por separado (como ser estructura, tipologías en altura o en horizontal) a través de planillas simples, es una metodología rápida y sencilla que le permite al arquitecto considerar el factor económico a la hora de tomar decisiones, y dejar de lado el preconcepto de que no le es posible controlar económicamente cada una de las decisiones del proyecto. Tal preconcepto obedece al desconocimiento sobre su incidencia en el costo total del proyecto, así como de las variaciones importantes en el costo que pueden generar sus decisiones.

En el libro del citado autor, *El costo de las decisiones arquitectónicas*, se plantea la utilización de planillas sencillas que permiten analizar cada una de las alternativas del proyecto a medida que se vayan presentando las diferentes tomas de partido, identificando aquella más económica o rentable. A estos efectos, divide el edificio en partes o elementos, estudia los costos de cada parte y los compara, sopesando los probables costos de cada alternativa.

En términos similares, BALLARD y REISER (2004) postulan que el diseño del costo objetivo es una práctica del desarrollo de productos que lo convierte en un criterio de diseño. Esto implica emplear diseño por factores centrado el objetivo del diseño en un factor X que la empresa considera relevante, generando con ello reducción de costos y aumento de la flexibilidad en los procesos de producción.

En la práctica tradicional primero se elabora un diseño, luego se estima su costo y después se trata de alterar el diseño con el fin de reducir los costos (para llegar a los valores deseados). Los citados autores recomiendan para obtener mejoras en la industria de la construcción seguir los siguientes criterios:

- Talleres de colaboración para producir esquemas de diseño.
- Ser más formales y rigurosos para la creación del costo objetivo.
- Tener un costo objetivo para cada nivel, partiendo de los sistemas, luego de sus subsistemas y finalmente de sus componentes.
- Aprender a utilizar la ingeniería de valor para facilitar el diseño integrado de productos, dejando de lado la fabricación costosa que no necesariamente crea el valor apropiado.
- Determinar el uso apropiado de los costos de ciclos de vida.
- Estudiar las ofertas de lo que se necesita subcontratar.
- Involucrar a los proveedores e instaladores en la búsqueda de nuevas ideas y mejores formas de hacer las cosas.

La contribución de FROESE (2015) es que las planillas de cálculo son los enfoques tradicionales y principales para la estimación de los costos, para lo que se requiere una comprensión de las relaciones entre los factores de diseño del edificio y los objetivos del diseño del mismo. Esto quedará plasmado en hojas de cálculo y en un sistema de gestión de base de datos.

Si bien considera que para estimar costos de estructuras es extremadamente difícil debido a la interacción ampliamente acoplada entre varios factores, para salvar estas dificultades el autor realiza un enfoque de aplicación de redes neuronales a la construcción.

2.2.2 Modelos de costos

WU Y BUYYA (2015) subrayan que un modelo de costos puede ayudar a quien toma las decisiones a elegir la opción correcta, esto significa que este se construye a menudo antes que se tome la decisión. Dicho modelo tiene que ser lo más

objetivo posible; significa que se construye desde la base hasta la parte superior de acuerdo con la evidencia objetiva o factores. Normalmente, los supuestos de modelos de costos se basan en datos históricos, algunos parámetros de la industria, consultoría, consejos y sugerencias de proveedores, en esencia la decisión se toma después de haber sacado las conclusiones de él. El proceso de construcción de un modelo de costos se basa en el análisis estándar de negocios y debe ser transparente.

Si bien WU Y BUYYA tratan la temática para los gerenciamientos de negocios para la computación y comunicación en la Cloud Data, se tratará en esta tesis de extrapolar los conocimientos tecnológicos y hacer uso de los mismos para el modelo de costos para el hormigón.

Estos autores separan los modelos de costos en, objetivo y subjetivo, ex-ante y ex-post. El exante (palabra latina que significa de antemano o antes del evento) sirve para determinar los beneficios o las pérdidas antes de tomar una decisión. El objetivo es imparcial y libre de prejuicios, en el exante el análisis se centra en el momento de la decisión. El modelo subjetivo trata de no olvidar nunca la cuarta dimensión, que es el tiempo. Se establece en la consecuencia, sirve para comprobar la intuición; después de que ya se ha tomado una decisión, en muchas circunstancias, esto no se puede aplicar. En contraste con el modelo exante, existe otra palabra latina que representa lo contrario, ex-post (que significa después del evento) es una evaluación de análisis, de secuelas de la decisión o posterior a la decisión y sirve para verificar una decisión.

El objetivo principal de un modelo de costos es ayudar a un tomador de decisiones a resolver un problema, por lo tanto, los criterios para la métrica para ellos son:

- Utilidad: el objetivo del costo.
- Adaptabilidad y limitaciones: qué tan bueno es el modelo, el valor que un modelo puede calcular o predecir tiene un cierto grado de error. Se deberá acotar este rango.
- Claridad.
- Costo.
- Variación o precisión.
- Cantidad de tiempo para establecerlo.

Todos estos indicadores anteriores pueden ser cuantificados utilizando términos de dólares.

Un buen modelo de costos debe ser capaz de:

- Hacer frente a un entorno en constante cambio.
- Proporcionar una idea para un tomador de decisiones.
- Aclarar la interacción de múltiples variables.
- Destacar los factores que influyen en dominantes en el nivel macro.
- Generar alternativas u opciones manejables.
- Explicar las razones detrás de cada solución.
- Recomendar una solución inteligente.
- Ser fáciles de entender.
- Que sea un buen instrumento de comunicación para conversar entre las partes interesadas.

WU Y BUYYA (2015) destacan que las características claves del modelo de costos es que pueden definir una simple relación entre entradas y salidas, sirven para organizar conceptos, pensamientos e ideas. El propósito de organizar estos elementos se relaciona con el costo subjetivo, donde un tomador de decisiones necesita un modelo de costos para organizar sus pensamientos e ideas. Los tomadores de decisiones saben cuáles son las ideas, pero no cómo explicarlas, ya que es imposible tomar la decisión correcta para el futuro en un presente basado solo en la intuición personal. Por supuesto, no todas las decisiones necesitan modelos de costos, solo las decisiones que son vitales, grandes y que tienen una inversión a largo plazo, como una inversión de varios millones de dólares. En resumen, uno de los propósitos de los modelos de costos es aprovechar el razonamiento lógico para clarificar el pensamiento. Este modelo proporcionará un costo estimado que será con el cual se tomen las decisiones de realizar o no un proyecto.

Un modelo de costos eficiente no solo es muy útil para la entrega del proyecto, sino que también ayuda a que el proyecto pueda ser entregado a tiempo y dentro del presupuesto.

Podemos tener modelos de costos que analizan las estructuras de precios desde diferentes perspectivas con el fin de organizar y visualizar los distintos componentes de los costos en constante cambio.

Se pueden utilizar diferentes modelos de costos, la selección del tipo de modelo y el marco se basa en la experiencia de un individuo, el conocimiento, la

inteligencia y la sabiduría. Tal vez se basa en el instinto de una persona, desde esta perspectiva es subjetiva.

Cualquier modelo de costos está sujeto a revisión, debido a que el mundo en que vivimos es siempre cambiante y dinámico.

Todo modelo genérico debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Estar bien documentado y ser accesible para su posterior análisis,
- Estar bien estructurado, esto implica que un método que consiste en meras directrices es insuficiente.
- El modelo debe ser utilizado en la práctica.

Según WU Y BUYYA (2015) el costo significa el precio que se debe pagar para la adquisición, producción o mantenimiento de algo, por lo general medido en un tipo de unidad de recurso, como el dinero, el tiempo, la energía o el gasto. Desde una perspectiva de recursos, una definición funcional del costo significa un tipo de consumo de recurso. Hay dos tipos de recursos, uno, es el recurso tangible y otro el recurso intangible. Un recurso intangible, la gente no puede verlo, tocarlo, sentirlo u olerlo, es invisible. Pero ciertamente existe en nuestro universo y por supuesto también debería existir al momento de realizar un costo, y sin embargo estos recursos no son tenidos en cuenta en el proceso de costos ya que son a menudo subjetivos por lo tanto muy difíciles de medir o cuantificar.

Basándose en la experiencia, estos autores establecen que la actividad más difícil en el modelo de costos es cuantificar los recursos intangibles. Sin embargo, el costo intangible puede compensar el 70% u 80% del costo del proyecto en el campo de la tecnología de la información. Este dato puede ser tomado en cuenta en la industria de la construcción con un porcentaje X dependiendo de los factores intangibles que existen en una tarea determinada. Es difícil encontrar un punto de referencia claro para calcular los recursos intangibles, ya que muchos resultados o conclusiones son muy subjetivos.

Los costos tangibles son partidas de costos físicos; podrían ser partidas de costos, ya sean visibles o invisibles. Las partidas de costos invisibles son las cosas que no podemos ver como la capacitación, actualización, mantenimiento, reparación y los costos de garantía del equipo. En esencia, el costo tangible está estrechamente relacionado con los beneficios palpables que pueden contribuir a una empresa y aumentar el valor de negocio de una empresa. Estos beneficios se pueden entregar fácilmente en un formato tangible, como el flujo de caja y el

retorno de la inversión rápido. Muy a menudo, los inversores o partes interesadas quieren ver algunas justificaciones o resultados dentro de un período de tiempo relativamente corto, si se trata de un proyecto de inversión a largo plazo, los inversores quieren ver algunos hitos claros que se pueden medir; deben ser cuantificables.

En contraste a los costos tangibles, hay muchos intangibles, donde la compra se produce sin una sustancia física, tales como los gastos de publicidad, de marca, los gastos para mejorar el índice de satisfacción del cliente, los costos de investigación de mercado, estrategia y asesoría jurídica (con exclusión de los costos asociados a la ejecución de proyectos), y los gastos de formación para mejorar la moral de los empleados y la capacidad de innovación. Una vez más, todos estos costos están en conjunción con muchos beneficios intangibles que son bastante difíciles de medir, como los nombres de marca, la satisfacción del cliente, y moral de los empleados. A menudo, los beneficios de estas partidas de costos no se pueden medir directamente.

Para BALLARD Y REISER (2004) el diseño Target Cost o Diseño de forma objetiva de los costos mejora la rentabilidad del producto. El diseño del costo objetivo es una práctica de desarrollo de productos que convierte costos en un criterio de diseño. Esto implica emplear diseño por factores. Tienen el fin de centrar el objetivo del diseño en algún factor X que la empresa considere relevante lo que genera reducción de costos y aumento de flexibilidad en los procesos de producción. Los principales desafíos que enfrenta el DFX (diseño por factores) son:

- Cómo incorporar a los especialistas pertinentes en el proceso de diseño.
- Conseguir decisiones de equilibrio entre las partes.
- Cómo manejar las decisiones de diseño para lograr objetivos.

En la práctica tradicional primero se produce un diseño, se estima su costo, y luego se trata de alterar el diseño con el fin de reducir costos (para llegar al valor deseado). PAZARCEVIREN Y CELAYIR (2013) desarrollan el método ABC (Activity Based Costing), cuyo objetivo es reducir las decisiones equivocadas proporcionando información precisa de los costos. El sistema de costos basado en el modelo ABC se basa en que los productos y servicios consumen actividades, y estas a su vez son las generadoras de los costos. Es un modelo que permite la asignación y distribución de los diferentes costos indirectos, de acuerdo a las actividades realizadas, pues son estas las que realmente generan costos. Este

sistema nace de la necesidad de dar solución a la problemática que presentan normalmente los costos estándar, cuando no reflejan fielmente la cadena de valor añadido en la elaboración de un producto o servicio determinado, y por lo tanto, no es posible una adecuada determinación del precio.

El sistema Target Cost asociado al método ABC complementa los valores que se determinan. De ello se deriva en primer lugar que la gestión de los costos se deberá centrar principalmente en las actividades que los originan, llevando a que la gestión óptima de las mismas genera su reducción, siendo el costo igual al precio del mercado menos la ganancia planeada.

El principio del método ABC propone dos ideas fundamentales de las cuales parte la metodología en cuestión:

- Los productos no consumen costos sino actividades.
- Las actividades son las que realmente consumen recursos. Los costos son la expresión cualificada de los recursos consumidos por las actividades.

El método ABC pretende construir una infraestructura de información que permita establecer una relación equilibrada entre los costos indirectos y las unidades de costo sobre las que se asignarán los costos. También se utiliza el método para asegurar que los gerentes tomen las decisiones correctas en cuanto a la diversificación del producto y las estrategias de competencia, vinculando directamente los costos generales de producción a unidades de costos como procesos, servicios, productos o clientes (COOPER, 1988: 46).

Un modelo que permita estimar los costos de los hormigones, y particularmente el costo del HAR y HAC, debe partir de la base de que sus variables están en constante cambio dependiendo de diversos factores; cambian en función del transcurso del tiempo, haciendo que los costos aumenten o disminuyan. Para que el modelo funcione este deberá tener en cuenta la fecha en la cual se realizan los costos, y permitir efectuar ajustes del mismo a posteriori (actualizarlo).

Como agudamente observa LAPORTA (2003), en ocasiones nos encontramos con que el fin principal y último de muchas organizaciones y empresas en relación a la información del costo de un producto, consiste solamente en obtener el dato puntual del costo, como fin en sí mismo, dejando de lado su carácter de elemento de entrada para toma de decisiones. Agravando aún más la situación, esta valiosa información es archivada y con el paso del tiempo, se torna desactualizada, siendo esporádicamente consultada para aspectos puntuales. En consecuencia, resulta

increíblemente subutilizada en la medida que no se aprovechan todas las variables y amplias gamas de posibilidades que “el costo” potencializa. Partiendo de la base de la determinación y disposición de la información de costos, es que se disparan estrategias e importantísimas aplicaciones que brinda el conocimiento de “el costo” debidamente conformado, mantenido y gestionado.

2.3 Estado del arte de los HAD y su viabilidad económica: análisis de costos en la utilización de HAD

Como se analizó en la sección anterior de costos, en esta tesis se utiliza para el estudio de los costos y la viabilidad económica herramientas simples como son las planillas Excel, teniendo en cuenta elementos que proporcionen veracidad a los datos. Dichos elementos consisten en ciertos parámetros valorados para la estimación de los costos en las obras de arquitectura, tales como:

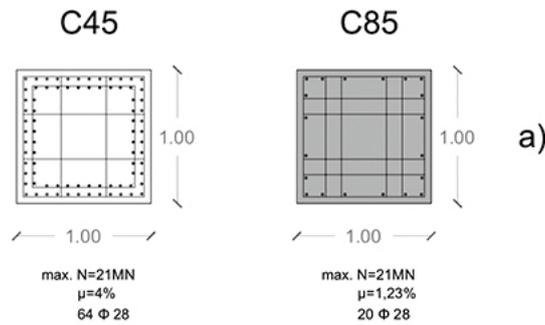
- Juicio experto.
- Estimación análoga.
- Estimación paramétrica.
- Análisis de reserva.
- Costos de la calidad (COQ, sigla del inglés: Cost of Quality).
- Análisis de ofertas de proveedores.
- Técnicas grupales de tomas de decisiones.

Para esta tesis es de suma importancia el estudio realizado por BREITENBUCHER (1998) en el desarrollo y aplicación del HAR, quien determina que el HAR se debe utilizar en estructuras sometidas a grandes esfuerzos a la compresión, como en los pilares. Dicho estudio aportó las bases para el análisis del caso 3 de esta investigación en donde se analiza la reducción de pilares con el uso de HAR (capítulo 4.3.3).

Este autor realiza un análisis de pilares de 1 x 1 m con $F_{ck} = 45$ MPa y el mismo pilar con $F_{ck} = 85$ MPa donde logra visualizar que si se mantienen las mismas proporciones, pero varía la resistencia se puede disminuir la cantidad de hierro que se utiliza, por ejemplo el pilar de $F_{ck} = 45$ MPa utiliza 64 barras de $\varnothing 28$, mientras que el mismo pilar con $F_{ck} = 85$ MPa utiliza 20 $\varnothing 28$. También comprobó que se puede hacer una reducción del pilar en un 36% donde el pilar de 1 x 1 se mantiene con 64 $\varnothing 28$ y en nuevo pilar de 0,64 x 1 m se necesitan 40 $\varnothing 28$ para soportar el mismo esfuerzo. En comparación con las estructuras de HC el HAD

puede lograr reducir las secciones de pilares. Como lo representa la figura 2.2, Ahorro de consumo de hierro y dimensiones.

Disminución en la utilización de hierros debido al aumento de la resistencia del hormigón de alta resistencia C85



Disminución en las dimensiones del pilar debido al uso del hormigón de alta resistencia C85

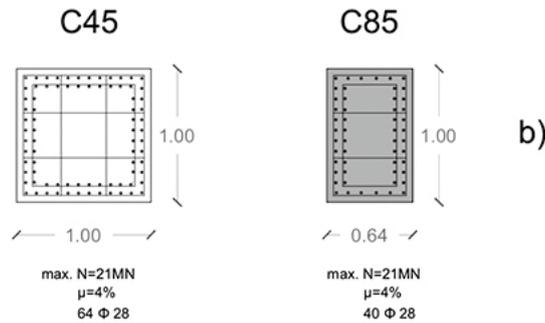


Figura 2.2 - Ventajas del HAD C85 en comparación con el C45. a) Ahorro de consumo de hierro. b) Ahorro en dimensiones. BREITENBUCHER (1998)

También DAL MOLIN et al (2007) en su investigación que tiene como objetivo presentar algunos aspectos relativos a la utilización de HAR, realizan consideraciones sobre la viabilidad económica de la ejecución de una estructura con hormigón con $F_{ck} = 60$ MPa comparándola con una de $F_{ck} = 21$ MPa, mostrando la posibilidad de su utilización con costos que pueden llegar a ser 12% menores a los tradicionalmente utilizados. Sin considerar las ganancias a las mayores áreas rentables, debido a la reducción de secciones de los pilares y al aumento de la vida útil de la edificación.

Para los casos de estudio 1 y 2 de esta tesis se consideró dicha investigación como sustento teórico para valorar la reducción en el empleo del HAD donde no era necesario, y de esta forma reducir costos (ver capítulos 4.3.1 y 4.3.2).

En el estudio de la viabilidad económica realizado por DAL MOLIN et al (2007) se realiza la comparación entre la ejecución de un edificio de 15 niveles con una superficie de 320 m² por nivel, cuyo cálculo se refirió al nivel 3 del edificio, con HC y con HAR de Fck = 21 MPa y Fck = 60 MPa y se representa en la tabla 2.4 los resultados obtenidos de consumo de hormigón, armadura y encofrado.

	Hormigón (m ³)			Armadura (kg)			Encofrado (m ²)		
	Fck 21	Fck 60	%	Fck 21	Fck 60	%	Fck 21	Fck 60	%
Pilares	13,2	6,8	-49	2.981	1.992	-60	137	93	-32
Vigas	14,9	12,1	-19	1.623	1.623	-	180	149	-17
Losas	27,0	26,1	-3	994	994	-	281	281	-
Total	55,1	45,0	-18	5.598	3.809	-32	598	523	-12

Tabla 2.4 - Consumo de materiales para la ejecución de un nivel de hormigón con Fck 21 a 60 MPa. Elaboración propia, con base en DAL MOLIN et al (2007).

Hay que resaltar que en el trabajo de DAL MOLIN et al (2007) los cálculos fueron realizados de forma convencional, no considerando el ajuste del módulo de elasticidad, coeficiente de fluencia, etc., que se ven alterados a medida que aumenta la resistencia, lo que sería aún más favorable para el consumo de HAR. La ubicación de los pilares no fue alterada, resultando que muchos pilares tienen la sección mínima de armadura y hormigón al pasar de Fck = 21 MPa a Fck = 60 MPa. Asimismo se demuestra que existe una economía significativa de hormigón, armadura y encofrado, principalmente en las piezas sometidas a esfuerzo de compresión, como son los pilares.

Apartir de la tabla 2.4 y del precio de los materiales y mano de obra (cotización setiembre 1991, Porto Alegre, RS, Brasil) se realiza el costo de la estructura de hormigón armado para resistencias Fck = 21 y Fck = 60 MPa y se representa en la tabla 2.5.

		Hormigón		Armadura		Encofrado		Total	
		Fck 21	Fck 60	Fck 21	Fck 60	Fck 21	Fck 60	Fck 21	Fck 60
Pilares	Mat.	468	464	1591	636	3871	2628	5931	3728
	M.O.	507	261	1163	465	774	525	2443	1251
Vigas	Mat.	528	826	867	866	5086	4210	6481	5903
	M.O.	572	464	633	633	1016	841	2221	1939
Losas	Mat.	958	1782	531	531	7940	7940	9428	10252
	M.O.	1036	1002	388	388	1587	1587	3011	2976
Total	Mat.	1954	3073	2989	2034	16896	14777	21839	19884
	M.O.	2115	1727	2184	1486	3377	2395	7675	6166
Total general		4069	4800	5173	3520	20273	17730	29515	26050

Tabla 2.5 - Costo comparativo de estructura de hormigón con fck 21 a 60 MPa (valores en dólares americanos). Elaboración propia, con base en DAL MOLIN et al (2007)

Aunque el costo del hormigón para $F_{ck} = 60$ MPa es de mayor valor que el $F_{ck} = 21$ MPa, en este caso para la cotización de estudio del año 1991 en Brasil, el costo del hormigón en masa del $F_{ck} = 60$ MPa es un 47% mayor que el hormigón con $F_{ck} = 21$ MPa, de igual modo, la reducción de la sección del pilar es de tal magnitud que hace viable el empleo de hormigón de mayor resistencia, así lo expresan las conclusiones de DAL MOLIN et al (2007):

La reducción del consumo de hormigón es muy significativa para las piezas sometidas a esfuerzos de compresión (pilares), alcanzando valores del orden del 50%, lo que hace viables pilares de menores dimensiones, con mejor aprovechamiento de las áreas rentables en los primeros niveles. Además, la reducción simultánea del consumo de armaduras en un 60% permite mantener, siempre que sea posible, las mismas secciones de los pilares en todos los niveles, evitando desperdicios de materiales y discontinuidad de la mano de obra para los encofrados.

En el caso de utilizar el HAR con $F_{ck} = 60$ MPa para la ejecución de toda la estructura de hormigón se percibe una economía total del 12% en relación con la misma estructura de hormigón con $F_{ck} = 21$ MPa.

En el caso de utilizar solamente hormigón $F_{ck} = 60$ MPa en pilares y en las demás piezas estructurales hormigón $F_{ck} = 21$ MPa, se obtiene en la elección de los pilares una economía de 40%, correspondiendo a una reducción final de costos de 11,5% aproximadamente para toda la estructura.

La reducción de consumo de hormigón con el uso de HAR que describe DAL MOLIN et al (2007) fue verificado en esta tesis con el análisis del caso de estudio 3 (ver capítulo 4.3.3).

REINERT et al (2015) en su publicación comparó el HC con HAD para un edificio de 20 niveles donde se tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del HAD en estructuras de edificios altos, por lo tanto fue dimensionada una estructura de hormigón de un edificio de 20 niveles con núcleo rígido. Primero se realizó el cálculo de la estructura con el HC con $F_{ck} = 25$ MPa, posteriormente se dimensionó la misma estructura con HAD variando la resistencia de los pilares según su altura, desde $F_{ck} = 50$ MPa en los primeros 4 niveles hasta los últimos niveles con $F_{ck} = 25$ MPa. Con esto se busca minimizar los costos con los encofrados, el acero y el volumen de hormigón y consecuentemente la mano de obra, debido a la disminución de las secciones de los pilares a lo largo del edificio. El modelo evaluado con HAD es un 6,35% más económico que con HC. Lo realizado en este

estudio fue comparar un modelo con HC variando las secciones de los pilares mientras que en el segundo modelo con HAD se mantuvo una sección constante de pilares y se variaron las resistencias. Esto se representa en las tablas 2.6 y 2.7, donde se calculan el consumo de los materiales y la mano de obra para la realización de las estructuras para el modelo 1 (HC) y modelo 2 (HAR).

	Hormigón (m ³)			Armadura (kg)			Encofrado (m ²)		
	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)
Pilares	425,8	392,9	8,4	43.233	31.543	37,1	3.909	3.578	9,2
Vigas	374,5	374,0	0,1	38.850	34.010	14,2	4.432	4.440	-0,2
Losas	723,1	725,9	-0,4	42.638	41.516	2,7	5.737	6.055	-5,3
Total	1.523	1.493	2,0	124.721	107.069	16,5	1.4078	14.073	0,0

Tabla 2.6 - Consumo de materiales para la ejecución de la estructura de hormigón para los modelos 1 y 2. Elaboración propia con base en REINERT et al (2015).

A partir de la tabla 2.6 se realiza la tabla 2.7 donde se presentan los costos de los materiales y mano de obra necesarios para ejecutar las estructuras de los modelos. El modelo 1 tuvo un costo 2,20% mayor en el hormigón, el costo del encofrado fue el mismo para los dos modelos y el costo del acero fue un 13,2% menor en el modelo 2 comparado al modelo 1.

	Hormigón (m ³)			Armadura (kg)			Encofrado (m ²)		
	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)	Modelo 1	Modelo 2	Δ (%)
Pilares	122.026	131.188	-6,98	286.988	212.103	26,09	97.652	89.388	8,46
Vigas	107.324	107.181	0,13	249.418	218.343	12,46	110.709	110.899	-0,17
Losas	207.226	208.028	-0,39	325.756	317.182	2,63	143.310	151.254	-5,54
Total	436.576	446.398	-2,2	862.162	747.627	13,28	351.671	351.541	0,04

Tabla 2.7 - Costo en reales para la ejecución de la estructura de hormigón para los modelos 1 y 2. Elaboración propia con base en REINERT et al (2015).

El costo de la estructura total, materiales y mano de obra, de la estructura propuesta en el modelo 1 fue de BRL 1.650.409,00 y el costo total de la estructura propuesta en el modelo 2 fue de BRL 1.545.566,00. El ahorro obtenido con la adopción del modelo 2 que utiliza HAR es de 6,35%.

Para los casos de estudio 1 y 2 de esta tesis (ver capítulos 4.3.1 y 4.3.2) se toma como ejemplo base lo realizado en el trabajo de REINERT et al (2015), con la diferencia que en el caso 1 y 2 se mantienen las mismas secciones de pilares y losas, modificando la resistencia del hormigón por niveles.

El estudio de GUIMARÃES (2000) logra reducir el costo de las estructuras entre un 12% y un 20% utilizando un buen método de distribución de Fck para las diferentes partes que componen una estructura de hormigón. Cada elemento estructural —dependiendo de sus solicitaciones— requiere una resistencia óptima para la función que está desempeñando. Esto se puede determinar a través de un análisis criterioso en el momento del diseño estructural.

En esta tesis se realiza un estudio similar a la investigación de este autor, estableciendo cambios del Fck utilizados en diferentes elementos estructurales en dos obras para lograr reducciones de costos, esto se puede ver en los casos de estudio en los capítulos 4.1.1 y 4.1.2

Según GUIMARÃES (2000) el HAD es una alternativa que no es solamente viable técnicamente, sino también económicamente; además se puede decir que es un gran negocio. Para utilizar HAD se debe contar con un proyecto arquitectónico que también sea de alto desempeño proyectual. En su estudio se analizan las variaciones dimensionales y de los costos de las estructuras de hormigón (pilares - vigas y losas) entre 20 y 80 MPa y se demuestra que es viable su ejecución. Se pone en práctica este análisis teórico como lo indican las tablas 2.8 y 2.9.

Edificio	Costos (BRL/m ²)			
	Hormigón	Armaduras	Encofrado	Total
Edificio 1	25,15	14,33	14,75	54,23
Edificio 2	25,24	12,31	13,89	51,44
% Diferencia	-0,32%	16,38%	6,21%	5,44%

Tabla 2.8 - Análisis por área de construcción. Datos teóricos edificios 1 y 2 (GUIMARÃES, 2000).

Edificio	Costos (BRL/m ²)			
	Hormigón	Armaduras	Encofrado	Total
Edificio 1	25,15	14,33	14,75	54,23
Edificio 3	21,66	12,35	14,14	48,15
% diferencia	16,15%	16,00%	4,34%	12,64%

Tabla 2.9 - Análisis por área de construcción. Datos teóricos edificios 1 y 3 (GUIMARÃES, 2000).

Se comprueba a través de la construcción de edificios residenciales con las mismas características y ejecutados con la misma administración, obteniendo

como resultado real lo indicado en las tablas 2.10 y 2.11. El autor presenta una nueva propuesta de ejecución de las estructuras de un edificio y busca alcanzar una economía óptima.

	Costos (BRL/m ²)			
Edificio	Hormigón	Armaduras	Encofrado	Total
Edificio 1	25,2	16,01	14,4	55,61
Edificio 2	25,35	13,3	14	52,65
% diferencia	-0,59%	20,30%	2,87%	5,61%

T

Tabla 2.10 - Análisis por área de construcción. Datos reales edificios 1 y 2 (GUIMARÃES, 2000).

	Costos (BRL/m ²)			
Edificio	Hormigón	Armaduras	Encofrado	Total
Edificio 1	25, 2	16,01	14,4	55,61
Edificio 3	20,45	12,61	12,17	45,23
% diferencia	23,21%	26,94%	18,37%	22,95%

Corrección por diferentes fundaciones con edificio 3 (BRL/m ²)	1,10
Corrección por diferentes fundaciones con edificio 3 (%)	2,93%
Reducción del costo real ajustado	20,02%

Tabla 2.11 - Análisis por área de construcción. Datos reales edificios 1 y 3 (GUIMARÃES, 2000)

3. Metodología

En este capítulo se desarrollará la metodología de investigación utilizada en esta tesis. Se comenzará con la estrategia de la investigación, posteriormente se describirá el proceso detallando sus etapas en relación con los métodos y técnicas utilizadas para la recolección y análisis de datos.

3.1 Consideraciones generales

Según MARTÍNEZ (2006) las investigaciones científicas pueden ser realizadas a partir de metodologías cuantitativas o cualitativas.

La primera consiste en el contraste de teoría(s) ya existente(s) a partir de una serie de hipótesis surgidas de la misma, siendo necesario obtener una muestra, ya sea en forma aleatoria o discriminada, pero representativa del fenómeno objeto de estudio; por lo tanto, para realizar estudios cuantitativos es indispensable contar con una teoría ya construida. Mientras que la segunda, o sea la metodología cualitativa consiste en la construcción o generación de una teoría a partir de una serie de proposiciones extraídas de un cuerpo teórico que servirá de punto de partida al investigador, para lo cual es necesario extraer una muestra teórica conformada por uno o más casos.

Según BOGDAN Y BIKLEN (1982) toda investigación cualitativa presenta las siguientes características:

- Los datos que se utilizan son comprendidos por el investigador ya que está presente cuando se desarrollan los mismos. O sea, es participante directo de los mismos.
- Los datos recolectados son predominantemente descriptivos en forma de palabras o de figuras.
- Existe mayor preocupación por el proceso que por el producto.
- El análisis de datos tiende a seguir un proceso inductivo ya que las abstracciones son construidas como partículas que deben ser agrupadas.

KERLINGER Y LEE (2002) apud HERNÁNDEZ; FERNÁNDEZ; BAPTISTA (2006) sostienen que a priori ninguno de los distintos tipos de investigación —y sus consecuentes diseños— es mejor que el otro. Todos los modelos a seguir para una tesis de investigación pueden ser relevantes y necesarios, ya que tienen un valor propio. Cada uno posee sus características, y la decisión sobre qué clase de investigación y diseño específico que se ha de seleccionar o desarrollar depende del planteamiento del problema, el alcance del estudio y las hipótesis formuladas.

3.2 Estrategia de la investigación

La estrategia de la investigación para la realización de esta tesis refiere al “estudio de casos”.

BOGDAN Y BIKLEN (1982) afirman que el “estudio de casos” es una investigación empírica de un fenómeno contemporáneo dentro del contexto de la vida real. El investigador tiene poco control sobre los eventos y especialmente se busca responder las preguntas relacionadas a cómo y por qué.

EISENHARDT (1989) apud MARTINEZ (2006) concibe el “estudio de caso” contemporáneo como “una estrategia de investigación dirigida a comprender las dinámicas presentes en contextos singulares”, combinando diferentes métodos para la recogida de evidencia cualitativa y o cuantitativa con el fin de describir, verificar o generar teoría.

El “estudio de caso” se define según YIN (1994) como una investigación empírica de un fenómeno contemporáneo en un contexto de vida real, en el cual el investigador tiene poco control sobre los eventos y donde no hay un claro límite entre el fenómeno y el contexto en que está siendo desarrollado. Debe ser utilizado cuando se tienen preguntas de investigación del tipo cómo o por qué.

CHETTY (1996) indica que el método de “estudio de caso” es una metodología rigurosa que:

- Es adecuada para investigar fenómenos en los que se busca dar respuesta a cómo y por qué ocurren.
- Permite estudiar un tema determinado.
- Es ideal para el estudio de temas de investigación en los que las teorías existentes son inadecuadas.

- Permite estudiar fenómenos desde múltiples perspectivas y no desde la influencia de una sola variable.
- Permite explorar en forma más profunda y obtener un conocimiento más amplio sobre cada fenómeno, lo cual permite la aparición de nuevas señales sobre los temas que emergen.
- Juega un papel importante en la investigación, por lo que no debería ser utilizado meramente como la exploración inicial de un fenómeno determinado.

GIL (2002) sostiene que el “estudio de caso” es caracterizado por el estudio profundo y exhaustivo de uno o pocos objetos de manera que permita un conocimiento amplio y detallado del mismo.

El mismo autor determina que el estudio de caso suele ser utilizado en estudios pilotos para aclarar el campo de investigación en sus múltiples aspectos. Sus resultados de modo general son presentados en forma abierta, o sea en condición de hipótesis y no de conclusiones.

Según MARTINEZ (2006) el método de “estudio de caso” es una herramienta valiosa de investigación, y su mayor fortaleza radica en que los datos pueden ser obtenidos desde una variedad de fuentes, tanto cuantitativas como cualitativas, esto es, documentos, registros de archivos, entrevistas directas, observación directa, observación de los participantes e instalación u objetos físicos (CHETTY, 1996). Ofrece al investigador de cualquier área del conocimiento, características claves como el valor, el beneficio y la utilidad práctica como estrategia metodológica de la investigación científica (MARTINEZ, 2006).

STAKE (2000) *apud* GIL (2002) identifica 3 modalidades de estudio de caso, intrínseco, instrumental y colectivo. Para esta tesis se tomará el de tipo instrumental que de acuerdo al autor es aquel desarrollado con el propósito de auxiliar en el conocimiento o en la redefinición de un problema.

Para GIL (2002) el estudio de casos puede estar constituido por un único caso o por múltiples. De modo general la utilización de múltiples casos proporciona evidencias en diferentes contextos otorgando una investigación de mejor calidad, esto conlleva a una metodología más depurada y mayor tiempo para la recolección y análisis de datos ya que es necesario reapplicar las mismas cuestiones en todos los casos.

El proceso de recolección de datos en el estudio de casos es más complejo que en el de otras modalidades de investigación, porque se utiliza más de una

técnica. La obtención de datos se da por diversos procesos ya que es fundamental garantizar la calidad de los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos en el estudio de casos deben ser provenientes de la convergencia o de la divergencia de las observaciones obtenidas de los diferentes procedimientos. De esta manera es como se logra comprobar la validez del estudio, evitando que quede subordinado a la subjetividad del investigador.

La utilización de múltiples fuentes de evidencia constituye el principal recurso de que se vale el estudio de caso para comprobar la veracidad de sus resultados.

Según YIN (1994), una característica importante de la estrategia de estudio de caso es la utilización de múltiples métodos y herramientas para la recolección de datos, y la inclusión de enfoques tanto cuantitativos como cualitativos. De acuerdo a este autor se puede aumentar la confiabilidad y la viabilidad del estudio siguiendo tres principios que se presentan a continuación.

- La utilización de múltiples fuentes de evidencias: los estudios de caso no deben estar limitados a una única fuente de evidencia, debiendo estar basados en una convergencia de informaciones provenientes de diferentes fuentes, que sean tanto cualitativas como cuantitativas.
- La creación de una base de datos del estudio de caso: la construcción de una base de datos formal, independiente de la descripción de la investigación puede aumentar la confiabilidad de la investigación y la posibilidad de estudios futuros sobre la misma base de datos.
- Establecer una cadena de evidencias que permita una unión clara de las preguntas iniciales de investigación con las conclusiones del estudio de caso, permitiendo a cualquier observador externo ser capaz de poder seguir las etapas en cualquier dirección (de las conclusiones a las preguntas iniciales de investigación o viceversa).

Teniendo en cuenta lo expresado en el presente capítulo, la estrategia de la investigación utilizada en esta tesis es la de estudio de caso, en cuanto se realizará un examen detallado de un escenario, un tema, un archivo de documentos y un evento en particular. En esta tesis se analizaron 3 casos de estudio: un edificio de viviendas con HAD en primeros niveles, un edificio de Hotel con HAD en los primeros niveles y un hotel con HC Fck = 30 MPa, los mismos se basaron en autores que realizaron estudios de caso con algunas semejanzas a los planteados en esta tesis, sirviendo como punto de partida para el diseño de la investigación (DAL MOLIN et al, 2007; REINERT et al, 2015; BREITENBUCHER, 1998 y GUIMARÃES, 2000).

3.3 Diseño de la investigación

Para MARTÍNEZ (2006) antes de iniciar la fase de obtención empírica de datos deben especificarse las principales tareas que han de realizarse como se especifica en la siguiente figura.

En esta investigación el proceso de revisión bibliográfica fue realizado durante todo el período en el cual se llevó a cabo la tesis, como lo indica la Figura 3.1.

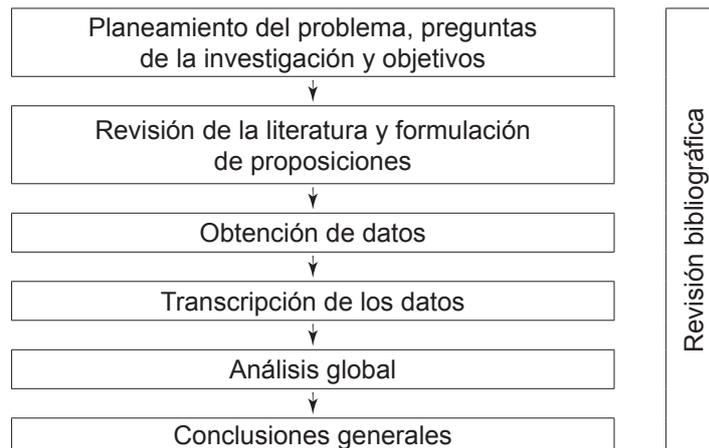


Figura 3.1 - Síntesis del proceso de la investigación (elaboración propia).

Según BOGDAN Y BIKLEN (1982) el diseño de la investigación es un plano de cómo el investigador debe llevar adelante su trabajo, estos autores agregan que las decisiones del diseño, en caso de estudios cualitativos, son tomadas durante todo el proceso de la investigación.

En esta tesis se realizaron tres estudios de caso: para el caso de estudio 1 se ha considerado un edificio de viviendas con HAD en primeros niveles. En el caso 2 un edificio de Hotel con HAD en los primeros niveles. Mientras que, en el caso 3 se ha considerado un hotel realizado con hormigón convencional (HC) de resistencia característica a compresión $F_{ck} = 30$ MPa. Estos 3 casos se presentan y discuten en el capítulo 4.

En los dos primeros se analizó cuáles son los beneficios de bajar la resistencia de las piezas estructurales de hormigón que no requerían la resistencia especificada para la obra y sí emplearlas, donde son necesarias. De esta forma se analizaron costos y viabilidad de uso, siguiendo el artículo de REINERT et al (2015) donde se modifican las resistencias en elementos estructurales (ver capítulo 4).

También DAL MOLIN et al (2007) y GUIMARÃES (2000) permiten generar un estudio basado en los mismos parámetros empleados en los casos de estudio 1 y 2, donde se consideró como sustento teórico para valorar la reducción en el empleo del HAD, dónde no era necesario y de esta forma reducir costos (ver capítulos 4.3.1 y 4.3.2).

Para el caso 3 se realizará un estudio comparativo de la estructura de hormigón de un edificio, que se construyó con HC y se evaluará cuáles son las ventajas de cambiar la estructura ya realizada con HC por HAR como lo llevó a cabo BREITENBUCHER (1998) donde su estudio sirvió como referencia para el caso 3 del capítulo 4.

En relación con estos casos de estudio y de acuerdo con lo recomendado por YIN (1994) y YIN (2001) se realizará un informe donde serán analizados los datos obtenidos los cuales otorgarán conclusiones.

El diseño de la investigación se desarrollará en 5 etapas que se ven de forma esquemática en el cuadro que se presenta en la Figura 3.2 y posteriormente se describirá cada etapa planteada.



Figura 3.2 - Diseño de la investigación (elaboración propia).

Con el objetivo de proporcionar una fundamentación teórica, la revisión bibliográfica fue realizada durante todo el proceso de la elaboración de la investigación.

El diseño metodológico a emplear para los tres casos de estudio será a partir de un proyecto arquitectónico conocido, donde se evaluará la utilización de HAD en el caso 3 donde no se había empleado el mismo, y se analizarán las ventajas y desventajas de su empleo, mientras que en los casos 1 y 2 se analizarán qué ventajas y desventajas traerá cambiar elementos estructurales establecidos con una resistencia por otra.

Para llevar a cabo el análisis de los costos del HAD se va a definir de antemano y diferenciar los costos operacionales (Opex, abreviación del inglés: Operative Expenditures) de los costos de inversión (Capex, abreviación del inglés: Capital Expenditures).

Se realizaron entrevistas a los actores de nuestro medio que —ya sea por su experiencia o por su posición en el mercado como ingenieros calculistas, arquitectos, gerentes de empresas hormigoneras— aportaron datos de fabricación, empleo y costos de los hormigones.

La primera etapa denominada diagnóstico consistió en analizar los documentos con los cuales se contó para las tres obras en estudio. Estos proporcionaron una base teórica para el diagnóstico sobre el costo de los hormigones empleado en las obras.

Luego de realizar un exhaustivo análisis de los datos con que se contaba, se pasó a la etapa que consiste en identificar y analizar los costos del hormigón, los cuales otorgan una rápida visión de la situación.

Con los costos de los hormigones empleados se analizó de igual forma la incorporación y sustitución de los hormigones existentes en obra por otro tipo de hormigones (HAD) vistos en esta tesis, estos hormigones necesitaron un estudio previo de costos para poder incorporarlos y sustituirlos por los empleados en las obras realizadas.

La siguiente etapa consistió en evaluar los datos obtenidos con la utilización de los nuevos hormigones, HAR y HAC en las obras, lo que permitió estimar su viabilidad económica; y posteriormente, la última etapa fue la de las conclusiones.

3.4 Descripción de las tareas de investigación

3.4.1 Diagnóstico

En esta etapa de diagnóstico fueron estudiadas tres obras de arquitectura, en las cuales se profundizó en los costos del hormigón.

De acuerdo con YIN (2001), es necesario utilizar diversas fuentes de evidencia, ya que las mismas se complementan entre sí, y en la mayor cantidad posible, en cuanto esto contribuye a aumentar la confiabilidad de la investigación.

A continuación, se describen las fuentes de evidencia utilizadas en esta investigación.

Se realizaron entrevistas con los actores involucrados, a saber: jefes de obra, directores de obra e ingenieros calculistas, con el fin de conocer cómo fueron realizados los procesos de suministro, colocación y curado del hormigón, y comprobar si dichos procesos se realizaron con las características requeridas por los HAD.

Se indagó concretamente a los directores y jefes de obra sobre la ejecución de los HAD en las obras de referencia, para luego analizar si tal ejecución se condijo con la utilización adecuada y eficiente del HAD.

A posteriori se consultó a los ingenieros calculistas si en las obras de referencia era viable utilizar en sus elementos estructurales (losas y vigas) un hormigón de menor resistencia que el efectivamente utilizado, y luego analizar cómo esto hubiera incidido en los costos.

Se realizó también un análisis detallado de la documentación relativa a los costos existentes en estas tres obras. Según YIN (2001) las ventajas de la documentación es que estas se constituyen en una fuente estable, que puede ser revisada varias veces, que es exacta por contener nombres, referencias y detalles de un evento. En esta investigación fueron analizados informes de costos, procedimientos y ejecución.

La observación del investigador también es aplicada en estos casos de estudio a través de la participación, permitiendo observar la realidad por conocer cada uno de los proyectos y sus etapas desde el punto de vista interno del estudio de caso y no desde un punto de vista externo.

3.4.2 Estudio de costos

En esta etapa se estudiaron los costos de HC y HAD a partir de los valores del mercado en plaza correspondientes al primer semestre de 2019.

Para los casos 1 y 2 el estudio de costos consistió en verificar si las resistencias establecidas por proyecto para los elementos estructurales podrían haber sido menores, y de ser así, cuál sería el mínimo de resistencia a tolerar por el proyecto, para luego hallar la economía resultante del empleo de estas últimas resistencias.

De acuerdo a lo informado en las entrevistas por los distintos actores involucrados, los elementos estructurales fueron sobredimensionados, por considerarse más práctico en obra trabajar con un único tipo de hormigón, que realizar cada elemento estructural con un hormigón de diferente resistencia.

En esta etapa no se estudió el sobrecosto que pueden traer patologías futuras asociadas al uso de resistencias mayores donde no son requeridas por considerarse que escaparían del alcance de una tesis de Maestría.

En el caso 3, considerando que los pilares fueron originalmente diseñados y ejecutados en HC, se procedió a calcularlos nuevamente de acuerdo a un diseño y ejecución en HAD, hallando un ahorro resultante del menor empleo de hormigón armado (no se consideró el impacto en los costos de la obtención de un mayor metraje en planta por reducción de la sección de los pilares).

Para los tres casos de estudio los datos se obtuvieron de empresas proveedoras de hormigón y luego se incorporaron a los datos de metraje cúbicos de cada uno, dejando de lado los valores presupuestados en las licitaciones previas a ejecutar cada una de las obras, debido a que lo que se quiso obtener es un porcentaje de diferencia que pueda servir para futuros casos de estudios.

Para esta investigación y para llegar al porcentaje deseado se tomaron únicamente valores de operación denominados Opex.

Luego se incorporó a las planillas el costo resultante de implementar en estas mismas obras hormigones con dosificaciones diferentes para evaluar la viabilidad económica del uso de estos hormigones en nuestro medio.

Se tomó como premisa la dosificación del estudio de RODRIGUEZ et al (2007) para solicitar a las empresas del medio cotizaciones de hormigones con ceniza de cáscara de arroz (CCA), que fue seleccionada por su alta resistencia que se logra con aparente bajo costo, ver capítulo 4. Se logró que una empresa del medio cotizara esta opción, considerando costo cero para la CCA debido a que es un residuo de la industria arrocera de nuestro país.

Según RODRIGUEZ et al (2013) en Uruguay la CCA es un producto mayormente de la quema sin combustión controlada, aprovechando su capacidad calorífica en el proceso de parboilizado del arroz o para la generación de energía eléctrica. La ceniza actualmente obtenida es derivada hacia terrenos especialmente dispuestos para ese fin.

En la tabla 3.1 se muestran las proporciones de mezcla de los materiales utilizados, en peso. La sustitución de CCA por CP se da por relación de volúmenes y no por el peso del material.

A/ (c+CCA)	CCA %	Cemento kg/m ³	CCA kg/m ³	Agregado Fino kg/m ³	Agregado Grueso kg/m ³	Superplastificante %	Consistencia Cm
0,32	0	534	-	690	1050	0,52	6,20
	5	507,5	17,5	690	1050	0,55	8,12
	10	481	35	690	1050	0,81	6,30
	15	454	52,5	690	1050	0,95	4,20
	20	427	70	690	1050	0,92	8,50
0,40	0	462	-	723	1018	0,10	5,20
	5	439	15,15	723	1018	0,24	9,70
	10	416	30,3	723	1018	0,27	4,53
	15	393	45,45	723	1018	0,41	4,24
	20	370	60,6	723	1018	0,50	4,20
0,50	0	408	-	758	983	-	6,80
	5	388	13,5	758	983	-	14,80
	10	367	27	758	983	-	3,70
	15	347	40,5	758	983	-	4,20
	20	327	54	758	983	-	15,50

Tabla 3.1 - Dosificaciones para distintos hormigones (RODRÍGUEZ et al, 2007)

En la tabla 3.2 se muestra los resultados obtenidos de resistencia a la compresión de los hormigones a la edad de 28 días.

A/ (c+CCA)	CCA %	Resistencia a la compresión (MPa)	Coefficiente (%)	Resistencia a la penetración CI (mm)	Coefficiente (%)	Coefficiente de difusión (10 ⁻⁵ mm ² /s)
0,32	0	68,10	2,16	7,36	1,33	1,86
	5	61,87	1,91	8,48	9,36	2,48
	10	70,20	2,10	8,02	3,20	2,21
	15	63,67	2,67	6,90	3,42	1,64
	20	66,27	2,64	7,50	7,55	1,94
0,40	0	54,87	3,29	9,59	1,22	3,17
	5	51,27	2,98	8,46	3,13	2,47
	10	53,30	4,30	8,82	1,18	2,68
	15	52,17	5,32	7,60	17,09	1,99
	20	40,83	3,67	13,43	3,02	6,21
0,50	0	36,95	2,55	12,80	0,78	5,60
	5	39,57	4,01	12,40	0,81	5,30
	10	39,83	2,66	11,54	9,62	4,59
	15	36,07	0,85	11,88	5,13	4,86
	20	31,87	1,55	14,77	2,13	7,52

Tabla 3.2 - Resistencia a la compresión y otras características del hormigón a los 28 días (RODRÍGUEZ et al, 2007).

En esta investigación se tomará la dosificación presentada en las tablas 3.1 y 3.2 con una relación agua cemento y CCA de 0,32 y 20% de sustitución de cemento por CCA alcanzando una resistencia de 66 MPa. Se considero esta dosificación

ya que se logra una mayor resistencia con un menor costo, gracias a que se utiliza mayor porcentaje de CCA. En la tabla 3.3 se demuestra con valores de mercado el costo de las dosificaciones presentadas en las tablas 3.1 y 3.2.

		Costos UYU/m ³ de Hormigón					
Relación A/(c+CCA)	CCA %	Cemento	CCA	Agregado fino	Agregado grueso	Super plastificante	Total UYU
0,32	0	2549	0	196	367	815	3927
	5	2423	0	196	367	819	3805
	10	2296	0	196	367	1143	4003
	15	2167	0	196	367	1266	3996
	20	2038	0	196	367	1153	3755
0,4	0	2205	0	205	356	136	2903
	5	2096	0	205	356	309	2966
	10	1986	0	205	356	293	2840
	15	1876	0	205	356	473	2910
	20	1766	0	205	356	543	2871
0,5	0	1948	0	215	344	0	2507
	5	1852	0	215	344	0	2411
	10	1752	0	215	344	0	2311
	15	1656	0	215	344	0	2216
	20	1561	0	215	344	0	2120

Tabla 3.3 - Costo de las dosificaciones para hormigones según tabla 3.1 (elaboración propia).

Para realizar costos de la tabla 3.3 se consideraron costos Opex, se tomaron 3 valores del mercado para cada componente, escogiéndose el más económico, no se consideraron los valores de mano de obra así como tampoco el beneficio de las empresas, es solamente el costo de los materiales, ya que se considera que los otros valores son semejantes y lo que se quiere obtener es la diferencia en porcentaje para las distintas resistencias a la compresión, teniendo en cuenta que en esta tesis se requieren datos de alta resistencia, por este motivo se tomó la ecuación que combina la mayor resistencia y menor costo. A partir de esta tabla se realiza la tabla 3.4 donde se indican los valores porcentuales entre el m³ de hormigón y sus MPa de resistencias. Se dejan de lado los costos de inversión (Capex).

A partir de esta tabla se determina que el valor más rentable de las diferentes dosificaciones, teniendo en cuenta la necesidad de obtener mayores resistencias, es aquel correspondiente a la de 66 MPa, la cual tiene menor costo por MPa. Cuanto mayor es la resistencia del hormigón más conveniente resulta para justificar la reducción de las dimensiones de pilares en planta como lo

indican los casos de estudio en el capítulo 4, en donde las necesidades de alta resistencia son indispensables para lograr mayores áreas útiles en planta por lo cual se consideró resistencias iguales o mayores a 60 MPa como premisa para la investigación en dicho capítulo.

Relación A/(c+CCA)	CCA %	Resistencia Compresión (MPa)	Costo UYU/m ³	Incidencia %/m ³	Costo UYU/MPa	Incidencia %/MPa
0,32	0	68,10	3927	4,6%	58	1,8%
	5	61,87	3805	1,3%	62	8,6%
	10	70,20	4003	6,6%	57	0,6%
	15	63,67	3996	6,4%	63	10,8%
	20	66,27	3755	0	57	0
0,4	No se estudian por no alcanzar resistencia requerida					
0,5	No se estudian por no alcanzar resistencia requerida					

Tabla 3.4 - Relación costos por m³ y MPa (elaboración propia).

Se elige una dosificación que se estima conveniente para la reducción de costos y con materiales de desecho de la industria uruguaya; luego se solicita a las empresas hormigoneras los costos para esta dosificación. Se trabajó en forma conjunta con una de ellas y se obtuvieron los valores que serán de uso en el capítulo 4.

3.4.3 Implementación

Luego de analizar los costos de los hormigones existentes y de procesada la información, se pasa a estudiar cuánto costarían los hormigones HAC y HAR puestos en obra, con esta información se cambiarán los costos reales de las dosificaciones existentes por los costos de las dosificaciones de estos nuevos hormigones. Se constata que los hormigones existentes en obra son de alta resistencia, pero son subutilizados puesto que estos hormigones lograban las altas resistencias requeridas con mayor cantidad de cemento portland, por este motivo se eligieron las obras para los casos de estudio. Los nuevos hormigones para incorporar contarán con dosificaciones diferentes logrando altas resistencias y mejor autocompatibilidad. Además, se corregirán las resistencias de diferentes elementos estructurales y se utilizará la mínima necesaria para cada una, como en losas y vigas manteniendo las altas resistencias y cambiándolas a mayores resistencias en aquellos elementos estructurales que si se justifica su utilización, como en pilares.

Esta etapa se divide en 4 subetapas de investigación:

1. Tomar de los rubrados existentes la información de los costos y m^3 referente a los hormigones puestos en obra de los proyectos seleccionados. Estos costos se desglosarán en mano obra, materiales y costo empresa.
2. Se obtuvieron costos por m^3 de HAC y HAR puestos en obra de las empresas de mercado, quienes además proporcionaron el costo de nuevas dosificaciones solicitadas para esta investigación.
3. Calcular la cantidad de hormigón para las obras estudiadas con los nuevos hormigones, se calculó su costo por m^3 en el punto anterior. Este estudio de costos con nuevas dosificaciones de hormigones se cruzará en las planillas ya existentes.
4. Se graficarán los resultados de los hormigones existentes versus los nuevos hormigones proyectados. De esta forma se obtendrá un porcentaje que es un delta de aumento o disminución por el uso de HAD en lugar de HC y/o por el cambio de resistencia en piezas estructurales, dependiendo del caso de estudio. De este punto se extraerán las conclusiones en el capítulo 5 donde se verá efectivamente la viabilidad económica por reducción de secciones y áreas.

Para la elaboración de todas las tablas y graficas se utilizará el software de hojas de cálculo Excel.

3.4.4 Validación

En esta etapa de validación se analizará críticamente los costos de los hormigones de obra empleados.

El análisis fue realizado a partir de los datos que fueron recolectados en las fases de las estrategias anteriores.

Basado en este análisis se buscó identificar los costos de los HAD utilizados en la obra para conseguir identificar los principales puntos fuertes y oportunidades de mejora con los nuevos hormigones.

Para la validación del sistema serán utilizadas cuatro subetapas:

1. La primera es la actualización a la fecha de los costos de los hormigones HAD utilizados en obra, cuyas variables serán la adaptación de los procedimientos de actualización de precios y la fuente de evidencia es la

observación y análisis de documentos, análisis de indicadores como el IPC y la variación del dólar.

2. La segunda etapa consiste en el cálculo de los costos de HAR y HAC con dosificaciones establecidas en puntos anteriores, aquí las variables serán la recolección de datos, monitoreo de procesos críticos y la capacitación, la fuente de evidencia en esta etapa serán las referencias bibliográficas, conversaciones con técnicos y el análisis de documentos.
3. En la tercera etapa se vincularán los costos realizados en la segunda etapa para HAR y HAC y se adaptarán a la obra seleccionada, se realizará la comparación entre costo actualizado en la primera etapa y se obtendrá como variable la relación costo-beneficio. En esta etapa las fuentes de evidencia serán el mapa de explicación con la estrategia y la recomendación de técnicos involucrados con la percepción del investigador.
4. En la cuarta y última etapa, se obtendrán resultados en donde las variables serán la mejora en los procesos a partir del uso de HAR y HAC. La reflexión de los resultados obtenidos y la fuente de evidencia serán el análisis de planillas realizadas, porcentajes obtenidos y la percepción del investigador.

Estas subetapas se basan en COSTA (2003) y se muestran en la tabla 3.5.

Validación		
Etapas	Variables	Fuentes de evidencia
Actualización del hormigón utilizado	Adaptación de los procedimientos de actualización de precios	Observación y análisis de documentos - análisis de indicadores como IPC - variación del dólar
Cálculo de costos del HAR y HAC	Recolección de datos - monitoreo de procesos críticos - capacitación	Referencias bibliográficas - conversaciones con técnicos - análisis de documentos
Vinculación de los costos del HAR y HAC para la obra seleccionada	Relación costo beneficio	Mapa de explicación de la estrategia - recomendación de técnicos involucrados
Resultados	Mejoras en los procesos a partir del uso del HAR y HAC - reflexión de los resultados obtenidos	Análisis de planillas obtenidas y percepción del investigador

Tabla 3.5 - Validación de la investigación (elaboración propia).

4. Estudio de casos, resultados y discusión

Tal como fue señalado, la utilización de HAD en la industria de la construcción uruguaya es una práctica muy poco extendida, por lo que el universo de obras a seleccionar para el análisis es, acorde a ello, muy acotado.

Ubicados ya dentro del universo de obras de arquitectura que utilizaron HAD en Uruguay, se identificaron aquellas cuyos elementos estructurales fueron ejecutados con estos hormigones, a los efectos de seleccionar dos proyectos recientes.

El primer proyecto consiste en dos torres de 22 niveles cada una más 6 niveles de basamento, los primeros niveles con destino comercial y estacionamientos mientras que los 22 niveles siguientes tienen destino residencial. Cada torre cuenta con 18.000 m².

El segundo proyecto consiste en un edificio de 15 niveles más subsuelo y planta baja de 13.400 m² destinado a Hotelería.

Se incluyó un tercer edificio, anterior en el tiempo (1986), que en su época fue realizado con el hormigón de mayor resistencia elaborado en nuestro país ($F_{ck} = 30$ MPa) y marcó un hito en Uruguay. Consiste en un edificio de 28 niveles con destino a Hotel de 28.000 m². Hoy en día la resistencia lograda en esta obra no sería considerada de alto desempeño, sino como realizada con un hormigón convencional (HC). A raíz de esto se tomó este ejemplo a los efectos de demostrar cuanto se puede economizar utilizando HAD en lugar de HC.

Un elemento determinante a la hora de seleccionar estos proyectos (además de las características de los mismos brevemente reseñadas, sobre las cuales se profundizará líneas abajo) es que los casos de estudio 1 y 2 fueron ejecutados por el estudio Gómez Platero Arquitectos, con participación directa en todas las etapas de la obra (anteproyecto, proyecto ejecutivo y dirección de obra), facilitando el acceso a la información de la ejecución de cada una de ellas y, específicamente, sobre los procesos constructivos empleados para los

hormigones utilizados en ellas. En el caso de estudio 3, este fue ejecutado por el estudio de arquitectos Guillermo Gómez Platero Arquitecto, Enrique Cohe y Roberto Alberti Arquitectos Asociados, antecesor de Gómez Platero Arquitectos.

Sobre los proyectos seleccionados se accedió a las siguientes fuentes de información: documentación gráfica y escrita, planillas de costos y rubrados, certificados de avance, entrevistas al ingeniero calculista y al ingeniero jefe de obra, a saber, los profesionales responsables de la ejecución de los hormigones realizados.

Complementando dichas fuentes, se realizaron entrevistas a profesionales (ingenieros y arquitectos), de las plantas de fabricación de los hormigones, con el fin de profundizar sobre los procesos en planta y las dificultades para la fabricación de HAD en Uruguay.

En los casos de estudio seleccionados para esta tesis se investigó la puesta en obra del HAD a través de la documentación de las mismas y entrevistas a los profesionales responsables por la ejecución de los hormigones y de los costos de los mismos.

4.1 Estudio de casos

4.1.1 Caso 1. Edificio de viviendas con HAD en primeros niveles

Para el caso de estudio 1 la obra de referencia se encuentra dentro del área urbana consolidada de la ciudad de Montevideo.

El proyecto tiene un programa mixto compuesto por una propuesta de desarrollo comercial y dos torres de viviendas integradas al complejo como lo indica la figura 4.1. El centro comercial cuenta con dos atractores importantes, a saber, un supermercado de grandes dimensiones y un complejo con 4 salas de cine. Completando la propuesta existen una plaza de comidas y diversos locales comerciales de medianas dimensiones, un subsuelo y bandejas de estacionamiento. Con respecto a las torres de viviendas, constan de 22 pisos, totalizando 210 unidades de 1, 2 y 3 dormitorios.

Las superficies de las construcciones se dividen en centro comercial con 66.000 m² y viviendas con 18.000 m² en cada torre, divididas en:

Cines: 1.800 m²

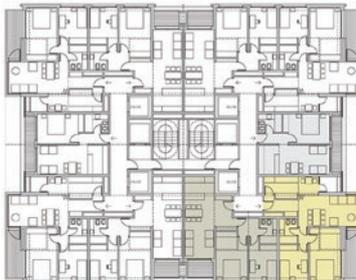
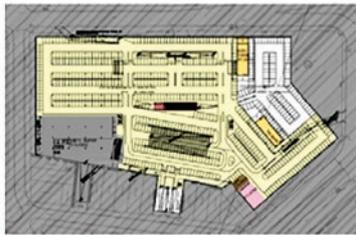
Supermercado: 8.900 m²

Locales comerciales y áreas de servicios y circulaciones: 20.900 m²

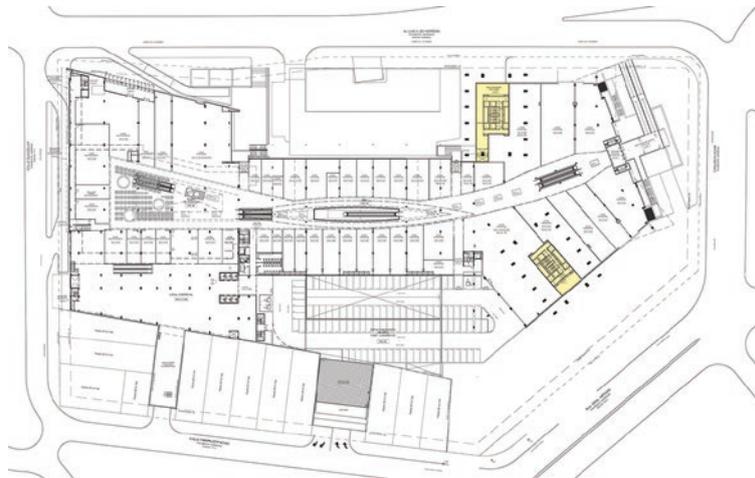
Estacionamiento: 34.400 m²

Vivienda: 18.000 m² en cada torre.

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.1 - Primer caso de estudio: (a) Planta de subsuelo de estacionamientos. (b) Planta tipo de la torre de viviendas. (c) Planta del primer nivel del centro comercial y estacionamientos.

(d) Render parcial del complejo. (e) Render general del centro comercial y torres.

Fuente: archivo estudio GP.

El proyecto original de estas torres planteaba la utilización de HAR de $F_{ck} = 45 \text{ MPa}$ y $F_{ck} = 60 \text{ MPa}$ en patines, pilares, vigas y losas. Al momento de la ejecución, se decidió en obra realizar los mencionados elementos estructurales hasta el nivel 5 con HAR de $F_{ck} = 60 \text{ MPa}$.

En función de lo expuesto, es posible apreciar que el proyecto constituye un caso representativo en nuestro medio de la utilización de HAR.

En la presente investigación se estudiará el HAR utilizado en las losas de las torres y su viabilidad económica

4.1.2 Caso 2. Edificio de hotel con HAD en los primeros niveles

El caso de estudio 2 se encuentra en un área consolidada de la ciudad, es un programa de hotel con 172 habitaciones y servicios, que se desarrolla en subsuelo, planta baja y 15 niveles, con una superficie total de 13.400 m². Ver figura 4.2



Figura 4.2 - Segundo caso de estudio: Vistas de la fachada principal del hotel.
Fuente: archivo estudio GP.

Las fundaciones, debido a las características del suelo, son bases de patines ejecutadas con HAR con una resistencia a la compresión a los 28 días de $F_{ck} = 45 \text{ MPa}$.

La estructura del edificio es monolítica de hormigón armado. La obra se encuentra ubicada en un terreno complejo, con forma triangular, lo que determinó que una de las premisas del proyecto fuera que en las plantas se maximizara el área libre disponible. A los efectos de cumplir con tal premisa, se redujeron las dimensiones y la cantidad de pilares a emplear, mediante la

ejecución de los mismos con HAR con una resistencia a la compresión a los 28 días de $F_{ck} = 45 \text{ MPa}$ (figuras 4.3 y 4.4).

Este proyecto es seleccionado como caso de estudio considerando su reciente ejecución (2016), y sus dimensiones más acotadas en relación al caso 1, lo cual permite observar la utilización del HAR en proyectos con diferentes escalas y programas.

En la presente investigación se estudiará el HAR utilizado en losas.

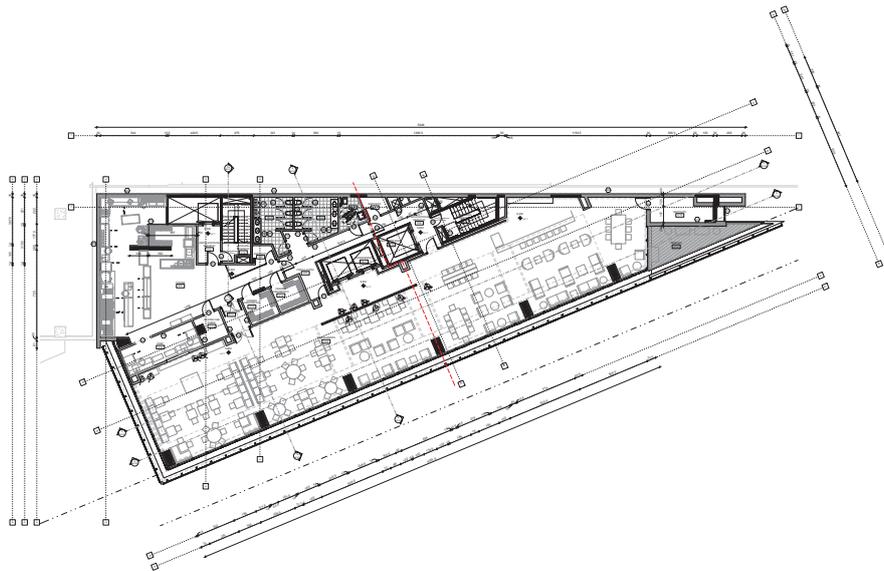


Figura 4.3 - Planta Nivel 2. Fuente: archivo estudio GP.

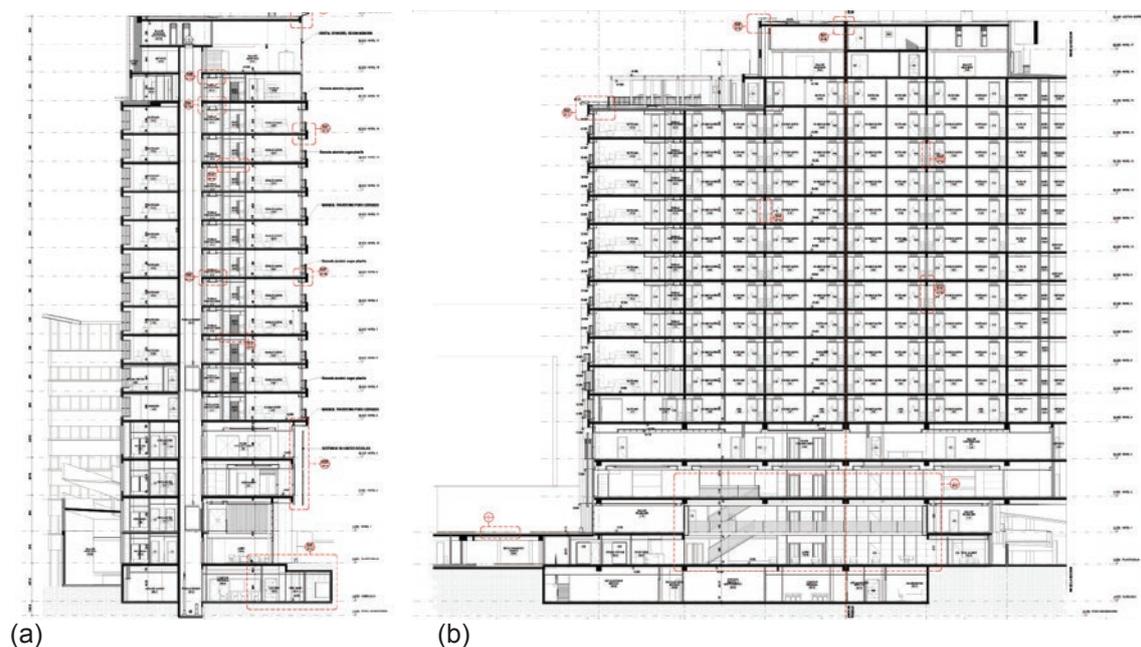


Figura 4.4 - (a) Corte transversal. (b) Corte longitudinal. Fuente: archivo estudio GP.

4.1.3 Caso 3. Hotel con HC Fck = 30 MPa

El caso de estudio 3 consiste en un edificio con programa hotel de 3 niveles de subsuelos, planta baja, 22 niveles de torre, salas de conferencias-convenciones de mediano y gran porte, zona de casino, gimnasio, piscina y spa, totalizando 28.000 m² (figura 4.5).

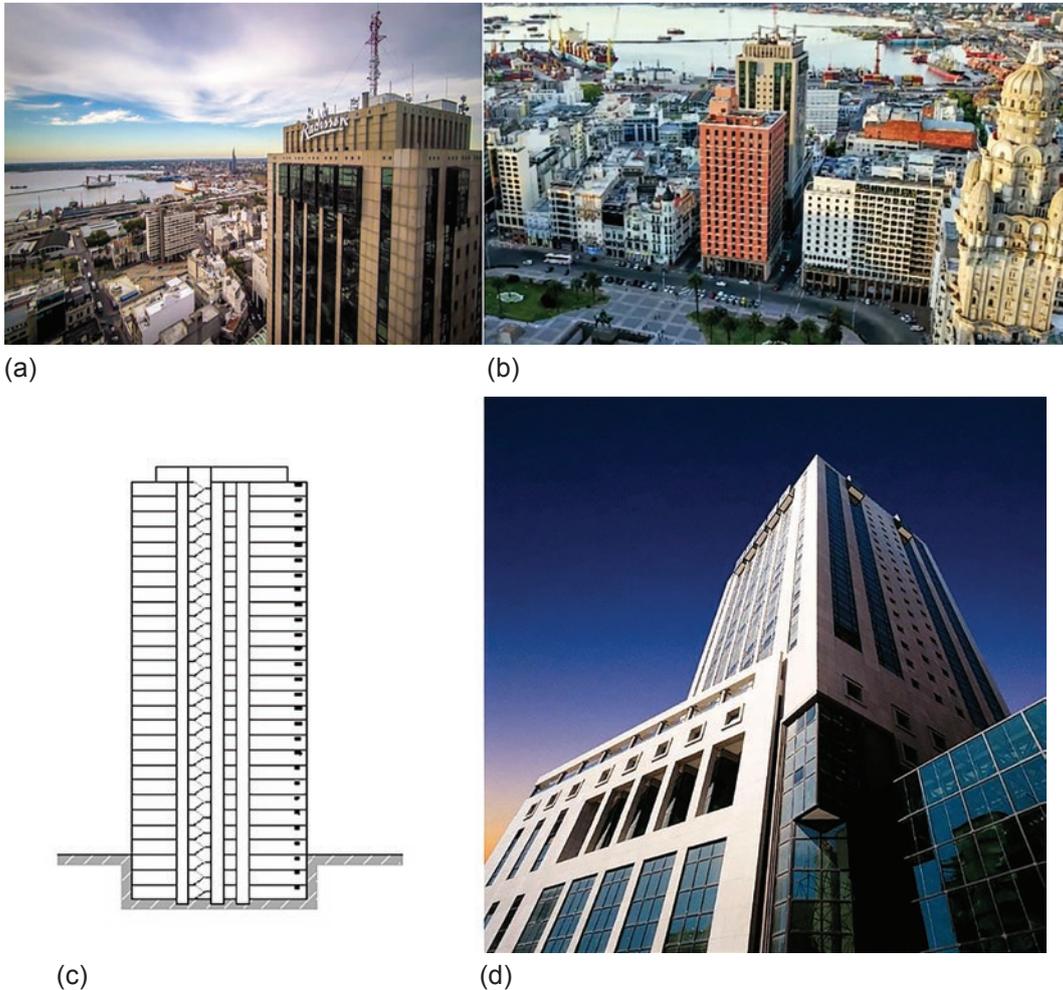


Figura 4.5 - Tercer caso de estudio: (a) y (b) Ubicación del hotel. (c) Corte esquemático de la torre del hotel. (d) Fachada principal. Fuente: archivo estudio GP.

La obra se encuentra en el área más consolidada de la ciudad, donde converge el turismo y la zona de negocios de la ciudad vieja. Asimismo, su proximidad a la zona portuaria lo convertía en un gran atractor.

Significó un desafío en su época para las empresas locales proveedoras de hormigón, en cuanto fue uno de los primeros que lograban ejecutar en plaza con una resistencia a la compresión a los 28 días de $F_{ck} = 30$ MPa.

Si bien en otras partes del mundo ya se estaban usando hormigones con mucha mayor resistencia —del orden de 60 y 80 MPa— en la década del 80 en Uruguay solo se alcanzaban resistencias de $F_{ck} = 10$ y 20 MPa, por lo que esta obra fue pionera en la utilización de resistencia $F_{ck} = 30$ MPa.

Se decidió utilizar tal resistencia pues permitía disminuir el volumen de los pilares y por tanto ocupar menos área en las plantas

4.2 Costos a considerar en los casos de estudio

Para esta investigación se consideraron los datos suministrados por 3 empresas hormigoneras de nuestro medio, correspondientes al costo del m^3 de hormigón para las empresas constructoras.

Del contacto con la primera empresa hormigonera, (empresa 1) se obtuvieron como dato los costos que manejan por m^3 de hormigón para las diferentes resistencias que logran y también para los HAC.

A través de la entrevista se concluyó que los HAR fabricados por esta empresa no logran resistencias mayores a $F_{ck} = 50$ MPa. Las dificultades que tienen para lograr hormigones de estas características son el costo, la dosificación y que no han tenido demanda de resistencias tan altas.

Para lograr resistencias de $F_{ck} = 45$ MPa utilizan mayor cantidad de finos como el cemento, filler calcáreo y aditivos como el Sika ViscoCrete.

Para los HAC logran resistencias entre $F_{ck} = 20$ MPa y $F_{ck} = 25$ MPa, debido a que le agregan mayor cantidad de cemento y filler calcáreo, además aditivos como el Sika Air y el Sika 123. Estos HAC se utilizan en piezas prefabricadas en obra, donde se llenan los encofrados por arriba y si bien no es necesario vibrar como un HC, necesitan vibrado. Esta característica no corresponde a los HAC, esto indica que la dosificación no es la correcta de acuerdo a los ensayos y análisis de HAC realizados y brindados en las normas, ya que una de sus principales características es que no necesitan vibrado, por lo cual, se concluye que estos HAC que se logran en Uruguay con la empresa 1 son hormigones con algunas características de los HAC y que se asemejan al HC pero con mayor trabajabilidad. Son hormigones hiperfluidos, pero no HAC.

La empresa 1 suministra la cotización de la tabla 4.1

Tipo de hormigón	Fck (MPa)	Asentamiento (cm)	Agregado grueso (mm)	Unidad	Costo
Hormigón común	20	12 ± 2	5 a 25	UYU/m ³	3.335
Hormigón común	25	12 ± 2	Pedregullo lavado 6 a 25	UYU/m ³	3.570
Hormigón autocompactante	25	65 ± 5	Pedregullo (gravillín) 10	UYU/m ³	4.420
Hormigón de alta resistencia	45	20 ± 5	Piedra partida 5 a 20	UYU/m ³	4.595
Hormigón de alta resistencia	60	20 ± 5	Piedra partida 5 a 20	UYU/m ³	5.700

Tabla 4.1 - Cotización del m³ de los hormigones suministrados por la empresa 1.

Estos hormigones cumplen las normas donde tienen en cuenta para las resistencias características que se determinan según norma UNIT 1050:2005, 1081:2002 y 101:1998.

En la segunda entrevista (empresa 2), un representante manifestaba la dificultad de obtener hormigones con Fck = 60 MPa ya que no es una resistencia solicitada a menudo, no lo tienen en su lista de precios, por lo que solamente lo cotizan a pedido para una obra en particular. El costo de sus hormigones se presenta en la tabla 4.2.

Tipo de hormigón	Fck (MPa)	Asentamiento (cm)	Agregado grueso (mm)	Unidad	Costo
Hormigón común	20	12 ± 2	5 a 25	UYU/m ³	3.450
Hormigón común	25	12 ± 2	Pedregullo lavado 6 a 25	UYU/m ³	-
Hormigón autocompactante	25	65 ± 5	Pedregullo lavado 10	UYU/m ³	4.180
Hormigón autocompactante	30	65 ± 5	Pedregullo lavado 10	UYU/m ³	4.350
Hormigón de alta resistencia	45	20 ± 5	Piedra partida 5 a 20	UYU/m ³	4.440
Hormigón de alta resistencia	60	Sin datos			

Tabla 4.2 - Cotización del m³ de los hormigones suministrados por la empresa 2.

La tercer empresa hormigonera (empresa 3) suministró los siguientes costos de los hormigones solicitados a fecha 21 de diciembre 2017 como se indica en la tabla 4.3.

Tipo de hormigón	Fck (MPa)	Asentamiento (cm)	Agregado grueso (mm)	Unidad	Costo
Hormigón común	20	12 ± 2	5 a 25	UYU/m ³	5.240
Hormigón común	25	12 ± 2	Pedregullo lavado 6 a 25	UYU/m ³	5.489
Hormigón común	30	12 ± 2	Pedregullo lavado 6 a 25	UYU/m ³	5.739
Hormigón autocompactante	25	65 ± 5	Pedregullo lavado 10	UYU/m ³	6.364
Hormigón autocompactante	30	65 ± 5		UYU/m ³	6.549
Hormigón autocompactante	45	65 ± 5		UYU/m ³	6.549
Hormigón de alta resistencia	45	20 ± 5	Piedra partida 5 a 20	UYU/m ³	6.737
Hormigón de alta resistencia	60	20 ± 5	Piedra partida 5 a 20	UYU/m ³	7.488

Tabla 4.3 - Cotización del m³ de los hormigones suministrados por la empresa 3.

Para el cálculo de la mano de obra se tuvo en cuenta lo regulado por el Consejo de Salario del Grupo 9 subgrupo 01 y el Decreto Ley N.º 14.411, donde se encuentran establecidos el valor de las remuneraciones mínimas por categoría laboral, las demás partidas salariales y compensatorias, las fórmulas de reajuste periódico de las mismas y las contribuciones especiales de seguridad social. Se consideró en esta investigación el valor del jornal correspondiente a 8 horas de trabajo, y que el personal jornalero trabajan habitualmente 44 horas por semana.

Pilares - hormigón armado por m ³				
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Tipo
1.	Armado de hierro			Cuantía 90kg/m ³
1.1	Acero conformado	kg/kg	1,00	Material
1.2	Alambre negro	kg/kg	0,01	Material
1.3	Peón práctico	hs/kg	0,07	Mano de obra
1.4	Oficial herrero	hs/kg	0,07	Mano de obra
2.	Encofrado			Cuantía m ² /m ³
2.1	Clavos de acero	kg/m ²	0,13	Material
2.2	Puntales	m/m ²	0,20	Material
2.3	Tablas	m ² /m ²	1,30	Material
2.4	Peón práctico	hs/m ²	2,00	Mano de obra
2.5	Oficial carpintero	hs/m ²	2,00	Mano de obra
3.	Llenado de hormigón			Cuantía m ² /m ³
3.1	Hormigón Fck = 300 MPa	m ³ /m ³	1,05	Material
3.2	Hormigonera	hs/kg	0,70	Equipo
3.3	Vibrador	hs/kg	0,15	Equipo
3.4	Peón práctico	hs/kg	0,07	Mano de obra
3.5	Oficial albañil	hs/kg	0,07	Mano de obra

Tabla 4.4 - Insumos necesarios para la ejecución de 1m³ de pilares de hormigón armado.

De los componentes de la tabla 4.4, se puede obtener un resumen que se presenta en la tabla 4.5.

Componente	Cantidad	Costo USD	% Incidencia
Mano de Obra	1 m ³	330	30%
Encofrado	1 m ³	159	14%
Hormigón	1 m ³	215	20%
Hierro	1 m ³	396	36%
TOTAL	1 m ³	1100	100%

Tabla 4.5 - Resumen de incidencias para pilares dado por empresas de plaza.

Para el cálculo de la mano de obra se tuvo en cuenta lo establecido y regulado en el Decreto Ley N.º 14.411. Donde se encuentran establecidos las remuneraciones, laudos, viáticos, licencia, incentivos, aumentos y aportes sociales. El laudo es el monto de las remuneraciones que se determinan por acuerdo entre las asociaciones de empresarios, obreros y el Ministerio de Trabajo. Este acuerdo tiene un plazo de validez, que puede abarcar varios años. Durante ese plazo los salarios se ajustan

periódicamente, según fórmulas preestablecidas, vinculadas al aumento general de los precios. Se consideró en esta investigación el valor del jornal por tiempo trabajado. Los jornaleros trabajan normalmente 44 horas por semana.

A modo de simplificar los cálculos se tomó como base para el costo de la mano de obra el valor del jornal establecido para el medio oficial albañil que a fines de 2017 es de UYU 1.637, teniendo en cuenta incentivos, transporte y partida por alimentación y considerando necesarias para la ejecución de 1m³ de hormigón armado de pilares aproximadamente 6 jornales, con los datos antes mencionados daría un total en dólares de USD 330 al valor de tipo de cambio Tc=29,76.

Cabe observar que en los cálculos mencionados anteriormente para el costo del hormigón se consideró el costo de la empresa 3 para una resistencia Fck = 30 MPa.

Como verificación de los resultados obtenidos, considerando los precios de referencia del mercado que se ven en la tabla 4.6 y tomando rendimientos de CAVIGLIA (2005) que se presentan en la tabla 4.7, se resume en la tabla 4.8 la unión de la tabla 4.6 y 4.7 donde se analiza la incidencia por elemento que compone el hormigón armado para pilares. En ella se validan los resultados obtenidos en la tabla 4.5 para la mano de obra y el encofrado, siendo algo diferente en el caso del acero cuyo precio varía mucho en el mercado interno por lo que se presenta en una diferencia Δ de 6% y en el caso del hormigón hay diferencias Δ de un 10%. Esta variación depende de la incidencia del costo del hormigón que presente cada empresa constructora, donde al costo del hormigón se le cargan ganancias haciendo que los valores no sean semejantes. Además, existen estas diferencias Δ por que se están evaluando incidencias de una empresa constructora (tabla 4.5) e incidencias teóricas de CAVIGLIA (tabla 4.6) que distan entre sí.

Los beneficios de la empresa constructora no están presentes en estos costos.

Item		Unidad	Total	
1	Pedregullo	m ³	UYU	1313,93
2	Arena	m ³	UYU	991,8
3	Portland	Bolsa de 25 kg	UYU	113,93
4	Hierro	kg	UYU	50
5	Tablas	mm ²	UYU	130,82
6	Clavos	kg	UYU	113,86
7	Alambre	kg	UYU	76,78
8	Oficial carpintero	Horas	UYU	263,13
9	Oficial albañil	Horas	UYU	246,88
10	Péon práctico	Horas	UYU	170,52

Tabla 4.6 - Valores de mercado diciembre 2017.

Item	Cantidad	Unidad	Total		Notas
Hormigón C30	1	m ³	UYU	5739,00	Empresa 3
Mano de obra - Oficial	1,3	Horas	UYU	320,94	
Mano de obra - Péon	7	Horas	UYU	1193,64	
Hierro	110	kg	UYU	5500,00	
Mano de obra - Oficial herrero	0,04	Horas	UYU	1086,27	
Mano de obra - Péon	0,04	Horas	UYU	750,29	
Madera encofrado	6	P2	UYU	1758,17	
Clavos	2	kg	UYU	227,72	
Alambre	2	kg	UYU	153,56	
Mano de obra - oficial carpintero	1,5	Horas	UYU	1578,78	Se consideran 4 m ² de encofrado, 1 por cada cara
Mano de obra - péon	1,5	Horas	UYU	1023,12	Se consideran 4 m ² de encofrado, 1 por cada cara
Total			UYU	19331,49	Precio por m ³ de hormigón

Tabla 4.7 - Rendimientos de 1 m³ de HC Fck = 30 MPa, basado en tabla de rendimientos teórica de CAVIGLIA (2005) calculados con valores de mercado a diciembre 2017.

Se observan diferencias en relación con el hormigón y al acero, las diferencias se presentan en la columna indicada con Δ observándose que el total es similar, difieren solamente en un +2%.

Componente	Cantidad	% Incidencia	Δ
Mano de obra	1 m ³	31%	+1%
Encofrado	1 m ³	11%	-3%
Hormigón	1 m ³	30%	+10%
Hierro	1 m ³	28%	-6%
TOTAL	1 m ³	100%	+2%

Tabla 4.8 - Resumen sobre incidencia de componentes del hormigón armado en 1m³ para pilares calculado en esta tesis. Donde Δ es la diferencia entre tabla 4.5 y resultados obtenidos en esta tesis.

Cabe observar que existen diferencias en el hormigón y en el acero, ya que como se mencionó líneas arriba, son dos elementos cuyo valor fluctúa dependiendo tanto del porte de la obra como de la empresa constructora, así como si éstas cargan sus ganancias en dichos elementos o no. Esta realidad se visualiza en todo llamado a precios y/o licitación, donde se ven diferencias en estos rubros en un entorno de hasta 30% entre las empresas.

4.3 Resultados - costos de los casos estudiados

4.3.1 Caso 1. Edificio de viviendas con HAD en primeros niveles

Para el estudio de este caso, se calculó en una primera etapa el hormigón del armado total para la obra; con este metraje calculado se desglosaron las diferentes resistencias empleadas separándolas por niveles y elementos estructurales, como lo indica la tabla 4.9. y figura 4.6.

Torres Nuevocentro - Hormigones		
Fck 60		2696,75
Fundaciones (bajo nivel 099 albañilería)		
Patines de H.a.	m ³	916,69
Nivel 100 (sobre subsuelo, piso del nivel 100 albañilería)		
Pilares	m ³	127,78
Vigas	m ³	37
Losas	m ³	170
Nivel 200 (sobre planta baja O nivel comercial 1, piso del nivel 101 albañilería)		
Pilares	m ³	102,24
Vigas	m ³	12,68
Losas	m ³	58
Nivel 300 (sobre entrepiso 1, piso del nivel 102 albañilería)		
Pilares	m ³	102,24
Vigas	m ³	32,8
Losas	m ³	170
Nivel 400 (sobre nivel comercial 2, piso del nivel 103 albañilería)		
Pilares	m ³	102,24
Vigas	m ³	8
Losas	m ³	40
Nivel 500 (sobre segundo entrepiso, piso del nivel 104 albañilería y azotea)		
Pilares	m ³	102,24
Vigas	m ³	37,4
Losas	m ³	170
Nivel 700 (sobre nivel 105)		
Pilares	m ³	52,5
Pantallas	m ³	43,74
Vigas	m ³	145,2
Losas	m ³	266
Fck 45		2278,56
Nivel 800 (sobre nivel 106 y sobre nivel 107)		
Pilares pantallas	m ³	202,32
Vigas	m ³	25,2
Losas	m ³	532
Nivel 900 (sobre nivel 108 a sobre nivel 111)		
Pilares pantallas	m ³	404,64
Vigas	m ³	50,4
Losas	m ³	1064
Fck 30		6581,88
Nivel 1000 (sobre nivel 112 a sobre nivel 127)		
Pilares pantallas	m ³	1618,56
Vigas	m ³	201,6
Losas	m ³	4256
Nivel 1200 (sobre nivel 128)		
Pilares pantallas	m ³	70,58
Vigas	m ³	91,96
Losas	m ³	266
Nivel 1300 (sobre nivel 129)		
Pilares pantallas	m ³	53,18
Vigas	m ³	4,8
Losas	m ³	19,2

Tabla 4.9 - Metros cúbicos total edificio caso 1.

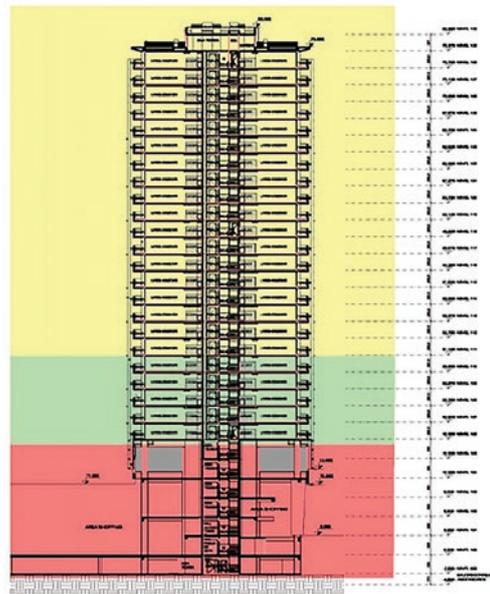


Figura 4.6 - Corte caso 1.

En una segunda etapa se tomaron en cuenta los datos obtenidos de los recaudos y entrevistas realizadas a ingenieros y arquitectos directores de obra, donde se estableció —por razones de practicidad— llenar los elementos estructurales hasta el sexto nivel con hormigón de Fck = 60 MPa, donde esta resistencia era imprescindible en pilares pero dejaba sobredimensionadas las losas.

Esto se debió a que el primer proyecto estructural no estaba diseñado con esta resistencia, y se solicitó el cambio de todos los elementos estructurales para no tener problemas en obra, como son el llenado con diferentes camiones, controles de interfase entre pilares y losas, y consecuentemente mayores controles en obra. De esta forma se pusieron de acuerdo los ingenieros calculistas, la empresa constructora y el comitente en utilizar la misma resistencia en todos los niveles. Como no es necesario una resistencia de $F_{ck} = 60$ MPa en losas, en una segunda instancia lo que se realizó en esta tesis fue bajar esta resistencia acordemente con las necesarias para losas, en donde se hiciera, como lo indica la tabla 4.10, el cálculo de las losas con resistencias de $F_{ck} = 60$ MPa y $F_{ck} = 45$ MPa pasándolas a $F_{ck} = 30$ MPa y las losas con resistencia $F_{ck} = 30$ MPa a $F_{ck} = 25$ MPa.

Torres Nuevocentro - Resumen						
Hormigones						
m ³ de hormigón por elemento estructural y por resistencia						
Situación real	Unidad	Fck = 60 MPa	Fck = 45 MPa	Fck = 30 MPa		Total
Fundaciones - patines	m ³	916,69				916,69
Pilares pantalla	m ³	632,98	606,96	1.742,32		2.982,26
Vigas	m ³	273,08	75,60	298,36		647,04
Losas	m ³	874,00	1.596,00	4.541,20		7.011,20
Total	m³	2.696,75	2.278,56	6.581,88		11.557,19
Situación hipotética	Unidad	Fck = 60 MPa	Fck = 45 MPa	Fck = 30 MPa	Fck = 25 MPa	Total
Fundaciones - patines	m ³	916,69				916,69
Pilares pantalla	m ³	632,98	606,96	1.742,32		2.982,26
Vigas	m ³	273,08	75,60	298,36		647,04
Losas	m ³			2.470,00	4.541,20	7.011,20
Total	m³	1.822,75	682,56	4.510,68	4.541,20	11.557,19

Tabla 4.10 - Metros cúbicos de hormigón según la resistencia a compresión a los 28 días de edad.

Con estas modificaciones y utilizando los costos unitarios de la empresa 3 —sin considerar el costo del hierro ya que las losas tienen cuantía mínima y no se altera el volumen de hormigón de ellas por que no cambia su espesor que

también es mínimo ya que las losas son sin vigas— se obtienen los valores de la tabla 4.11 donde se observa que se puede economizar un 5,8% el costo del hormigón en masa para las losas, realizando los cambios mencionados de Fck, o sea, no utilizando en las losas las mismas resistencias de los pilares.

Torres Nuevocentro - Resumen				
Hormigones				
Se utilizaron costos de la empresa 3				
Valores en pesos uruguayos a fecha enero de 2018				
Situación real	Unidad	Fck = 60 MPa	Fck = 45 MPa	Fck = 30 MPa
Fck = 60 MPa	2.696,75	7.488,00	20.193.264,00	73.317.332,04
Fck = 45 MPa	2.278,56	6.737,00	15.350.658,72	
Fck = 30 MPa	6.581,88	5.739,00	37.773.409,32	
Situación hipotética	Unidad	Fck = 60 MPa	Fck = 45 MPa	Fck = 30 MPa
Fck = 60 MPa	1.822,75	7.488,00	13.648.752,00	69.060.698,04
Fck = 45 MPa	682,56	6.737,15	4.598.506,72	
Fck = 30 MPa	4.510,68	5.739,00	25.886.792,52	
Fck = 45 MPa	4.541,20	5.489,00	24.926.646,80	
Diferencia entre situación real y situación hipotética				4.256.634,00
Delta favorable entre situación real y situación hipotética				5,81%

Tabla 4.11 - Costo total de hormigón en masa.

4.3.2 Caso 2. Edificio de hotel con HAD en los primeros niveles (2011)

Según REINERT et al (2015) sostienen que se pueden viabilizar pilares de menores dimensiones en edificios altos con HAD mejorando el espacio útil de los diversos niveles y aumentando la durabilidad de las estructuras. La opción por el uso de HAD puede llevar también a la reducción de elementos estructurales, variando el costo y el tiempo de ejecución de las estructuras de hormigón. Esto es aplicable al caso de estudio 2 donde se pudo haber utilizado mayor resistencia sobre todo en pilares y de esta forma prescindir de algún pilar.

En la figura 4.7 se presenta el cronograma de avance del hormigón para el caso 2.

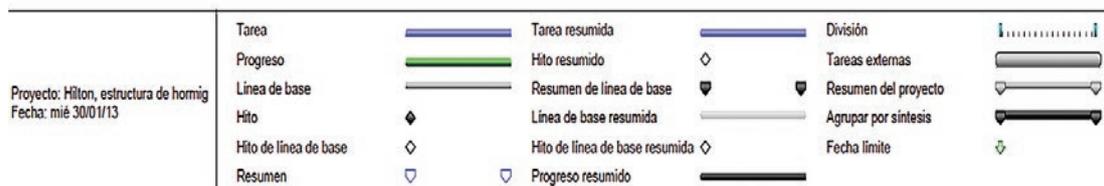
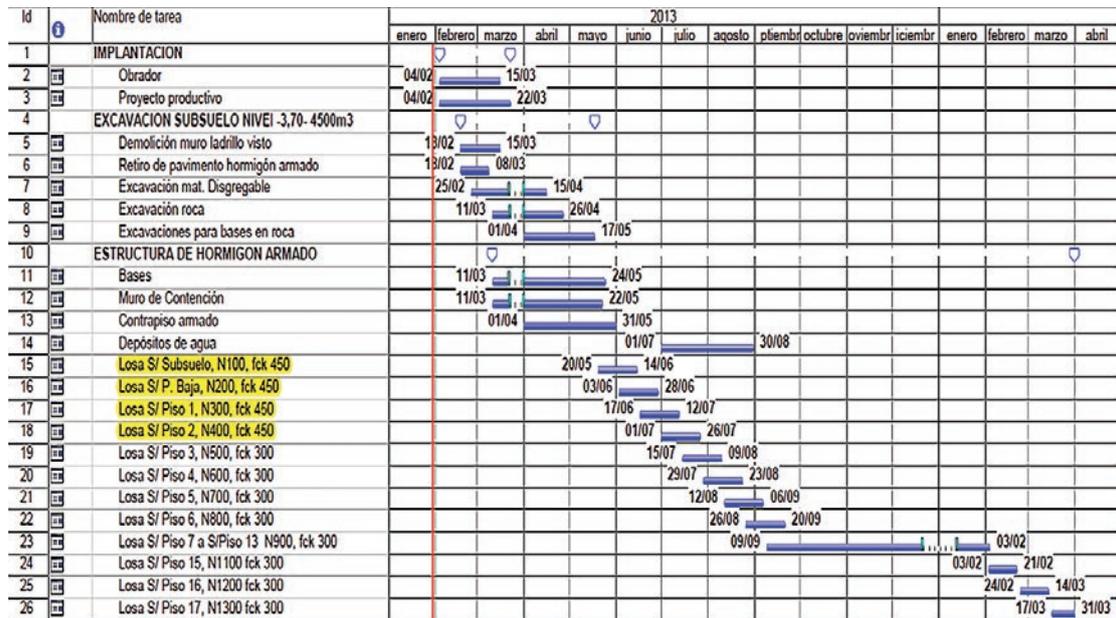


Figura 4.7 - Cronograma de avance del hormigón.

En este cronograma se ve que realizar elementos estructurales de hormigón armado con resistencia de Fck = 45 MPa no incide en los plazos de llenado y ejecución en obra en relación a los elementos estructurales realizados con resistencia de Fck = 30 MPa. Del cronograma de avance se puede ver que hasta el sobrepiso 2 los elementos estructurales fueron ejecutados con las mismas resistencias de Fck = 45 MPa y a partir del piso 2 se utilizó en los elementos estructurales resistencia de Fck = 30 MPa. Cabe observar que en este caso al igual que en el ejemplo 1 no es necesario implementar la alta resistencia del hormigón en losas, por lo que se realizará el cambio de resistencias pasando las losas de Fck = 45 MPa a Fck = 30 MPa y las realizadas con Fck = 30 MPa a Fck = 25 MPa reduciendo el costo del hormigón en un 4,3% si tan solo se usaran estas menores resistencias en losas.

Para el cálculo primero se realizó el estudio de todo el m³ de hormigón del edificio como lo indica la tabla 4.12.

Hilton / Hormigones				
Elemento estructural con diferentes resistencias	Fck = 45 MPa		Fck = 30 MPa	
Fundaciones	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad
Patines de H.A.	m ³	100	m ³	-
Pilares	m ³	30	m ³	-
Vigas y riostras	m ³	12	m ³	-
Losa subsuelo	m ³	163	m ³	-
Zapata muro de contención	m ³	23	m ³	-
Muro de contención	m ³	152	m ³	-
Niveles				
Pilares	m ³	106	m ³	166
Pantallas	m ³	131	m ³	562
Vigas	m ³	153	m ³	313
Losas	m ³	471	m ³	1404
Total	m³	1341	m³	2445

Tabla 4.12 - Cantidad en m³ de hormigón para el caso 2 hotel para las diferentes resistencias en MPa (elaboración propia).

Luego se realizaron los cambios de resistencia obteniéndose como resultado la reducción en los costos de un 4,3% de la masa de hormigón como lo indica la tabla 4.13.

Hotel - Resumen / Hormigones								
Situación real	Fck = 45 MPa		Fck = 30 MPa		Fck = 25 MPa		Total	
	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad
Fundaciones - patines	m ³	275	m ³	-			m ³	275
Pilares pantallas	m ³	267	m ³	728			m ³	995
Vigas	m ³	165	m ³	313			m ³	478
Losas	m ³	634	m ³	1404			m ³	2038
Total	m³	1341	m³	2445			m³	3786
Costos empresa 3 - situación real	UYU	9.034.317	UYU	14.031.855	UYU	-	UYU	23.066.172
Situación hipotética	Fck = 45 MPa		Fck = 30 MPa		Fck = 25 MPa		Total	
	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad
Fundaciones - patines	m ³	275	m ³	-	m ³	-	m ³	275
Pilares pantallas	m ³	267	m ³	728	m ³	-	m ³	995
Vigas	m ³	165	m ³	313	m ³	-	m ³	478
Losas	m ³	-	m ³	634	m ³	1404	m ³	2038
Total	m³	707	m³	1675	m³	1404	m³	3786
Costos empresa 3 - situación hipotética	UYU	4.763.059	UYU	9.612.825	UYU	7.706.556	UYU	22.082.440
Reducción de costos entre situación real y situación hipotética							UYU	983.732
							%	4,3

Tabla 4.13 - Reducción de costos entre situación real y situación hipotética (elaboración propia).

Otra verificación de la reducción en porcentaje del costo por cambio de resistencias en losas de Fck = 45 MPa a Fck = 30 MPa y Fck = 30 MPa a Fck = 25 MPa sería utilizando la planilla de los costos de la empresa que ganó la licitación; para ello, en la tabla 4.14 se muestran los costos de hormigones según el tipo a la fecha de licitación. Como el estudio se indica en porcentaje, no se actualiza al día de hoy el costo de la empresa constructora.

4,00	HORMIGÓN ARMADO				
4,10	FUNDACIONES				
4,11	PATINES DE H.A.	m3	91,29	11.604,02	1.059.331,28
4,12	PILARES	m3	29,22	19.808,47	578.803,36
4,13	VIGAS Y RIOSTRAS	m3	12,05	12.733,85	153.442,84
4,14	PISO SUBSUELO	m3	162,2	6.001,76	973.484,89
4,15	MUROS DE CONTENCION FCK 450	m3	152	12.116,40	1.841.862,28
4,16	RECIMENTACIÓN	No se cotiza			0,00
4,17	HORMIGON DE REGULARIZACION BAJO PATINES.	m3	18	3.746,27	67.432,78
4,18	ZAPATA MURO CONTENCION	m3	22,02	11.177,31	246.124,40
4,20	NIVELES				
4,2,1	PILARES FCK 450	m3	108	16.367,27	1.734.931,04
4,2,2	PILARES FCK 300	m3	186	15.648,04	2.597.575,01
4,2,3	PANTALLA FCK 450	m3	131	17.313,27	2.288.038,11
4,2,4	PANTALLA FCK 300	m3	582,2	15.688,69	8.820.182,98
4,2,5	VIGAS FCK 450	m3	153,2	16.388,16	2.510.865,77
4,2,6	VIGAS FCK 300	m3	313,5	16.867,59	5.287.960,53
4,2,7	LOSAS FCK 450	m3	834	11.861,99	7.520.501,66
4,2,8	LOSAS FCK 300	m3	1404	11.271,72	15.825.501,82
4,2,9	LOSAS FCK 250	m3		10.780,97	0,00
4,2,10	TANQUES SUPERIORES fck 300	m3	17	13.853,33	235.508,59
4,2,11	TANQUES INFERIORES fck 300	m3	32,01	14.237,01	455.728,85
4,2,12	ESCALERAS	m3	95	17.016,17	1.616.538,26
4,2,13	HORMIGÓN EN 2ª. ETAPA O NO ESTRUCTURALES	m3	48,3	15.159,08	701.885,45
4,2,14	ANTEPECHOS	m3	20,05	13.646,64	273.615,08
4,2,15	CANAL HORMIGON ARMADO	m3	4,8	17.002,07	78.209,52

Tabla 4.14 - Rubrado empresa constructora a fecha de licitación.

Con los valores establecidos en la tabla 4.14 se calcula cuánto se reduce el costo del hormigón armado bajando la resistencia de las losas con resistencia de Fck = 45 MPa a Fck = 30 MPa y de Fck = 30 MPa a Fck = 25 MPa, estos cálculos se muestran en la tabla 4.15.

Situación real	Fck = 45 MPa	Fck = 30 MPa	Fck = 25 MPa	Total
Losas (m³)	634	1404		2038
Costo UYU	UYU 7.520.508	UYU 15.825.888		UYU 23.346.396
Situación Hipotética (m³)		634	1404	2038
Costo UYU		UYU 7.146.448	UYU 15.136.487	UYU 22.282.935
Economía UYU				UYU 1.063.461
Economía %				4,6%

Tabla 4.15 - Hormigón armado que plantea empresa constructora.

La diferencia del costo entre los resultados de las tablas 4.13 y 4.15 del hormigón en masa y del hormigón armado es de 0,3%. Ello se debe a que la primera verificación tuvo en cuenta únicamente el componente de la masa de hormigón mientras que en la segunda se consideró el costo del hormigón armado donde están las incidencias de otros elementos como son la mano de obra y costos generales de la empresa que hacen variar el % como se indica en la tabla 4.15.

4.3.3 Caso 3. Hotel con HC Fck = 30 MPa (1986)

En este caso se realizará un estudio de costos diferente a los demás casos anteriores para obtener datos en relación a cuánto se reducen las dimensiones de pilares si se cambiara el HC utilizado en el proyecto por HAR. Se realizarán cálculos con dos resistencias (Fck = 60 MPa y 45 MPa). En ambos se estudiará la reducción en porcentaje de pilares lo que proporcionará una idea de cuánto menos hormigón se deberá utilizar con pilares realizados con HAR y cuál es la relación de costos resultante.

Para hacer este estudio se tomaron únicamente los pilares de la torre que recorren todos los niveles, dejándose de lado los pilares pantalla que componen el núcleo de ascensores y circulaciones, tal como se muestra en la figura 4.8.

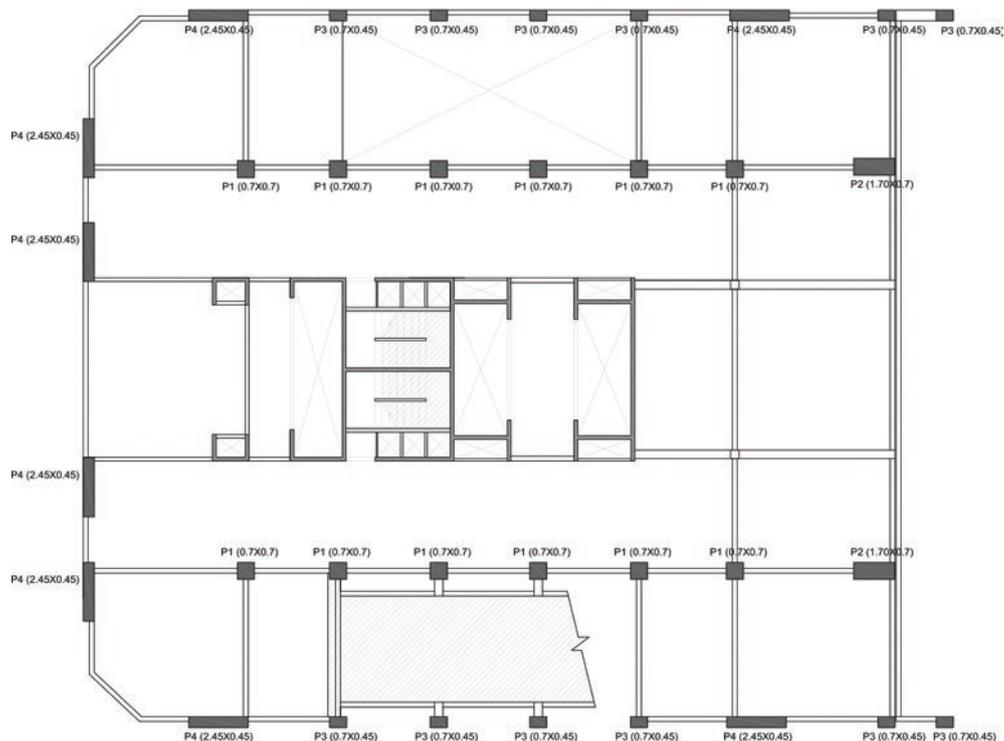


Figura 4.8 - Pilares existentes.

Se contaba con el dato de que se había utilizado HC de $F_{ck} = 30 \text{ MPa}$ y también con las dimensiones de los pilares partiendo de la ecuación 1.

$$\frac{F}{A} = \sigma$$

Ecuación 1

se logra despejar la fuerza que mediante la ecuación 2.

$$F = \sigma \cdot A$$

Ecuación 2

Con el dato de la fuerza en cada uno de los pilares y cambiando la resistencia es que se obtienen los datos del área de cada pilar para cada una de las diferentes resistencias empleadas —en estos casos $F_{ck} = 60 \text{ MPa}$ y 45 MPa —. Cabe observar que se priorizó también la forma de los mismos para su mejor disposición en planta.

En la tabla 4.16 se muestran las dimensiones de los pilares considerados para la investigación, los m^2 que ocupan por planta y también el volumen de hormigón total que llevan los mismos.

		Dimensión	m² un.	m² tot.
A	12 Pilares de	0,7X0,7	0,49	5,88
B	2 Pilares de	1,7X0,7	1,19	2,38
C	12 Pilares de	0,45X0,7	0,32	3,78
D	8 Pilares de	0,45X2,45	1,10	8,82
			m ²	20,86
	altura	81,2	m ³ totales	1.693,83

Tabla 4.16 - Volumen de hormigón total de los pilares con hormigón de resistencia a la compresión real. Elaboración propia.

Son 28 niveles con altura de promedio 2,9 m por lo que se considera una altura total de 81,2 m.

En la tabla 4.17 se muestran las reducciones logradas en las dimensiones de los pilares cuando se pasa a utilizar resistencias mayores, en este caso $F_{ck} = 60$ MPa. Se puede comparar los m^2 que ocupan por planta y también el volumen de hormigón total que llevarían los mismos.

		Caso $F_{ck} = 60$ MPa			Caso $F_{ck} = 45$ MPa	
		Dimensión	m^2 un.	m^2 tot.	m^2 un.	m^2 tot.
A	12 Pilares de	0,30 x 0,85	0,255	3,06	0,36	4,32
B	2 Pilares de	0,30 x 2,00	0,6	1,2	0,78	1,56
C	12 Pilares de	0,30 x 0,50	0,15	1,8	0,21	2,52
D	8 Pilares de	0,30 x 1,80	0,54	4,32	0,74	5,88
			m^2	10,38	m^2	14,28
	altura = 81,2 m		m^3	842,85	m^3	1159,54

Tabla 4.17 - Comparación entre hormigón de resistencia a la compresión $F_{ck} = 60$ MPa y $F_{ck} = 45$ MPa.

Con la resistencia de $F_{ck} = 45$ MPa se logra disminuir las dimensiones de los pilares, con una reducción no tan considerable como con resistencia de $F_{ck} = 60$ MPa, por este motivo se presenta en la figura 4.9 la reducción de pilares únicamente para el caso de mayor resistencia.

Del primer caso cuando se prueba con resistencia de $F_{ck} = 60$ MPa se desprende la verificación de que se podría reducir el volumen de hormigón de pilares en un 50% y del segundo caso con $F_{ck} = 45$ MPa se obtienen los datos de que la reducción de volumen es del orden del 32%.

Para poder realizar una estimación de costos de estas reducciones se toma como dato de referencia planillas de ratios hechas con obras realizadas durante los años 2010 y 2017 en Uruguay de metraje semejante a la torre estudiada, estos datos forman parte de un conjunto de ratios que se van actualizando a medida que se realizan licitaciones de edificios de este porte. Además, si las obras fueron posteriores se actualizan por índice paramétrico establecido por contrato en cada uno de los casos o de lo contrario por índice de aumento de la construcción con base en diciembre del año que se realice dicha actualización. Estos índices se encuentran publicados en la página web del Instituto Nacional de Estadística.

De estos ratios se desprende que el costo del hormigón armado para pilares oscila en el entorno de los USD 1.100 considerando los encofrados, la armadura, el hormigón, la mano de obra, el bombeado y el beneficio de la empresa constructora.

Estos costos son referidos a empresas constructoras cuando pasan el monto por la realización del rubro hormigón de forma completa.

Los valores son para hormigones de resistencias altas. Como no hay muchas obras donde se maneje $F_{ck} = 60$ MPa se tomaron datos de hormigones $F_{ck} = 45$ MPa.

Siguiendo las premisas mencionadas anteriormente es que se puede determinar que en el primer caso reduciendo el volumen de los pilares en un 50% se produciría un ahorro del orden de los USD 950.000 y en el caso de reducir los pilares 32% se lograría una reducción de USD 590.000. Estos son valores estimados a fecha enero del 2017.

En la figura 4.9 se muestra cómo se reducen los pilares con $F_{ck} = 60$ MPa, donde se observa la disminución de la sección de los pilares en planta.

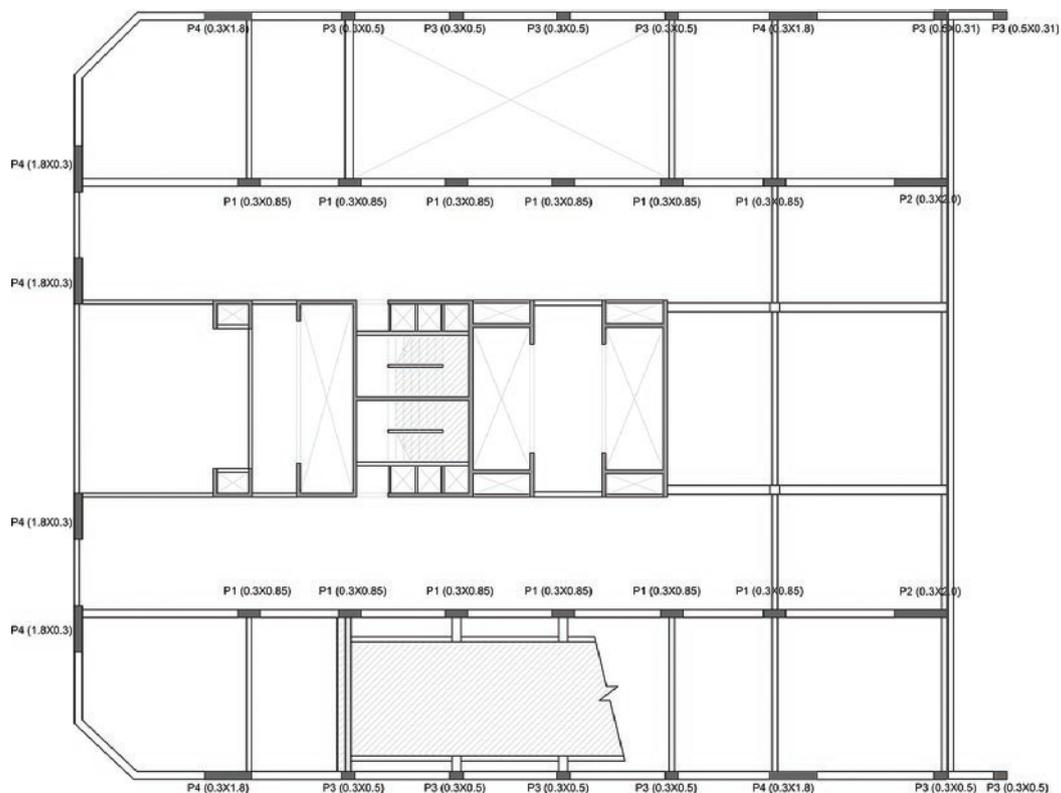


Figura 4.9 - Pilares $F_{ck} = 60$ MPa.

Para visualizar estos cambios se aisló un grupo de pilares con la resistencia existente y como quedan con la resistencia $F_{ck} = 60$ MPa como se observa en la figura 4.10.

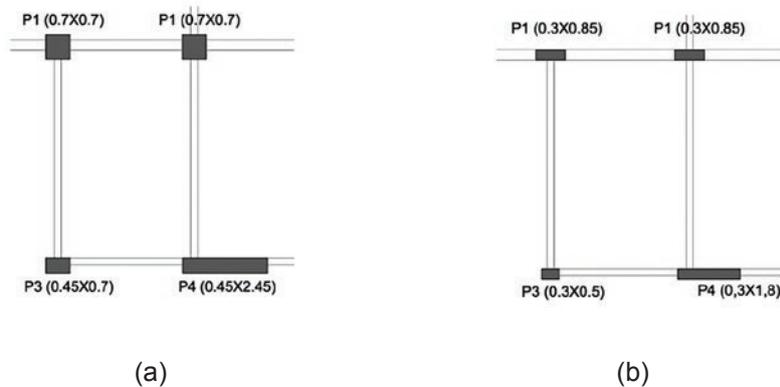


Figura 4.10 - (a) Pilares con resistencia existente $F_{ck} = 30$ MPa y (b) Pilares con resistencia $F_{ck} = 60$ MPa

Un estudio similar fue realizado por BREITENBUNCHER (1998), donde se asegura el uso de HAR en pilares para disminuir sus secciones, sobre todo en estructuras sometidas a grandes esfuerzos a compresión, como por ejemplo pilares, donde logra reducciones del 36% pasando de hormigones de $F_{ck} = 45$ MPa a $F_{ck} = 85$ MPa.

4.4 Discusión

De los resultados obtenidos en la investigación surge que la utilización del HAD es viable económicamente respecto al HC. Aun con las dosificaciones que utilizan las empresas de hormigón premezclado en Uruguay en la actualidad, se obtienen no solo mejores resultados desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista de la estética de dicho material y su incidencia en el diseño arquitectónico.

Ahora bien, dicho empleo podría ser más eficiente si las dosificaciones no fueran hechas únicamente añadiendo a la mezcla mayor cantidad de cemento. En este sentido, si la mencionada dosificación se hiciera con un estudio previo más profundo, se lograrían reducir más los costos, lo cual los haría aun más competitivos con respecto al hormigón convencional (HC) y otros materiales como son las estructuras metálicas, además de ser más ecológicos, como se describe a continuación. Esto puede apreciarse en las cotizaciones del hormigón

de alta resistencia (HAR) y hormigón autocompactante (HAC) realizados por una de las empresas consideradas (la empresa 1), las cuales son dosificaciones que resultan de investigaciones nacionales de proyectos financiados por CSIC o ANII, empleando desechos de la industria residual en la elaboración de los hormigones.

Se trabajó de forma conjunta con la empresa 1 de hormigón premezclado para la cotización de dosificaciones mencionadas en el capítulo 2, donde se obtiene un costo estimado para estas nuevas dosificaciones que logran HAR y HAC que sustituyen algunos componentes por desechos de la industria residual uruguaya.

Para HAR se estableció la siguiente dosificación para una resistencia de 600 kg/cm² con CCA (ceniza de cáscara de arroz) sin incineración controlada, en donde la sustitución de CCA por CP se da por la relación de volumen y no por el peso del material:

A/(c+CCA)	CCA	Cemento	CCA	Agregado Fino	Agregado Grueso	Superplastificante
	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
0,32	20	427	70	690	1050	0,92

Tabla 4.18 – Dosificación para HAR con CCA.

El precio suponiendo costo 0 de la CCA tanto del material como lo que lleve colocarlo en los camiones y de venta a una constructora de gran consumo es de UYU/m³ 5250 + IVA. Al día de la fecha 29/09/2017 el valor dólar es de 29,15 según BCU (Banco Central del Uruguay), siendo USD/m³ 180,10 + IVA.

Para HAC se cotizó la siguiente dosificación:

CCA %	Polvo de electrofiltro (EPF), residuo de industria de cemento	Volumen de la pasta	A/c	Cemento	CCA	Polvo de electrofiltro (EPF), residuo de industria de cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Superplastificante
	%	%		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
15	40	40	0,89	251	83	223	957	622	1,75

Tabla 4.19 - Dosificación para HAC con CCA.

Con esta dosificación se logran 25 MPa de resistencia a los 28 días, con un módulo de finura de los agregados finos de entre 1,955 y 3,563 y el tamaño de los agregados gruesos de entre 6,365 y 19 mm. El SP es una mezcla basada de policarboxilatos con un contenido de sólidos de 35% y el más bajo índice de saturación de 1%.

El precio suponiendo costo 0 de la CCA y polvo de horno (o residuo de cemento) —tanto del material como lo que lleve colocarlo en los camiones y de venta a una constructora de gran consumo— es de UYU/m³ 3500 + IVA. Al día de la fecha 29/09/2017 el valor dólar es de 29,15 según el BCU, siendo USD/m³ 120,07 + IVA.

En la tabla 4.20 se realizó un estudio comparativo en porcentaje (%) para visualizar la diferencia de costos entre los distintos tipos de hormigones para la empresa 1. Se comenzó con la comparativa entre los hormigones con un HC C20, se continuó relacionando con los HAD y se finalizó con la comparativa entre los dos HAR C60, uno con dosificación del mercado y otro con HAR C60 con CCA con incineración no controlada, dosificaciones mencionadas en el capítulo 2.

Para esta investigación es de interés recalcar la comparativa entre los HAD, debido a que el HC es mas económico que todos los HAD de mercado o de HAD con dosificaciones alternativas de acuerdo a los datos de la empresa 1.

En esta tabla se demuestra que el HAR C60 con CCA con incineración no controlada es un 9% más económico que utilizar el HAR C60 con las dosificaciones empleadas en el mercado local. Además de ser más económico favorece la utilización de materiales que son residuos de la industria; con esto se logra una disminución en la contaminación ambiental como ya se menciona en el capítulo 2.

Hormigón de alta resistencia						
Empresa 1		HC			HAD	
	Resistencia	C20	C25	C45	C60	C60 CCA
Precio/m ³	UYU	3,335.00	3,570.00	4,595.00	5,700.00	5,250.00
Diferencia con HC C20	%	0%	7%	27%	41%	36%
Diferencia con HAD C45	%			0%	19%	12%
Diferencia con HAD C60	%				0%	-9%

Tabla 4.20 - Comparativa del costo de m³ de hormigones HC y HAD para empresa 1.

Si se realiza la comparación del hormigón C60 con CCA sin incineración controlada y la comparamos con el costo del HC C25 de la empresa 3 de hormigón premezclado este resulta 4,5% más económico, además de implicar reducciones de volumen de hormigón, en cuanto no es necesaria la misma cantidad de HC que HAD, sobre todo en pilares.

Gracias al empleo del HAR se pueden lograr pilares de dimensiones menores al utilizar mayores resistencias; estos se pueden ocultar en los espesores de muros logrando que las plantas de arquitectura sean más libres y estéticas, como se puede ver en el caso de estudio 3, donde se verificó que empleando HAR el valor de hormigón de los pilares puede reducirse hasta un 50% aproximadamente en relación al empleo de HC.

Generalmente el costo de los terrenos es un peso fuerte en la ecuación económica para una inversión, por lo cual es sumamente importante aprovechar la mayor superficie del suelo, por eso se debe cuidar la dimensión de los pilares, estos deben ser los más pequeños posibles y para lograrlo se debe emplear HAR. En una primera aproximación al desarrollo de esta tesis se consideraba que el costo de los HAR era bastante mayor que el de los HC, se comprueba en esta tesis que esto depende de la empresa de hormigón premezclado que suministre el producto. Puede que sea un poco más elevado el costo pero al disminuir el volumen total de hormigón de los pilares este costo se transforma en viable y mas económico (ver capítulo 4.3.3); de hecho, si comparamos el costo de la empresa 1 para un HAR C60 con CCA de incineración no controlada con el costo del hormigón C25 de la empresa 3, el C60 de la empresa 1 se torna más económico. Esto indica que el valor del hormigón depende de la empresa que lo suministre y del volumen solicitado, lo cual permite muchas veces que bajen los costos. Hoy en día el empleo en proyectos de pilares con HC no se está tornando viable por las dimensiones que estos ocupan, el ahorro al utilizar HAR es notorio puesto que además de no ocupar área útil de suelo, se ahorra en el costo por la necesidad de menor volumen de hormigón.

Si se compara exclusivamente el costo del hormigón en masa, sin considerar la armadura, el HAD es más caro que el HC. Ahora bien, utilizando el HAD con todos los requerimientos que implica —la ejecución y puesta en obra, el control con ensayos de las dosificaciones, el traslado del hormigón premezclado a la obra, el vertido del hormigón en los encofrados y por último, su correcto curado— se logra una mejora de los costos, ya que al permitir reducir la

sección de pilares y por ende el volumen total de hormigón utilizado se reducen todos los materiales que integran el hormigón armado.

No se puede dejar de mencionar que el HAD en nuestro país es ejecutado con los mismos criterios que el HC, sin tomar las precauciones necesarias en el curado, lo que también puede ocasionar problemas en las edificaciones a futuro que pueden generar sobre costos por reparaciones que no están considerados en esta tesis de Maestría.

Además de lo mencionado líneas arriba también se generan sobrecostos por el empleo de HAD en elementos estructurales que no lo requieren, como vigas y losas, que no son estudiados en esta tesis pudiendo ser objeto de estudio en otras investigaciones.

Si bien podemos concluir que la utilización del HAC es viable en Uruguay este es actualmente utilizado de manera incorrecta, por la falta de conocimiento sobre el mismo. En este sentido, surge de los estudios realizados para esta tesis que el HAC no es utilizado como tal en nuestro país.

A los efectos de ilustrar esto con un ejemplo, se pudo relevar que las empresas de hormigón premezclado comercializan un hormigón al cual denominan “autocompactante”, que resulta ser un hormigón hiperfluido, pero que no cumple con las características de la autocompactabilidad, así como tampoco se realizan los ensayos correspondientes, por lo que en definitiva, no cumple con las características de un HAC. Las empresas de hormigón premezclado entrevistadas para la presente tesis mencionaban que para este producto se necesita utilizar el vibrado, lo cual no sería necesario si se empleara una dosificación correcta de HAC, siendo justamente una de las características principales del HAC el no necesitar vibrado.

De esta investigación surge que se podría evaluar la relación entre los costos elevados del HAC y la incorrecta utilización del mismo. A efectos de reducir estos costos y lograr una correcta autocompactabilidad sería necesario evaluar diferentes dosificaciones y ensayos, tales como los que mencionan RODRIGUEZ, RODRIGUEZ, AGUADO (2015) para mezclas de HAC. Dichos autores desarrollan un método de dosificación y realizan un análisis comparativo de los resultados obtenidos con el método propuesto por ACI (2007) como se muestra en las tablas 4.21 y 4.22 así como en la figura 4.11, donde las dosificaciones 1 a 7 son las realizadas con el método propuesto en el trabajo mencionado.

Proporciones de mezcla											
Proporciones	a/p	Contenido de pasta (%)	PC (kg/m ³)	Adición (kg/m ³)	Polvo (kg/m ³)	a(tot) (kg/m ³)	a/c	Agregados gruesos (kg/m ³)	Agregados finos(kg/m ³)	SP	
										(%)	(kg/m ³)
4	0,36	40	588,88	212	588,88	212	0,36	724,50	724,50	0,30	5,89
5	0,36	40	588,88	212	588,88	212	0,45	724,50	724,50	0,35	4,71
ACI3	0,36	40	500,00	201	500,00	201	0,40	923,00	615,00	1	9,29

Tabla 4.21 - Dosificación ACI, (2007).

Resultado en estado fresco y endurecido								
Proporciones	Diámetro de flujo (cm)	Envudo V TI (s)	Caja L H2/H1	Resistencia a la segregación (%)	Contenido de aire v/v (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	Permeabilidad de aire Kt(10 ⁻¹⁶ m ²)	Resistencia eléctrica (k Ω -cm)
4	64,00	7,34	0,83	13,33	2,80	48,70	0,005	11,1
5	70,30	5,48	1,00	11,28	2,30	42,90	0,005	8,0
ACI	75,00	6,13	0,94	13,20	0,50	41,86	0,005	15,0

Tabla 4.22 - Resultado en estado fresco y endurecido, ACI (2007).

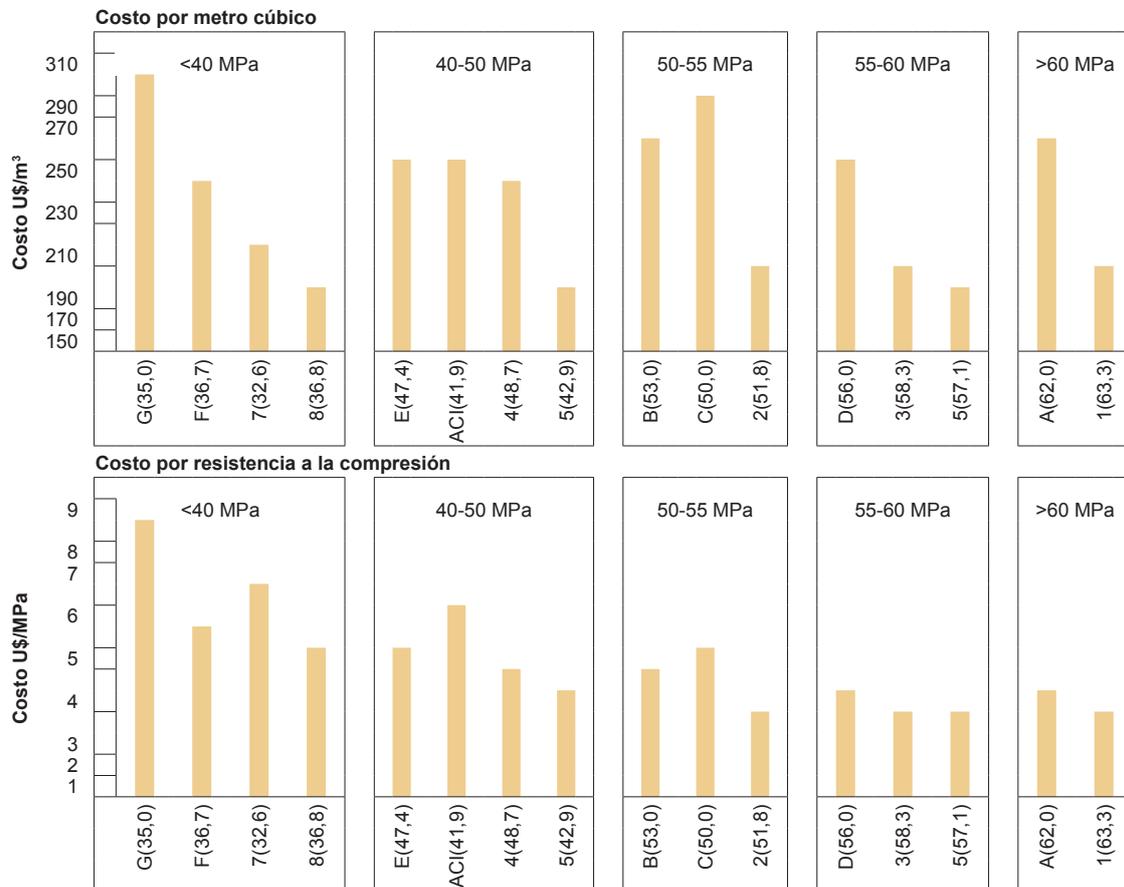


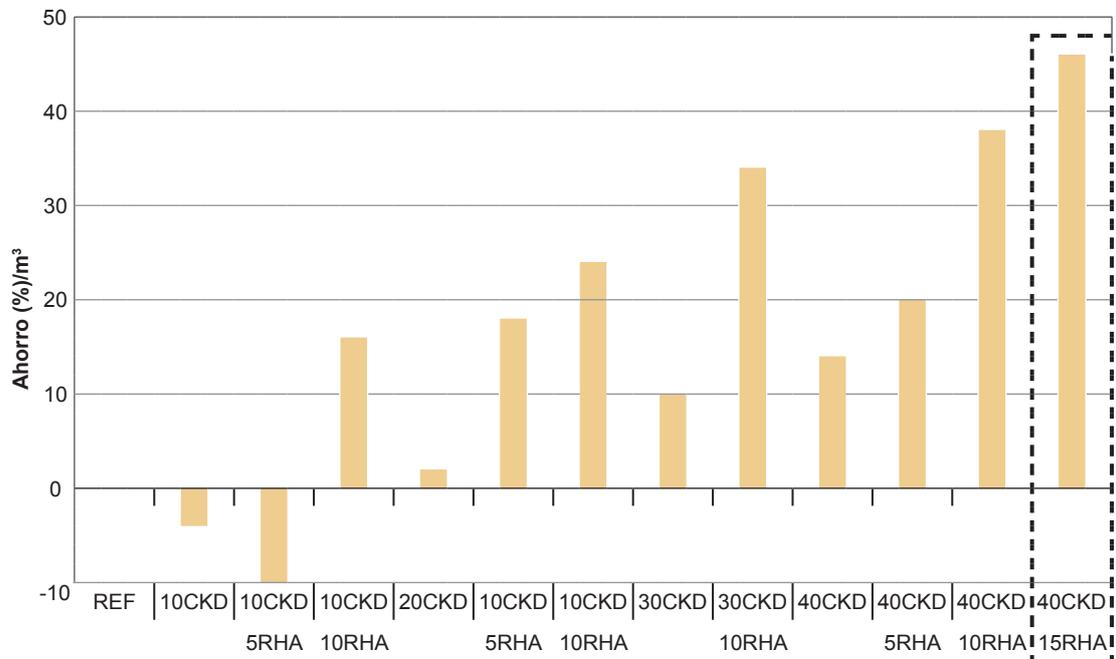
Figura 4.11 - Costo de HAC para diferentes resistencias.

El rango de resistencia a compresión obtenido con el método propuesto está entre 30 y 65 MPa obteniéndose costos más bajos en relación con el ACI. Asimismo, con las dosificaciones propuestas por RODRIGUEZ et al (2016) indicadas en la tabla 4.23, es posible obtener ahorros.

Nombre	P	W/C	C	RHA	CKD	Fagg	SP	T 50	D	L	TGM	T1	FC
	%		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	seg	cm	box	%	seg	MPa
REF	40	0,40	557	0	0	957	1,25	0,40	71	0,94	14	3	35,8
10CKD	40	0,50	445,5	56	56	957	1,25	0,80	72	0,97	12	3	33,1
10RHA													
40CKD	40	0,89	251	83	223	957	1,75	0,70	68	0,88	3	3	24,7
15RHA													
20CKD	42	0,50	467	0	117	916	2,36	0,50	74	0,95	7	3	35,9
30CKD	42	0,57	409	0	175	916	1,00	0,60	72	1	13	2,5	28,8
40CKD	42	0,67	351	0	234	916	1,00	1,10	76	1	20	2	24,1

Tabla 4.23 – Dosificación y propiedades para HAC a los 28 días.

Las economías que se logran se indican en la figura 4.12. Se observó que se obtiene un ahorro cuando se sustituye más del 20% del cemento y un ahorro significativo cuando se utilizan dos adiciones como lo son el polvo de horno y la ceniza de cáscara de arroz.



Ahorro de costo (%) por m³, con 40% de contenido de pasta en relación a la referencia (ref)

RHA = Ceniza de cáscara de arroz

CKD = Polvo de horno

Figura 4.12 - Ahorro de costo (%) por m³.

Con respecto a los casos de estudio 1 y 2 se puede fundamentar que no se tenía un control especial para los HAR, salvo el control para llegar a las resistencias proyectadas, donde se marcaba el camión que llenaba, la cantidad de piezas con ese hormigón, y en el caso que las probetas indicaran que no se llegara a la resistencia esperada estas piezas se encamisaban. Esto sucedió en algunos pilares, donde la resistencia característica lograda no llegó a la proyectada de $F_{ck} = 60 \text{ MPa}$ y gracias al encamisado de 7 cm aproximadamente se lograba salvar el problema de no llegar con la resistencia solicitada.

De lo expuesto surge que en nuestra industria es difícil que se empleen correctamente las altas resistencias donde realmente son necesarias, como por ejemplo, en pilares; se prefiere por practicidad llenar todos los elementos estructurales con las mismas resistencias. Esto, además de encarecer los costos, hace que las losas trabajen con esfuerzos mayores a los necesarios, pudiéndose evitar con la utilización para cada elemento estructural resistencias de hormigón diferentes, y no hacer que las losas estén sobredimensionadas. Las dificultades que genera en obra el llenado de pilares, vigas y losas con diferentes resistencias son menores si se las compara con las patologías generadas por las retracciones de las losas que tienen resistencias por encima de las que realmente necesitan. Al ser tratados los hormigones como HC —sobre todo losas—, se descuida la relación agua cemento lo que puede generar problemas que no serán estudiados en esta tesis. En cuanto a la construcción en nuestra plaza es en ciertos aspectos una industria conservadora, los cambios —sobre todo por diferentes tecnologías— tienden a darse lentamente; esto preocupa porque si bien se utilizan los HAR, no se emplean de forma correcta.

Tanto en el caso de estudio 1 como en el 2 habría que tener en cuenta que no solo se reducirían los costos por dejar de utilizar HAD en las losas donde no es necesario, sino que se evitarían problemas patológicos a futuro por emplear un hormigón de mayor resistencia que la necesaria donde, para llegar a la mayor resistencia, se aumenta el contenido de cemento, con el consiguiente aumento de las retracciones y la fisuración de las losas.

Finalmente, en el estudio realizado se observó que no existe formación adecuada en todos los niveles de las personas que integran los equipos de trabajo que desempeñan tareas de obra en relación a la realización de proyectos de obras arquitectónicas que empleen HAD. Los ingenieros calculistas requieren la utilización de HAD en los recaudos gráficos y escritos, no obstante lo cual, este material es trabajado en obra como un HC. Los profesionales involucrados en la industria de la construcción hoy no reciben formación específica a nivel de

grado sobre la utilización del HAD, por lo que el conocimiento sobre este material y la técnica asociada a su correcta puesta en obra y utilización dependen del acceso a formación de postgrado, lo que reduce significativamente el número de profesionales en plaza con conocimientos sobre la materia. A nivel del personal obrero, este trabaja el hormigón de forma tradicional; la adquisición del conocimiento por parte de dicho personal se produce en obra, adquiriendo la técnica del oficio mediante la observación de otros, a veces con reticencia por parte de aquellos que dominan el oficio a transmitir su “saber” (es común escuchar en obra que el oficio “se roba”), no existiendo una instancia de aprendizaje formal en relación a los oficios de la industria.

La mencionada cascada de transmisión del conocimiento en obra, es de por sí conservadora, en cuanto el aprendizaje del oficio se realiza mediante la observación del similar más experimentado, proceso que puede retrotraerse quizás hasta la primera generación de trabajadores emigrantes que sentaron las bases de esta industria, en otro siglo.

Las características de la formación del personal de la industria de la construcción dificultan a la innovación en los procesos constructivos, y específicamente dentro de estos, a la utilización correcta del HAD. Como señalamos en el párrafo anterior, esto es así en cuanto el profesional de grado necesariamente debe acudir a un curso de postgrado o maestría para acceder a este conocimiento, y con respecto al personal de obra, este ni siquiera cuenta con una instancia formal de aprendizaje, quedando librado a la adquisición del oficio por imitación en el frente de trabajo, por lo que quizás esté repitiendo gestos profesionales propios de otro siglo. Dejamos señalado aquí el desafío ante el cual se encuentra la construcción como industria, si desea incorporar a las obras el HAD con todo su potencial.

5. Conclusiones y sugerencias para futuras investigaciones

En este capítulo se desarrollan las conclusiones del presente trabajo, las principales aportaciones realizadas y algunas de las futuras líneas de investigación que podrían derivar del mismo.

5.1 Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis de Maestría es estudiar la viabilidad de los costos del HAD en el medio uruguayo. A continuación, se presentan las conclusiones más importantes que se extraen de ella.

Como surge de los casos de estudio 1 y 2 desarrollados en el capítulo 4 de esta tesis, la utilización del HAR no se realizó con diferentes dosificaciones según lo requerido por los distintos elementos estructurales del edificio, sino que por el contrario, se empleó siempre la misma dosificación para todos estos, a saber, aquella de mayor resistencia.

Considerando lo expuesto en los capítulos 2 y 4, esta no es la solución más eficiente, en cuanto, por ejemplo, no es necesario emplear la misma resistencia en losas que en pilares (ver casos de estudio 1 y 2). No obstante lo señalado, esta solución es frecuentemente adoptada en la industria local —como surge de las entrevistas mencionadas en el capítulo 4— empleando en todas las piezas estructurales las mismas dosificaciones y resistencias bajo la premisa de una mayor practicidad en obra al momento de ejecutar el llenado de los elementos estructurales (pilares, losas, vigas).

Tal como surge de los casos 1 y 2 (ver tablas 4.11 y 4.13), utilizando en losas y vigas un hormigón de menor resistencia que el empleado en pilares, se obtienen ahorros en los costos totales del volumen del hormigón cuyo orden de magnitud es del 5%, por lo que podemos concluir que considerando las dosificaciones y

resistencias correctas para cada elemento estructural, los costos del empleo del HAD son viables.

En cuanto al caso de estudio 3, de este surge que al sustituir los pilares de HC de la estructura de hormigón del edificio por pilares de HAD, se genera una reducción del volumen de hormigón para resistencias de $F_{ck} = 60$ MPa y $F_{ck} = 45$ MPa de un 50% y 32% respectivamente, bajando en consecuencia los costos del hormigón en una magnitud importante.

Esto es así ya que la utilización de HAR en los elementos estructurales implica reducciones significativas en su sección, por lo cual, en la misma proporción que se reduce la sección de dichos elementos estructurales, se reduce el volumen de hormigón empleado en los mismos. Aun cuando el costo por m^3 del HAD es mayor que el del HC, la mencionada reducción de la sección de los elementos estructurales obtenida al utilizar HAD permite disminuir el volumen de hormigón, y de esta manera, obtener una rebaja en el costo.

En función de lo expuesto sobre este estudio de caso, es posible concluir que empleando una correcta dosificación del hormigón en pilares, la utilización de HAR implica menor costo en comparación con la utilización de HC, y por tanto, resulta viable su empleo desde el punto de vista de los costos.

Asimismo, como se desarrolló en el capítulo anterior, en el HAD es factible la utilización de materiales alternativos tales como la CCA residual, modificando las tradicionales dosificaciones empleadas por las empresas que ejecutan el hormigón premezclado en el medio uruguayo de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 2. Con ello se podría obtener entonces la consiguiente reducción en sus costos y un impacto ambiental positivo causado por la utilización de materiales alternativos que pueden provenir de residuos acondicionados y tratados adecuadamente para su empleo en la industria de la construcción.

En relación a la viabilidad técnica del empleo del HAD en obra, en los casos de estudio 1 y 2 se constató que los HAR recibieron un tratamiento en obra muy similar al tratamiento que se le dispensa habitualmente al HC. Esto trae como consecuencia inconvenientes técnicos que pueden derivar en futuras imperfecciones que den lugar a patologías, en tanto los HAR no fueron tratados como HAD.

Lo expresado en el párrafo anterior explica porqué las características de los HAR y el HAC ejecutados y comercializados en el medio uruguayo no logran llegar a los estándares de los HAD, al ser tratados en obra como HC.

En los HAR de los casos de estudio de esta tesis la puesta en obra fue similar a los HC, detectándose además que el HAC es hormigón hiperfluido y no autocompactante, habiendo grandes diferencias entre la calidad de los hormigones que se comercializan como HAC dependiendo de la empresa de hormigón premezclado que lo suministre.

Finalmente, relevamos como una expresión reiterada en las entrevistas realizadas a directores de obra y jefes de obra para los casos de estudio 1 y 2, la falta de técnicos y personal operativo formado en el área del HAD y específicamente en su puesta en obra, así como la necesidad de incorporar nuevas generaciones de profesionales y técnicos con una formación adecuada en la materia, insumo necesario para la correcta implementación del HAD en nuestro medio.

5.2 Sugerencias para futuras investigaciones

Los trabajos de investigación contribuyen a despejar algunas incógnitas sobre el tema tratado, pero de forma simultánea generan nuevas preguntas, nuevas ideas y/o abren nuevas líneas de trabajo en esta temática. En este apartado se presentan algunas sugerencias de investigación que pueden ser objeto de interés, atendiendo al trabajo expuesto en esta tesis:

- En tanto no fue incluido en el objetivo de esta investigación, no se estudió la eventual reducción de costos generada por la utilización de losas sin vigas con HAD. Hoy en día es un hecho relevante en la práctica que las losas sin vigas con HAD están generando problemas de flechas excesivas, por lo que sería interesante saber cómo se debe emplear HAD en ellas y cuál es la diferencia de costos que se tiene con el HC.
- Los HAC se utilizaron en nuestro país primeramente para reparaciones, por lo cual para futuras investigaciones se puede estudiar el empleo de este tipo de hormigones y hacer una evaluación económica para su uso en obras de arquitectura.
- Estudiar los sobrecostos causados por el empleo de HAD en elementos estructurales que no lo requieren, como vigas y losas.
- Evaluar la relación entre los costos elevados del HAC y la incorrecta utilización del mismo, a los efectos de reducir los costos de los HAC que son hoy en día más onerosos debido a la utilización de grandes cantidades de aditivos en lugar de la optimización del esqueleto granular y el empleo de fillers diferentes al cemento portland.

Referencias bibliográficas

ACEVEDO, E. (1905). La enseñanza universitaria en 1904. Editorial El siglo ilustrado. Montevideo, Uruguay.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1998). Guía para la selección de las proporciones de hormigón de alta resistencia con cemento portland y cenizas volantes. Comité 211.4R-98. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2000). High Strength Concrete. Comité 363, pp 79-80. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2000). Cement and Concrete Terminology. Comité 116R-00. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2001). State-of-the-art report on highstrength concret. Comité 363-R92, p55. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2001). Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. Comité 290-R92, p10. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2007). Consolidating Concrete, Comité 237R-07. Detroit, Estados Unidos.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2010). High Strength Concrete. Comité 363-R10. Detroit, Estados Unidos.

AGRINATI, G. (2008). Estudio sobre la aplicabilidad de los modelos de cálculo de la fluencia y retracción al hormigón autocompactable. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

AITCIN, P.C. (1998). High Performance Concrete. Editorial E&FN Spon. Londres, Inglaterra.

AITCIN, P.C. (2000). Concreto de alto desempenho. Editorial Pini. São Paulo, Brasil.

ALMENDRA FREITAS, J. (2005). Estudio Comparativo de Métodos de dosagem para concretos de alta resistencia com o uso de materiais disponiveis na Região Metropolitana de Curitiba. Tesis de Maestría. Programa de pos-graduação em construção civil. Universidad Federal do Parana. Curitiba, Brasil.

ÁLVAREZ, J. (2014). Hormigón autocompactante con nanoadiciones y fibras. Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

BALLARD, G. Y REISER, P. (2004). The St. Olaf College Fieldhouse Project: a Case Study in Designing to Target Cost. Helsingor, Dinamarca.

BALZAMO, H.; BASCOY, D.; BONAVETTI, V.; CABRERA, O.; CARRASCO, M.; CLARIÁ, M.; DI MAIO, A.; EPERJESI, L.; CHECMAREW, R.; FORNASIER, G.; IRASSAR, E.; LÓPEZ, R.; MALDONADO, N.; OSHIRO, A.; RAHHAL, V.; SOTA, J.; TRAVERSA, L.; ZEGA, C.; ZERBINO, R. (2012). Ese material llamado hormigón. Editoras: Noemí G. Maldonado, María F. Carrasco. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires, Argentina.

BASF, Construction Chemichals España (2009). Hormigón autocompactante. Documento publicado en el mes de julio. España. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/206654045/Hormigon-Autocompactante-PDF>, accedido 12/02/2014.

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. (1982). Qualitative research for education: an introduction to theory and methods. Alyn and Bacon. Boston, Estados Unidos.

BREITENBUCHER, R. (1998). Developments and applications of high-performance concrete. Publicación Materials and Structures, vol. 31, pp 209-215. RILEM. París, Francia.

BRUNO KLESS, C. (2016). Notas del Consejo Profesional de Arquitectura y Urbanismo. Revista N° 32, p.37. Buenos Aires, Argentina.

BURON, M.; FERNANDEZ, J.; CARRIDO, L. (2006). Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización. Ediciones IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones). Madrid, España.

CAÑIZARES, I. (2012). Diseño de mezclas de hormigón autocompactante utilizando materiales de la zona. Tesis de Maestría. Centro de Posgrados de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

CAVIGLIA, J. (2005). Análisis de costos y presupuestación de obras. Sexta Edición. Montevideo, Uruguay.

CHANDÍAS, M. (2006). Cómputos y presupuestos. Editorial Alsina, Buenos Aires, Argentina.

CHETTY, S. (1996). The Case Study Method for Research in small –and medium– sized firms. International Small Business Journal, volume 5. Estados Unidos.

COSTA, D. (2003). Diretrizes para concepção, implementação e uso de sistemas de indicadores de desempenho para empresas da construção civil. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Brasil.

CREMADES, S. (2011). Diseño de mezclas de hormigón autocompactante utilizando materiales de la zona. Tesis de Maestría. Centro de Posgrados de la Facultad de Ingeniería. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

DAL MOLIN, D.; VIERIA, F.; WOLF, J.; (2007). Hormigón de alta resistencia. ABCP, CD Concreto de Alto Desempenho. São Paulo, Brasil.

DE LA PEÑA, B. (2000). Propiedades de uso del hormigón autocompactante. Revista Ingeniería de Construcción, vol. 15, núm. 2. Santiago de Chile, Chile.

FROESE, T. (2015). Cost Estimation of High-Performance Concrete (HPC) High-Rise Commercial Buildings by Neural Networks. University of British Columbia. Vancouver, Canadá.

GIL, A. (2002). Cómo elaborar Proyectos de Pesquisa. 4ª Edición, Atlas. São Paulo, Brasil.

GÓMEZ HERMOSO, J. (1998). El hormigón de alta resistencia en la edificación. Tipología estructura. Revistas CSIS Informes de la construcción, vol. 50, núm. 455. España.

GUIMARÃES, F. (2000). CAD: mais que duravel, um grande negocio. Revista Ibracon. Brasil.

GUTIÉRREZ HIDALGO, F. (2005). Evolución histórica de la contabilidad de costos y gestión (1985-2005). Revista española de Historia de la contabilidad. De Computis, núm. 2. España.

HELENE, P. (1997b). Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. En Conferencia ANTAC, Durabilidade das Construções, pp. 31-42. Porto Alegre, Brasil.

HERNÁNDEZ, R.; FERNÁNDEZ, C.; BAPTISTA, P. (2006). Metodología de la Investigación. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Cuarta edición, México.

INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO (ICPA) (2000). Hormigón de Alto desempeño para estructuras. Informe técnico 11, p.1. Disponible en <http://www.icpa.org.ar/index.php>, accedido 15/02/2015.

INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO (ICPA) (2000). Hormigón con retracción compensada para un gran piso industrial. Revista Cemento, año 6, núm. 26. Disponible en <http://www.icpa.org.ar/index.php>, accedido 20/03/2015.

JIMÉNEZ MONTOYA, P; GARCÍA MESSEGER, A.; MORÁN CABRE, F.; ARROYO PORTERO, J.C. (2009). Hormigón armado. Editorial Gustavo Gili, Edición 15. Barcelona, España.

JOHNSON, H. Y KAPLAN, R. (1988). La contabilidad de costes. Editorial Plaza & Janés. España.

LAPORTA, R. (2003). Y después de la determinación del costo, ¿qué?. Principales aplicaciones derivadas de la información del costo. Facultad de Ciencias Empresariales, Universidad Católica. Montevideo, Uruguay.

LUNA, C. (2010). Propuesta para la elaboración de presupuesto por medio de una metodología estructurada y herramientas de cómputo, como opción alternativa al software existente, para su uso en la Dirección General de Ingenieros de la Secretaría de la Defensa Nacional. Tesis de Maestría en Ingeniería con especialidad en la Administración de la Construcción. Departamento de Arquitectura, Urbanismo e Ingeniería Civil. Universidad Iberoamericana. México DF, México.

MARTÍNEZ, D. (2008). Hormigones de altas prestaciones, E.U. de Ingeniería Técnica Civil, Arquitectura Técnica. Universidad Politécnica de Cartagena. España.

MARTÍNEZ, P. (2006). El Método de estudio de caso. Estrategia metodológica de la investigación científica. Artículo Pensamiento y gestión, publicado para Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.

MARTINS, I.; BARBOSA M.; LAZARI R.; SALES F. (2004). Otimização dos materiais para a composição do hormigón de alto desempenho. Ibracon, p.15. San Paulo, Brasil.

MASCARO, J.L. (2004). O Custo das Decisões Arquitetónicas. Edición 3, p.9, Editorial Masquatro. Porto Alegre, Brasil.

MATTOS, A.D. (2006). Como preparar orçamentos de obras. Editorial Pini. São Paulo, Brasil.

MEHTA, P.K. (1999). Advancements in Concrete Technology. Revista Concrete International, vol. 21, núm. 6, pp. 69-76. Estados Unidos.

MEHTA, P.K.; AİTCIN, P. (1990a). Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete. In: HSC International Symposium On Utilization On High Strenght Concrete, 2, Berkeley. California, Estados Unidos.

MEHTA, P.K.; AİTCIN, P. (1990b). Principles Underlying Production for High Strength Performance Concrete. Cement, Concrete & Aggregates vol. 12, núm. 2, pp. 70-78. Detroit, Estados Unidos.

MEHTA, P.; MALHOTRA, V. (1987). Pozzolaníc and Cimentitious Materials. Supplementary Cementing Materials of Canadian Governments Publishing Centre. Ottawa, Canadá.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. (1994). Hormigón, Estructura, Propiedades e Materiais. Editorial Pini. São Paulo, Brasil.

NEVILLE, A. (2002). Creep of Concrete and Behavior of Structures. Journal ACI Concrete International. Detroit, Estados Unidos.

NEVILLE, A. (2006). Concrete: Neville's insights and issues. Editorial Thomas Telford Ltd. London, UK.

NEVILLE, A; AİTCIN, P. (1999). Hormigón de Alto Desempeño. IMCYC Instituto Mexicano del Cemento y del Hormigón. Disponible en <http://www.imcyc.com/revista/1999/dic99/hormigón1.htm>, accedido el 25/03/2015.

NOGUERA, M.; RINCÓN DE PARRA, H. (2008). ¿Cómo determinar costos en la industria de la construcción? Estudio de un caso. Parte II: líneas maestras para la acumulación y determinación de los costos de producción. Artículo ISSN 1317-8822, año 7, núm. 1, enero-junio, pp. 126-144.

OKAMURA, H. (1997). Self-compacting high-performance concrete. Concrete International 19. American Concrete Institute (ACI), pp. 50-54. Detroit, Estados Unidos.

PAZARCEVIREN, S.; CELAYIR, D. (2013). Target costing based on the activity-based costing method and a model proposal. Diario Europeo Scientific. Estambul, Turquía.

PETRUCCI, E. (1971). Hormigón de Cimento Portland. Editorial Globo. Porto Alegre, Brasil.

REINERT, M.; SEELBACH, L.; ROHDEN, A.; DAL MOLIN, D. (2015). Estudio comparativo entre o hormigón de alto desempenho e o hormigón convencional na estrutura de um edificio de 20 pavimentos com núcleo rígido. 57 Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015, IBRACON. Brasil.

RODRÍGUEZ, G.; RODRÍGUEZ, I.; AGUADO, A. (2015). Simple and Rational Methodology for the Formulation of Self-Compacting Concrete Mixes. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001375. American Society of Civil Engineers. Estados Unidos.

RODRÍGUEZ, G.; RODRÍGUEZ, I.; ROLFI, R.; AGUADO, A. (2016). Dosage of economic self-compacting concrete with low and medium compressive strength. II International Conference on Concrete Sustainability ICCS16, Instituto de la Construcción (IC), Instituto de Ensayo de Materiales (IEM), Universidad de la República (UDELAR), Montevideo, Uruguay y Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports UPC-BarcelonaTech, Barcelona, España.

RODRÍGUEZ, G.; ROMAY, C.; SABALSAGARAY, B.; COSTA, F.; RODRIGUEZ, S.; BENITEZ, A.; DALCHIELE, E. (2013). Valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz, Proyecto FPTA-285 valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo, Uruguay.

RODRÍGUEZ, G.; SABALSAGARAY, B.; CABRERA, J.; MARZIOTTE, L.; ROMAY, C. (2006). Especificaciones y recomendaciones para aplicación de los hormigones autocompactantes. Instituto de Ensayos de Materiales, Facultad de Ingeniería, UDELAR. Montevideo, Uruguay.

RODRÍGUEZ, G.; SABALSAGARAY, B.; ROMAY, C.; CABRERA, J. (2007). Durability of concretes with residual rice-husk ash. Congreso: Concrete: Construction's Sustainable Option. UDELAR. Montevideo, Uruguay.

SKARENDAHL, Å.; PETERSSON, Ö. (2000). Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art report, Technical Committee 174- SCC. RILEM. París, Francia.

STASIOWSKI, F.A. (1999). Value Pricing. Estimación de costes y fijación de honorarios para empresas de proyectos. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, España.

SUÁREZ SALAZAR, C. (2005). Costo y tiempo en edificación. 3ra. Edición, Editorial Limusa. México DF, México.

UNIT 1035 (1998). Materiales puzolánicos. Determinación de actividad puzolánica. Índice de actividad puzolánica con cemento. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT).

UNIT 1047 (1999). Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT).

UNIT 1050 (2005). Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT).

UNIT 1081 (2002). Procedimiento para la preparación y curado de probetas. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT)

UNIT 20 (2017). Cementos pörtland para uso general. Definiciones y requisitos. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT).

UNIT-ISO 679 (2009). Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas, ISO 679:2009 (MOD). Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT).

UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA (UPC) (2015). El hormigón biológico desarrollado en la UPC, premiado a Construmat. Barcelona, España. Disponible en <http://www.upc.edu/saladeprensa/al-dia/mes-noticies/el-hormigon-biologico-desenvolupado-en-la-upc-premiado-a-construmat>, accedido 26/06/2015.

VALCUENDE, M. O; PARRA, C.; JARQUE, J. (2007). Homogeneidad de los hormigones autocompactantes. *Materiales de Construcción*, vol. 57, núm. 287. ISSN: 0465-2746. España.

VILANOVA, A. (2009). Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

WU, C.; BUYYA, R. (2015). *Cloud Data Centers and Cost Modeling. A Complete Guide To Planning, Designing and Building a Cloud Data Center*. Ed. Morgan Kaufmann. Waltham, Estados Unidos.

YIN, R. (1994). Investigación sobre estudio de casos. Diseño y métodos. *Applied Social Research Methods Series*, vol. 5. International Educational and Professional Publisher. London, UK.

YIN, R. (2001). *Estudo de caso: Planejamento e Metodos*. Bookman, segunda edición. Porto Alegre, Brasil.