



Desarrollo de un Hormigón de Alto Desempeño a Escala Industrial

Autor:

Anyela Magdalena Molina Terra

Programa: Maestría en Ingeniería Estructural

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay

2025

Desarrollo de un Hormigón de Alto Desempeño a Escala Industrial

Autor:

Anyela Magdalena Molina Terra

Tesis presentada con el objetivo de obtener el título de Magíster en
Ingeniería Estructural en el marco del Programa de Maestría en
Ingeniería Estructural

Director de Tesis y Académico:

Prof. Dr. Ing. Luis Segura Castillo

Montevideo, Uruguay

2025

Molina Terra, Anyela

Desarrollo de un Hormigón de Alto Desempeño a Escala Industrial / Anyela Molina Terra. – Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2025.

1, 189 p.

Director:

Luis Segura Castillo

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa de Ingeniería Estructural, 2025.

Referencias Bibliográficas: p. 172 – 179.

1. HAD, 2. Producción Industrial, 3. Alta resistencia, 4. Durabilidad, 5. Bombeo.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Ing. Prof. Gonzalo Cetrangolo

Dr. Arq. Prof. Gemma Rodríguez

Dr. Ing. Prof. Antonio Figueredo

Dedico esta tesis a mi gran compañera y referente Iliana Rodríguez, a quién admiro y agradezco el compromiso, el acompañamiento y la motivación durante todo el proceso.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Luis Segura, quien, además de desempeñar el rol de director académico y de tesis, fue el responsable del proyecto de hormigón de alto desempeño. Gracias a él, tuve la oportunidad de liderar, investigar y aprender como encargada del proyecto. Su confianza, motivación y sabiduría fueron esenciales para mi crecimiento personal y profesional.

A mi compañera y referente, Iliana Rodríguez, por su invaluable dedicación. Su apoyo constante, su conocimiento y su contención fueron fundamentales a lo largo de este proceso.

A la división Hormigones de la empresa Cementos Artigas, por brindarme la oportunidad de trabajar y aprender junto a su equipo. Quiero destacar especialmente la amabilidad y la calidad humana del personal, que desde el primer día me hicieron sentir como en casa, y con quienes fue un privilegio compartir durante estos últimos dos años. Agradezco profundamente a mi equipo diario de trabajo, cuya dedicación fue clave en el desarrollo de este producto. Y en particular a Gustavo Tovar, por estar siempre dispuesto a brindar su apoyo y a generar un ambiente positivo. Su actitud alegre, motivadora y su capacidad para hacer de cada día una experiencia mejor marcaron una diferencia significativa en mi trayectoria laboral.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), por el financiamiento del proyecto y por su constante apoyo a la innovación y la investigación en el país, contribuyendo al desarrollo tecnológico.

Al Instituto de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería, por su continuo respaldo y por permitirme utilizar sus instalaciones. Mi especial agradecimiento a Gemma Rodríguez, por la disposición de los equipos; a Gustavo Antúnez, por su apoyo en algunos preparativos de laboratorio; y a la bibliotecóloga Claudia Bordón, por su paciencia y colaboración.

A mis compañeros del Grupo de Hormigón Estructural, en particular a Rafael Leites, Eneas Do Santos y Diego Novello, por su participación en hitos clave del proyecto, como las grandes pruebas industriales.

Al profesor Renan Piccolo Salvador, por su valiosa asesoría y orientación a lo largo de todo el proyecto.

Al Departamento de Construcción del Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería, por permitirme utilizar sus instalaciones y equipos de ensayo. Agradezco especialmente a Betiana Epifanio por su paciencia y colaboración.

Al personal de laboratorio de Cementos Artigas, y en particular a Virginia Hernández, María Eugenia y Rubén, por su disposición y apoyo durante el estudio de los materiales.

Al Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, por permitirme utilizar su equipamiento de laboratorio. En especial, agradezco a Marcos por su amable colaboración.

A Carlos “Beto” Gómez por la fantástica portada.

Finalmente, y especialmente, a mi compañero y a mi familia, por su contención diaria, su apoyo incondicional y su amor durante esta etapa tan importante de mi vida.

Resumen

En Uruguay, el uso del hormigón de alto desempeño (HAD) sigue siendo limitado, con aplicaciones industriales que rara vez superan los 50 MPa de resistencia. Aunque existen avances en investigación, pocas veces estas innovaciones llegan a aplicarse en la industria. En nuestro contexto, donde los edificios son cada vez más altos, este material resulta importante para reducir el peso propio de los pilares y las cargas sobre las fundaciones, incrementando así el área útil en cada planta. Esta tesis se enmarca en un proyecto público-privado financiado por la ANII, cuyo objetivo fue desarrollar a escala industrial un HAD para pilares estructurales, alcanzando una resistencia característica superior a 70 MPa y una trabajabilidad adecuada para su colocación mediante bombeo.

El trabajo aborda el diseño y la producción de HAD utilizando materiales disponibles localmente y tecnologías innovadoras. La selección de los materiales que conforman la matriz cementicia se realizó según su disponibilidad y aptitud, evaluando su compatibilidad mediante calorimetría. La mezcla de hormigón se diseñó en laboratorio combinando la optimización del esqueleto granular, métodos teóricos de dosificación, y ajustes experimentales. Los desafíos relacionados con la pérdida de trabajabilidad durante el traslado y colocación del hormigón requirieron un enfoque innovador, integrando tres aditivos en etapas específicas del proceso: un plastificante inicial incorporado en planta como aditivo de sacrificio, un inhibidor de hidratación que disminuye la viscosidad y un superplastificante agregado en obra, que asegura una ventana de bombeo de 60 minutos.

Se realizaron pruebas industriales para validar la producción y bombeo de la mezcla, y se verificaron las propiedades mecánicas y de durabilidad. Aunque se identificaron limitaciones para su uso en estructuras masivas debido a las altas temperaturas generadas durante la hidratación, los resultados confirmaron la viabilidad técnica del HAD para pilares estructurales.

Este estudio demuestra que es posible desarrollar y producir HAD en condiciones industriales en Uruguay y establece las bases para futuras aplicaciones en la construcción local. Para su aplicación, es necesario que los estudios de cálculo incorporen este material en sus diseños y que las empresas constructoras se capaciten para dominar sus particularidades en términos de colocación, curado y control de calidad.

Palabras Claves: HAD, producción industrial, alta resistencia, durabilidad, bombeo.

Abstract

In Uruguay, the use of high-performance concrete (HPC) remains limited, with industrial applications rarely exceeding 50 MPa of strength. Although there have been advances in research, these innovations are seldom applied in the industry. In our context, where buildings are increasingly taller, this material is important for reducing the self-weight of columns and the loads on foundations, thus increasing the usable area on each floor. This thesis is part of a public-private project funded by ANII, aimed at developing an HPC for structural columns at an industrial scale, achieving a characteristic strength greater than 70 MPa and suitable workability for placement via pumping.

The work addresses the design and production of HPC using locally available materials and innovative technologies. The selection of materials for the cementitious matrix was based on their availability and suitability, evaluating their compatibility through calorimetry. The concrete mix was designed in the laboratory by combining optimization of the granular skeleton, theoretical dosing methods, and experimental adjustments. Challenges related to workability loss during transportation and placement required an innovative approach, integrating three additives at specific stages of the process: an initial plasticizer incorporated at the plant as a sacrificial additive, a hydration inhibitor that reduces viscosity, and a superplasticizer added at the construction site, ensuring a 60-minute pumping window.

Industrial tests were conducted to validate the production and pumping of the mix, and the mechanical and durability properties were verified. Although limitations were identified for its use in mass structures due to the high temperatures generated during hydration, the results confirmed the technical feasibility of HPC for structural columns.

This study demonstrates that it is possible to develop and produce HPC under industrial conditions in Uruguay and lays the foundation for future applications in local construction. For its application, calculation studies must incorporate this material into their designs, and construction companies must be trained to master its particularities in terms of placement, curing, and quality control.

Keywords: HPC, industrial production, high strength, durability, pumping

Contenido

1. CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	12
1.1. MARCO DEL TRABAJO	14
1.2. OBJETIVOS	15
1.3. METODOLOGÍA Y CONTENIDO GENERAL.....	15
2. CAPÍTULO 2 - APTITUD Y COMPATIBILIDAD DE CEMENTOS, ADITIVOS Y ADICIONES	19
2.1. INTRODUCCIÓN	19
2.1.1. <i>Cemento Portland</i>	19
2.1.2. <i>Adiciones</i>	31
2.1.3. <i>Aditivos</i>	36
2.2. METODOLOGÍA.....	38
2.2.1. <i>Caracterización de Cementos y Adiciones</i>	39
2.2.2. <i>Compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos</i>	42
2.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
2.3.1. <i>Caracterización de Cementos y Adiciones</i>	43
2.3.2. <i>Compatibilidad de cementos, adiciones y aditivos</i>	48
2.4. CONCLUSIONES PARCIALES	55
3. CAPÍTULO 3 - AGREGADOS.....	57
3.1. INTRODUCCIÓN	57
3.1.1. <i>Agregados para hormigón de alto desempeño</i>	57
3.1.2. <i>Curva de mayor compacidad</i>	58
3.2. METODOLOGÍA.....	63
3.2.1. <i>Caracterización de los agregados</i>	63
3.2.2. <i>Curva de mayor compacidad</i>	66
3.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
3.3.1. <i>Caracterización de los agregados</i>	67
3.3.2. <i>Curva de mayor compacidad</i>	72
3.3.3. <i>Verificación del esqueleto granular - límites normativos</i>	78
3.4. CONCLUSIONES PARCIALES	79
4. CAPÍTULO 4 - DOSIFICACIÓN	80
4.1. INTRODUCCIÓN	80
4.1.1. <i>Métodos de Dosificación</i>	80
4.1.2. <i>Resistencia Característica</i>	87
4.2. METODOLOGÍA.....	91
4.2.1. <i>Materiales</i>	91
4.2.2. <i>Métodos</i>	92
4.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	101
4.3.1. <i>Mezcla Objetivo en laboratorio</i>	101
4.3.2. <i>Mezcla objetivo para escala industrial</i>	124
4.4. CONCLUSIONES PARCIALES	129
5. CAPÍTULO 5 - ESCALA INDUSTRIAL	131
5.1. INTRODUCCIÓN	131
5.1.1. <i>Temperatura del hormigón</i>	131
5.2. METODOLOGÍA.....	139
5.2.1. <i>Prueba a escala industrial</i>	139
5.2.2. <i>Ajustes posteriores – Mezcla final</i>	141
5.3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	144

5.3.1.	<i>Prueba a escala industrial</i>	144
5.3.2.	<i>Ajustes posteriores</i>	153
5.4.	CONCLUSIONES PARCIALES	168
5.4.1.	<i>Escala Industrial</i>	168
5.4.2.	<i>Ajustes Posteriores – Dosificación final</i>	169
6.	CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES	170
7.	CAPÍTULO 7 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172
	ANEXO 1: PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE CALORIMETRÍA	180
	ANEXO 2: ARTÍCULO PRESENTADO EN LA 3º JORNADA DE JÓVENES INVESTIGADORES EN TECNOLOGÍA DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN	182
	ANEXO 3: COMPARACIÓN DOSIFICACIÓN OBJETIVO Y MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	186

Lista de tablas

Tabla 2.1. Notación de los compuestos químicos del cemento y su proporción habitual (AATH, 2012)	21
Tabla 2.2. Principales componentes del Clinker, y su proporción habitual (AATH, 2012)	21
Tabla 2.3. Cementos portland contemplados en la Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022)	30
Tabla 2.4. Aditivos seleccionados y datos técnicos de los proveedores.....	39
Tabla 2.5. Procedimiento de mezclado 1: muestras sin aditivo	42
Tabla 2.6. Procedimiento de mezclado 2: muestras con aditivo	42
Tabla 2.7. Resultados de fluorescencia de rayos X en las muestras de cemento CPC40 y CPC50 y los límites establecidos por la norma UNIT 20:2022, PPC: pérdida por calcinación.....	43
Tabla 2.8. Resultados de fluorescencia de rayos X en las muestras de adiciones PEF1 y PEF2, PPC: pérdida por calcinación	44
Tabla 2.9. Resultados de Consistencia de Pasta Normal (APN) e Inicio y Final de fraguado (IF: Inicio de fraguado e FF: final de fraguado).....	45
Tabla 2.10. Resultados del retenido Tamiz 45 μm de los cementos y las adiciones	46
Tabla 2.11. Resultados de Finura de Blaine de los cementos y los límites establecidos por la norma UNIT 20:2022	46
Tabla 2.12. Resultados de resistencia a compresión CPC40.....	48
Tabla 2.13. Resultados de resistencia a compresión CPC50.....	48
Tabla 2.14. Masas de los materiales: pastas de cemento.....	49
Tabla 2.15. Masas de los materiales: Pastas CPC40-aditivos	50
Tabla 2.16. Masas de los materiales: Pastas CPC50-aditivo A4	52
Tabla 2.17. Masas de los materiales: pastas de CPC40-adición.....	53
Tabla 2.18. Masas de los materiales: Pastas de CPC40-adición-aditivo.....	54
Tabla 3.1. Identificación de los Agregados Caracterizados	64
Tabla 3.2. Cantidades Mínimas para Ensayos.....	64
Tabla 3.3. Resultados composición granulométrica; Pasantes (%), TMA y MF.....	67
Tabla 3.4. Resultados de las densidades de los agregados	68
Tabla 3.5. Resultados de Absorciones de los agregados	69
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de terrones de arcilla en los agregados	69
Tabla 3.7. Resultados pasante tamiz 75 μm	69
Tabla 3.8. Proporciones AG – PP método O’Reilly con procedimiento ASTM C29 (ASTM, 2003)...	72
Tabla 3.9. Proporciones AF con mezcla 30 % AG – 70 % PP, método O’Reilly.....	74
Tabla 3.10. Proporciones AF con mezcla 40 % AG – 60 % PP, método O’Reilly.....	74
Tabla 3.11. Valores de IDE obtenidos para distintos coeficientes de ajuste, para las curvas óptimas de O’Reilly	76
Tabla 4.1. Grados de Resistencia propuesto por el método de Mehta Aitcin - 1990 (Mehta y Aitcin, 1990).....	81
Tabla 4.2. Correlación entre grados de Resistencia y Relaciones entre agregados (Mehta y Aitcin, 1990)	82
Tabla 4.3. Ventajas y desventajas de los métodos de dosificación propuestos	86
Tabla 4.4. Valores de K_N según la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005).....	89
Tabla 4.5. Factores de ajustes por números de ensayos, control estadístico resistencia a la compresión IRAM 1666 (IRAM, 2020).....	90
Tabla 4.6. Materiales utilizados para las dosificaciones analizadas.....	92
Tabla 4.7. Dosificación inicial teórica (P01).....	102
Tabla 4.8. Dosificación inicial AJUSTADA (P02).....	103
Tabla 4.9. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del PEF.....	104
Tabla 4.10. Indicadores pastones análisis de la influencia del PEF	104

Tabla 4.11. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del volumen de agregado grueso	105
Tabla 4.12. Indicadores pastones análisis de la influencia del volumen de agregado grueso	105
Tabla 4.13. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del volumen de agua	106
Tabla 4.14. Indicadores pastones análisis de la influencia del volumen de agua.....	107
Tabla 4.15. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia de la relación a/c	108
Tabla 4.16. Indicadores pastones análisis de la influencia de la relación a/c.....	108
Tabla 4.17. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis del cemento	109
Tabla 4.18. Indicadores pastones análisis de la influencia del cemento	110
Tabla 4.19. Ensayos realizados con cada canchada de hormigón	112
Tabla 4.20. Resultados de ensayos en estado fresco realizados en ambas series de hormigón.....	112
Tabla 4.21. Resultados de ensayos en estado fresco para caracterización de parámetros de HAC.....	113
Tabla 4.22. Resultados de módulo elástico	117
Tabla 4.23. Valores de módulo elástico calculados teóricamente.	118
Tabla 4.24. Resultados de porosidad y absorción de agua	119
Tabla 4.25. Variabilidad de fluidez, densidad y contenido de aire de P08.....	121
Tabla 4.26. Variabilidad de la Resistencia a Compresión de P08	122
Tabla 4.27. Estimación de la Resistencia Característica según la norma UNIT 1050:2005	123
Tabla 4.28. Estimación de la Resistencia Característica según la norma IRAM 1666:2020	123
Tabla 4.29. Estimación de la Resistencia Característica según la norma UNE-EN 206:2013+A1.....	124
Tabla 4.30. Dosificación e indicadores pastón P15.....	125
Tabla 4.31. Dosificación e indicadores pastón P16.....	126
Tabla 4.32. Dosificaciones pastones para el estudio de la reología	128
Tabla 5.1. Dosificación cargada en el sistema de la planta.	140
Tabla 5.2. Tiempos de incorporación de los aditivos, mezclados y comienzo de ensayos	140
Tabla 5.3. Cronograma de pruebas – Escala Industrial	141
Tabla 5.4. Humedad de los agregados utilizados en la prueba a escala industrial	145
Tabla 5.5. Resultados de porosidad y absorción de agua.....	152
Tabla 5.6. Dosificación pastones ajuste de aditivo para dosificación final.....	153
Tabla 5.7. Indicadores pastones ajuste de aditivo para dosificación final.....	154
Tabla 5.8. Resultados de desmolde a 24 horas con distintos porcentajes de aditivo IH	156
Tabla 5.9. Condiciones Ambientales de las mezclas comparadas.....	158
Tabla 5.10. Resultados de porosidad y absorción de agua	160
Tabla 5.11. Resultados de permeabilidad al aire.....	161
Tabla 5.12. Coeficiente característico de pérdida de calor (λ).....	165
Tabla 0.1: Composición química y mineralógica de las muestras de Cemento	183
Tabla A3.0.1. Dosificación inicial, objetivo y recomendaciones de los autores	186
Tabla A3.0.2. Indicadores dosificación inicial, objetivo y recomendaciones de los autores	187

Lista de figuras

Figura 1.1. Esquema de la metodología general	16
Figura 2.1. Proceso de Fabricación del cemento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2024)	20
Figura 2.2. Calorimetría típica del C ₃ S (Beaudoin y Odler, 2019)	26
Figura 2.3. Curva calorimétrica típica para el C ₃ A (Beaudoin y Odler, 2019)	27
Figura 2.4. Hidratación del cemento (Beaudoin y Odler, 2019)	29
Figura 2.5. Resultados de difracción de rayos X	45
Figura 2.6. Curvas Granulométricas de los Cementos y las adiciones, obtenidas mediante difracción láser	47
Figura 2.7. Morfología de las partículas de cemento – Microscopía electrónica de barrido	47
Figura 2.8. Resultados de calorimetrías de las pastas de cementos, CPC40, CPC50B y CPC50V.....	49
Figura 2.9. Resultados de calorimetrías del estudio de compatibilidad CPC40 – Aditivos.....	51
Figura 2.10. Resultados de calorimetrías obtenidas del estudio de compatibilidad CPC50 – A4.....	52
Figura 2.11. Resultados de calorimetría del estudio de compatibilidad CPC40 - Adiciones PEF1 y PEF2	53
Figura 2.12. Resultados de calorimetrías del estudio de compatibilidad entre el CPC40, las adiciones y los aditivos A4 y A5.....	54
Figura 3.1. Curvas granulométricas; y límites establecidos por normas IRAM 1627 (IRAM, 1997), ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005), UNIT 82-1951 (UNIT, 1951).....	68
Figura 3.2. Obtención de condición saturada a superficie seca	69
Figura 3.3. Pasante tamiz 75 μm	70
Figura 3.4. Piedra Partida 5-14	70
Figura 3.5. Análisis óptico de la AF.	71
Figura 3.6. Análisis óptico de la AG.	71
Figura 3.7. Mezclas AG y PP, método O’Reilly con procedimiento ASTM C29.	72
Figura 3.8. Secuencia de mezclado y compactado.....	73
Figura 3.9. Densidad (a) y fracción de poros (b) para las mezclas de AG – PP	73
Figura 3.10. Mezclas de AF, AG y PP.	73
Figura 3.11. Densidad (a) y fracción de poros (b) para las mezclas de AF - AG – PP en función del porcentaje de AF.....	74
Figura 3.12. Análisis de la compacidad de la mezcla vs. costo	75
Figura 3.13. Método A&A para el esqueleto granular obtenido por O’Reilly	76
Figura 3.14. Planilla Excel para el método de A&A.....	77
Figura 3.15. Curva granulométrica de mayor compacidad (método de O’Reilly) de la combinación de arenas AF-AG, según límites de las normas IRAM 1627 (IRAM, 1997), ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005) y UNIT 82:1951 (UNIT, 1951).....	78
Figura 4.1. Resistencia vs Rel. a/agl. - Método Aitcin (Aitcin, 1998).....	84
Figura 4.2. Enfoque simplificado para obtener el contenido de agua dependiendo del punto de saturación del aditivo – Método Aitcin (Aitcin, 1998).....	85
Figura 4.3. Contenido de agregado grueso, en kg/m^3 , dependiendo de su forma – Método Aitcin (Aitcin, 1998).....	85
Figura 4.4. Esquema resumen del método de dosificación seguido.....	93
Figura 4.5. Esquema de método de dosificación: dosificación inicial teórica y dosificación inicial ajustada	95
Figura 4.6. Esquema de método de dosificación: ajustes de parámetros de dosificación para alcanzar la dosificación objetivo en laboratorio.....	97
Figura 4.7. Esquema modelo de Bingham (ICAR RHEOMETER, s.f.).....	98
Figura 4.8. Equipo ICAR RHEOMETER (ICAR RHEOMETER, s.f.)	98

Figura 4.9. Esquema de ajustes de los aditivos en la dosificación objetivo en laboratorio y evaluación de su pérdida de trabajabilidad.....	101
Figura 4.10 Curva de mayor compacidad obtenida para la dosificación inicial teórica	102
Figura 4.11. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes de PEF	104
Figura 4.12. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del volumen de agregado grueso.....	106
Figura 4.13. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del volumen de agua.....	107
Figura 4.14. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes de relación a/c.	108
Figura 4.15. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del tipo de cemento.	110
Figura 4.16. Resultados obtenidos por el Reómetro	113
Figura 4.17. Resultados de ensayos en estado fresco vs. resistencia a la compresión para hormigones autocompactantes, comparados con valores internacionales, (a): explayamiento (cm), (b): explayamiento por anillo J, (c): capacidad de paso, (d): Tv (s)	115
Figura 4.18. Resultados de viscosidad relativa utilizando un reómetro ICAR RHEOMETER, comparado con valores experimentales internacionales.....	115
Figura 4.19. Resultados de resistencia a la compresión junto a la curva de maduración de la resistencia a la compresión según el Eurocódigo 2 (European Standard, 2004)	116
Figura 4.20. Datos experimentales de módulo elástico de investigadores locales (Pereyra et al., 2019)	118
Figura 4.21. Datos experimentales de módulo elástico de investigaciones internaciones (Guerrero Vargas y Navas Carro, 2012), (Wu, 2001), (Amin y Abu el-Hassan, 2015).....	118
Figura 4.22. Resultados de Absorción y porosidad junto con valores obtenidos experimentalmente (Fallah y Nematzadeh, 2017), (a): Absorción de agua vs. Resistencia a la compresión, (b): Absorción de agua vs. Densidad, (c): Porosidad vs. Resistencia a la compresión, (d): Porosidad vs. Densidad. 120	
Figura 4.23. Resultados del comportamiento reológico del pastón P15, (a): resultados de reometría, (b): resultados de fluidez	125
Figura 4.24. Resultados de (a):asentamiento/explayamiento (b):resistencia media a la compresión del Pastón P16 (Primer pastón con aditivos P y SP).....	127
Figura 4.25. Resultados de (a):asentamiento/explayamiento y (b):resistencia a la compresión de los pastones P16, P17 y P18.	128
Figura 4.26. Secuencia de colocación de aditivos y ventana de trabajo del hormigón, línea de tiempo sin escala	129
Figura 5.1. Cubo de muestra de hormigón, con ejes y ubicación de los sensores medidores de la temperatura.	137
Figura 5.2. Calorímetro utilizado.....	142
Figura 5.3. Recipientes envueltos en lana de roca, separados por espuma de poliestireno y colocados dentro del “calorímetro”	143
Figura 5.4. Curva de compacidad obtenida de los materiales utilizados en la prueba a escala industrial	145
Figura 5.5. Reporte de carga realizada por la planta mezcladora.....	145
Figura 5.6. Prueba de bombeo	146
Figura 5.7. Ensayo de cono invertido	148
Figura 5.8. Resultados del ensayo de fluidez de la escala industrial y los obtenidos en laboratorio. .	148
Figura 5.9. Resultados de densidad y aire.....	149
Figura 5.10. Resultados del comportamiento reológico del hormigón a escala industrial.....	149
Figura 5.11. Resultado del desmolde de probetas.....	150
Figura 5.12. Defectos y patologías observadas en probetas.....	150
Figura 5.13. Resistencia media a la compresión, escala industrial vs laboratorio, fcm: Promedio de tres determinaciones, σ : desviación estándar.....	151
Figura 5.14. Valores experimentales Internacionales de Absorción y Porosidad en comparación con los resultados obtenidos en laboratorio y en Escala Industrial (Fallah y Nematzadeh, 2017), (a): Absorción	

de agua vs. Resistencia a la compresión, (b): Absorción de agua vs. Densidad, (c): Porosidad vs. Resistencia a la compresión, (d): Porosidad vs. Densidad.....	152
Figura 5.15. Pérdida de fluidez en el tiempo – Ajuste de aditivo inhibidor de hidratación	154
Figura 5.16. Evolución de temperatura con distinto porcentaje de aditivo IH.....	155
Figura 5.17. Evolución de la resistencia a la compresión con distintos porcentajes de aditivo IH.....	156
Figura 5.18. Resultados del comportamiento de la fluidez en el tiempo para la dosificación final (P20), la dosificación objetivo para escala industrial (P23) y la prueba a escala industrial (P23).	158
Figura 5.19. Resultados de densidad y contenido de aire para la dosificación final, la dosificación objetivo para escala industrial y la prueba a escala industrial.	158
Figura 5.20. Resultados de reología mediante reómetro ICAR Rheometer. resultados pastón P20 y prueba a escala industrial (P16).	159
Figura 5.21. Resistencia media a la compresión – dosificación final (P20), fcm: promedio de tres determinaciones, σ : desviación estándar.	160
Figura 5.22. Clasificación de la permeabilidad del hormigón, basada en resultados de kT, norma IRAM 1892:2022-1(IRAM, 2022).	161
Figura 5.23. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados succión capilar y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo.....	162
Figura 5.24. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados penetración de agua a presión y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo	162
Figura 5.25. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados migración de cloruros y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo.....	162
Figura 5.26. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados de carbonatación y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo	163
Figura 5.27. Temperaturas alcanzadas por el hormigón del pastón P20, Tm: temperatura en el centro del cubo, Tf: temperatura en el centro de la cara, Te: temperatura en el centro de la arista, Te: temperatura en el vértice, Ta: temperatura en la cámara interna.....	164
Figura 5.28. Temperatura adiabática y temperaturas alcanzadas por el hormigón del pastón P20.....	165
Figura 5.29. Evolución del calor de hidratación obtenido en el tiempo para el P20.....	166
Figura 5.30. Valores Experimentales de Investigadores Internacionales (Ng, Ng y Kwan, 2009) y valor obtenido para el pastón P20, (a): Calor de hidratación vs. Contenido de cemento, (b): Calor de hidratación vs. Relación a/c, (c): Temperatura adiabática vs. Contenido de cemento, (d): Temperatura adiabática vs. Relación a/c.	167
Figura 5.31. Temperatura máxima adiabática obtenida por investigadores internacionales vs pastón P20.	167
Figura A1.1. Resultados de calorimetría comparación métodos de mezclado: manual vs. mezcladora. (a): cemento CPC40, (b): cemento CPC50B.	180
Figura A1.2. Resultados de calorimetría comparación masa de la muestra colocada en el calorímetro	181
Figura 3. Morfologías de las partículas de cemento, Microscopía Electrónica de Barrido	183
Figura 4. Molienda, Granulometría, Retenido en el tamiz 325 y superficie específica de las muestras de cemento.	183
Figura 5. Calorimetrías obtenidas de las pastas con y sin incorporación de aditivo.....	185
Figura A3.1. Curvas de compacidad de las mezclas correspondientes a las dosificaciones propuestas por Mehta Aïtcin, A&A y las dosificaciones propuestas como inicial y objetivo.	187

Capítulo 1 - Introducción

Desde inicios de los años 80 el hormigón de alto desempeño (HAD) ha ido alcanzando mayores resistencias, creciendo paulatinamente desde valores que rondan entre 40 y 50 MPa, hasta alcanzar, en algunas partes del mundo más de 140 MPa. Si bien es habitual confundir Alto Desempeño con Alta Resistencia, este tipo de hormigones no sólo proveen resistencias elevadas, sino que la implicancia de su desarrollo y su control permiten optimizar y mejorar otras propiedades como el módulo de elasticidad y la impermeabilidad, obteniéndose finalmente no sólo un hormigón con mayores características mecánicas, sino también un hormigón más durable (Aïtcin, 1998, Mehta y Aïtcin, 1990, entre otros).

El HAD es especialmente útil en elementos que trabajan predominantemente a compresión, ya que permite utilizar columnas más delgadas, reduciendo el peso propio de las estructuras y, por lo tanto, la carga que se transmite a las fundaciones. Además, al disminuir las secciones en planta de los elementos estructurales, se ocupa menos área de la superficie disponible, incrementando el espacio económicamente útil (por ejemplo, en edificios de gran altura). Por otro lado, la alta resistencia inicial del HAD resulta ventajosa para poner en servicio las estructuras de forma rápida, como en reparaciones de puentes en vías principales. Asimismo, su elevado módulo de elasticidad puede aprovecharse en elementos donde la limitación de la deformación sea un factor crítico. Finalmente, otro uso relevante del HAD es su capacidad de asegurar una baja permeabilidad del hormigón, lo que es esencial en condiciones de exposición severa, donde existe riesgo de penetración de cloruros, sulfatos u otros agentes agresivos (Aïtcin, 1998; Mehta y Aïtcin, 1990; entre otros).

El desarrollo de los hormigones de alto desempeño (HAD) ha avanzado tanto en el ámbito académico como en el industrial de manera paralela. Sin embargo, no fue hasta la década de 1980 que la industria comenzó a incorporar hormigones de 100 MPa, favorecida por la inclusión de humo de sílice, el desarrollo de superplastificantes y el auge de los edificios de gran altura. Desde entonces, las resistencias máximas alcanzadas han seguido incrementándose, tanto en la investigación como en la industria, con un menor tiempo entre el desarrollo y su implementación práctica (Aïtcin, 1998).

En América Latina, el desarrollo de HAD fue posterior. Aun así, se pueden encontrar numerosos ejemplos de investigaciones universitarias, que han tenido distintos niveles de incorporación en la industria (Tutikian, Isaia y Helene, 2011). Un importante foco de desarrollo en la región se encuentra en San Pablo, Brasil, donde existe una sólida tradición académica y un uso cada vez más extendido en la práctica (Helene y Tutikian, 2011). Las obras emblemáticas en Brasil comenzaron a ejecutarse a principios de los años 90 con hormigones que superaban los 50 MPa de resistencia característica, alcanzando en la actualidad resistencias superiores a 100 MPa (Helene y Tutikian, 2011).

En Uruguay, los antecedentes en el uso de HAD son escasos y, en su mayoría, no están documentados públicamente. En cuanto a la investigación, destacan especialmente aquellos relacionados con la valorización de residuos como la cáscara de arroz y el polvo electrofiltro (Rodríguez de Sensale, 2000; Rodríguez de Sensale, Rodríguez Viacava, 2018; Rodríguez de Sensale, Rodríguez Viacava, Godoy, 2015; Rodríguez de Sensale; Romay, Costa, 2012; Rodríguez et al., 2008). Las experiencias eran con hormigones de alto desempeño y convencionales que eran tomados como referencia.

En la industria uruguaya, el suministro de hormigones para obras convencionales se limita mayormente a resistencias de 45 MPa y, en casos puntuales, 50 MPa, orientándose más a obtener alta resistencia inicial que a satisfacer requerimientos específicos de proyecto. En términos generales, el desarrollo de hormigones especiales en Uruguay ha sido relativamente lento en comparación con la región y el mundo.

El diseño y producción de hormigón de alto desempeño es más complejo que el de un hormigón convencional. A medida que se busca incrementar la resistencia a la compresión, las propiedades del hormigón dejan de depender exclusivamente de la relación agua/cemento, y otros factores adquieren mayor relevancia, como la calidad del agregado grueso, que puede convertirse en un punto crítico de la mezcla. No obstante, la mayoría de las propiedades del HAD siguen estando vinculadas a la hidratación del cemento y al contenido de agua, aspectos que resultan especialmente críticos al buscar altas resistencias sin comprometer la fluidez de la mezcla (Aïtcin, 1998; Mehta y Aïtcin, 1990; entre otros).

Si consideramos el hormigón de alto desempeño como un conjunto de materiales, la principal diferencia con el hormigón convencional es su baja porosidad, que resulta de un menor contenido de agua, reduciendo así la separación entre las partículas de cemento. Sin embargo, el incremento en la resistencia a medida que disminuye la porosidad de la pasta solo se logra si los agregados gruesos tienen una capacidad mecánica adecuada. Por lo tanto, la selección y proporción correctas de los componentes del hormigón juegan un papel fundamental. A medida que se busca una mayor resistencia, el desempeño y la calidad de los componentes se vuelven críticos. No obstante, la selección de los materiales siempre está condicionada por limitaciones económicas y disponibilidades regionales. Mientras el hormigón de alto desempeño se siga fabricando con materiales habituales y de bajo costo, similares a los del hormigón convencional, su composición no será realmente la más eficiente (Aïtcin, 1998).

Una vez realizada la correcta selección de los componentes del hormigón, es necesario encontrar la mejor combinación entre ellos para alcanzar, al menor costo posible, las propiedades deseadas. Cabe destacar que los métodos de dosificación tradicionales presentan limitaciones cuando se aplican al hormigón de alto desempeño, por lo que resulta inapropiado utilizar un enfoque convencional en este contexto. Por ello, es necesario recurrir a metodologías específicas, como los métodos de Mehta-Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990), De Larrard (De Larrard y Sedran, 1994) o el de Aïtcin (Neville y Aïtcin, 1998), entre otros, que consideran no solo las bajas relaciones agua/aglomerante involucradas, sino también el efecto de los aditivos químicos y la incorporación de adiciones minerales.

Sin embargo, diseñar y obtener un hormigón de alto desempeño en el laboratorio no presenta tantas dificultades como en el ámbito industrial. En la práctica, varios factores adquieren relevancia, como la variabilidad en las propiedades de los materiales, que están en constante cambio, o las consideraciones asociadas a la producción a escala industrial. En este contexto, es fundamental garantizar que la mezcla pueda transportarse, bombearse y colocarse dentro de un rango de tiempo adecuado. Mientras la participación del hormigón de alto desempeño en el mercado no justifique grandes inversiones económicas, la mezcla diseñada deberá adaptarse a los procedimientos constructivos habituales, similares a los empleados con el hormigón convencional. No obstante, requerirá de un cuidadoso y riguroso control de calidad para asegurar un desempeño óptimo en condiciones reales (Aïtcin, 1998).

1.1. Marco del Trabajo

Con el objetivo de producir hormigones de alto desempeño en Uruguay que ofrezcan alta resistencia y mayor durabilidad, el Grupo de Hormigón Estructural de la Facultad de Ingeniería y el área de Hormigones de Cementos Artigas S.A. (Hormigones Artigas), financiados por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) CF_1_2021_1_171267, desarrollaron un proyecto para la producción de hormigón de alto desempeño a escala real en planta, con el fin de ser comercializado.

El proyecto se desarrolló durante un plazo de 2 años, entre el 2022 y el 2024, en el que no sólo se abordó el diseño de la mezcla mediante métodos específicos de dosificación, sino además se realizó un análisis riguroso en la selección de sus componentes y una adecuada caracterización. Se decidió no utilizar humo de sílice como adición mineral activa, debido al incremento del costo, reservando su uso para aumentar la resistencia a futuro. Considerando obtener una mezcla a implementar a escala industrial, fue necesario adaptarse a los cambios rutinarios de producción, como proveedores y características de los agregados y/o la composición, forma y finura del cemento, cuyas características resultan primordiales en el desarrollo de estos tipos de hormigones. Una vez elaborada y caracterizada la mezcla a nivel laboratorio, se desarrollaron pruebas a nivel industrial que constataron la capacidad bombeable, resistente y durable del hormigón. Sin bien las etapas mencionadas fueron elaboradas principalmente en Montevideo, una vez determinada la mezcla, se realizaron los ajustes necesarios para los materiales disponibles en la planta de Maldonado.

Esta tesis se enmarca en el proyecto mencionado y presenta los resultados más relevantes. Si bien se procuró que las decisiones adoptadas respondieran a criterios técnicos fundamentados en los resultados obtenidos, es importante señalar que muchas de ellas también estuvieron condicionadas por la viabilidad logística y comercial de la empresa.

Además del trabajo descrito en este documento, el proyecto incluyó el estudio de otros parámetros, como el uso de un aditivo compensador de retracción para mejorar la trabajabilidad y la aplicación del método de dosificación de IBRACON. La determinación de la dosificación final implicó la realización de 55 pastones, de los cuales se presentan únicamente 22. Si bien se muestran los resultados de la primera escala industrial y los ajustes posteriores, en una segunda prueba a escala industrial, se validó exitosamente la obtención de un HAD bombeable con propiedades similares a las logradas en laboratorio.

Se espera, con el desarrollo de este nuevo producto, producir en la industria un “efecto de arrastre” que involucre diversos actores del rubro. Donde las empresas constructoras deberán mejorar sus procedimientos constructivos y de control de calidad para lograr una implementación satisfactoria del nuevo material. Los estudios de cálculo deberán incorporar metodologías de diseño específicas para realizar proyectos de diseño en HAD. En algunos casos en los que las materias primas sean limitantes, los proveedores deberán evaluar la posibilidad de realizar cambios de producción para mejorar su calidad. Finalmente, es esperable que las demás empresas hormigoneras se vean incentivadas a desarrollar este tipo de hormigones, aportando así al crecimiento tecnológico del país.

1.2. Objetivos

El objetivo general del trabajo fue desarrollar a escala industrial una mezcla de hormigón de alto desempeño para aplicación en columnas estructurales, con una resistencia característica a la compresión mínima de 70 MPa a los 28 días de edad.

Como objetivos específicos se planteó:

- Estudiar la compatibilidad entre cementos, aditivos y adiciones disponibles en el mercado nacional, mediante ensayos de calorimetría.
- Caracterizar los agregados seleccionados y obtener la curva de mayor compacidad incluyendo los materiales finos.
- Desarrollar una metodología de dosificación que combine y aproveche las ventajas de varios métodos de dosificación de hormigón de alto desempeño, utilizando materiales nacionales.
- Desarrollar una mezcla de HAD a escala industrial, que asegure un tiempo de 50 minutos para su transporte y una ventana mínima de 60 minutos para su colocación mediante bombeo.

1.3. Metodología y Contenido General

Como se mencionó al inicio, el desarrollo de una mezcla de hormigón de alto desempeño requiere un estudio meticuloso desde la selección de sus componentes hasta su implementación a escala industrial. Por ello, se propone inicialmente diseñar una mezcla viable a nivel de laboratorio para luego, partiendo de los ajustes necesarios, implementarla industrialmente.

La metodología general (Figura 1.1) sugerida comienza con la selección y caracterización de los componentes, seguida de la determinación de una dosificación en laboratorio que cumpla con las propiedades requeridas. Posteriormente, se propone implementar los ajustes necesarios para asegurar la trabajabilidad del hormigón durante una ventana de tiempo adecuado para su colocación. Una vez determinada la dosificación, se realizará una prueba a escala industrial y a partir de los resultados obtenidos, se efectuarán los ajustes necesarios en laboratorio.

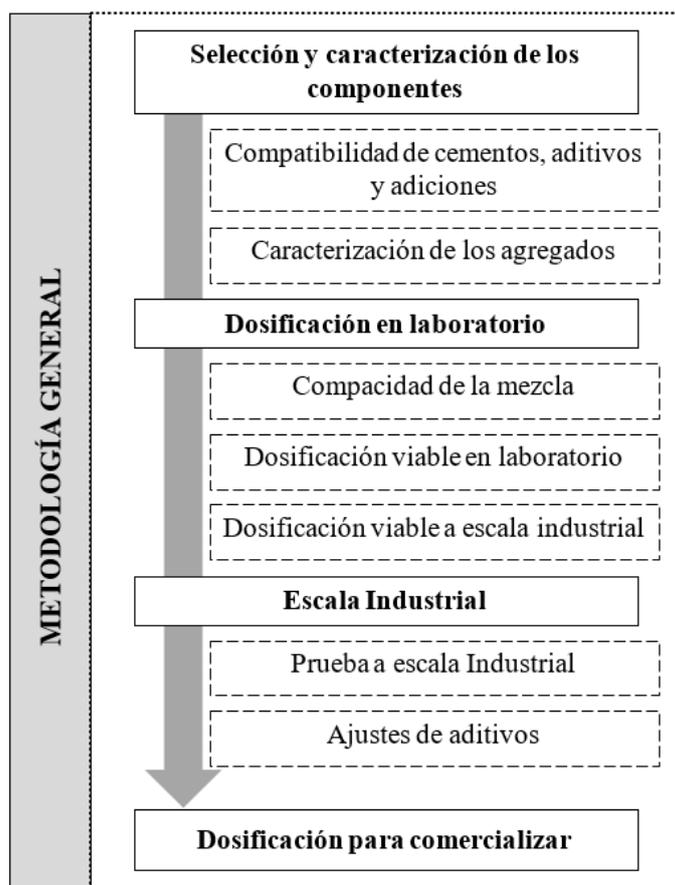


Figura 1.1. Esquema de la metodología general

De los materiales disponibles dentro del mercado se seleccionaron aquellos que cumplieran con las recomendaciones para hormigones de alto desempeño.

- Para la elección del cemento, se consideró principalmente evaluar la utilización del cemento comercializado hoy en día por la empresa. Además de la caracterización y análisis del cemento comercializado a granel (CPC40), por interés de la empresa se evaluó un cemento fabricado especialmente (CPC50) y se compararon dos métodos de molienda (molino de bolas y molino vertical).
- Las adiciones minerales analizadas fueron las implementadas hoy en día por la empresa hormigonera, como el caso del Polvo electrofiltro (PEF).
- Se seleccionaron varios aditivos reductores de agua comercializados en el país y un inhibidor de hidratación.

Se realizó la caracterización completa del cemento, se consideró principalmente el uso del CPC40, se verificó su compatibilidad con las adiciones implementadas como parte del proceso habitual de fabricación del hormigón y se seleccionó el aditivo que presentó mejor compatibilidad. El estudio de compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos se realizó mediante estudios de calorimetría.

De los agregados disponibles en la planta hormigonera, se seleccionaron y caracterización aquellos que cumplieran con las recomendaciones para hormigones de alto desempeño. Se

obtuvo experimentalmente la curva de mayor compacidad mediante el método de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007), aplicando el procedimiento de la norma ASTM C29 (ASTM, 2003).

La metodología de dosificación de la mezcla en laboratorio consistió en la combinación de varios métodos de dosificación que optimizara sus ventajas. Se partió de una dosificación teórica inicial, y luego a partir de ajustes de parámetros se obtuvo y caracterizó la dosificación objetivo en laboratorio que cumpliera con las propiedades requeridas.

Considerando los tiempos de traslado y colocación del hormigón a escala industrial, se realizaron ajustes en la dosificación de laboratorio. Se propuso utilizar un aditivo reductor de agua de primera generación (P) como aditivo de sacrificio, incorporado por la planta al inicio de la mezcla, luego un aditivo inhibidor de hidratación (IH), incorporado a pie de camión y, posteriormente, un aditivo reductor de agua de última generación (SP) que se incorporaría en obra.

Una vez determinada la dosificación viable para escala industrial se realizó una prueba a escala industrial que comprobara la capacidad bombeable, mecánica y durable del hormigón. A raíz de los resultados a escala industrial se ajustó la dosis de aditivos en laboratorio, se realizó la caracterización completa y se determinó la temperatura máxima del hormigón.

La tesis se compone de siete capítulos, de los cuales cuatro desarrollan el núcleo principal abordando las etapas claves en el diseño de una mezcla de hormigón de alto desempeño para producción industrial. Estos capítulos incluyen los fundamentos teóricos del tema abordado, la metodología implementada, la presentación de resultados y las conclusiones.

A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

- **Capítulo 1- Introducción**

Con este capítulo se busca introducir al lector en la temática del hormigón de alto desempeño y su situación actual en el mercado uruguayo. Se presenta el marco principal de la campaña experimental, se detallan los objetivos planteados y la metodología abordada.

- **Capítulo 2 - Aptitud y compatibilidad de cemento, aditivos y adiciones**

Se exponen los fundamentos teóricos necesarios para el entendimiento del cemento portland, las adiciones minerales y los aditivos químicos. Se presenta la caracterización de los materiales implicados y se estudia, a partir de ensayos de calorimetría, la compatibilidad entre ellos.

- **Capítulo 3 - Agregados**

Se caracterizan los agregados y se analiza su aptitud para la implementación en hormigón y principalmente en mezclas de hormigones de alto desempeño. Se busca, a partir de la curva de mayor compacidad, la combinación de agregados para los que se obtiene la mayor densidad y menor porosidad. Esto último se realiza por dos métodos, un método experimental buscando, a partir de distintas combinaciones de los agregados, obtener la mezcla más densa y se vincula con un método más analítico que determina

la compacidad mediante la aproximación de la curva granulométrica de todos los componentes a una curva teórica ideal.

- **Capítulo 4 - Dosificación**

Se exponen distintos métodos de dosificación para hormigones de alto desempeño y se propone para la obtención de la dosificación de la mezcla inicial una combinación optimizada. A partir de la búsqueda de la resistencia y la trabajabilidad objetivas, se presentan las iteraciones realizadas a la mezcla hasta la obtención de la dosificación final. Se estudia la variabilidad de las propiedades obtenidas, se realiza su caracterización completa y se presentan las modificaciones necesarias para el desarrollo del hormigón a escala industrial; basado principalmente en la incorporación de aditivos químicos y cambios en los procesos de control rutinarios de la empresa.

- **Capítulo 5 - Escala Industrial**

Se realiza a escala industrial la mezcla definida en laboratorio con el objetivo de corroborar además de su capacidad bombeable, que se obtenga a escala industrial un hormigón de alto desempeño con propiedades similares a las obtenidas en laboratorio. A partir de los resultados de la prueba a escala industrial, se ajustan las dosis de aditivos en laboratorio, se repite la caracterización completa y se determina la temperatura máxima adiabática alcanzada por el hormigón.

- **Capítulo 6 - Conclusiones**

Se presentan las conclusiones y comentarios finales de la experiencia desarrollada.

- **Capítulo 7 – Referencias Bibliográficas**

Se presentan las referencias bibliográficas abordadas para el desarrollo de este trabajo.

- **Anexos:**

• Anexo 1.

Se presenta el análisis realizado para determinar la metodología implementada en los ensayos de calorimetría.

• Anexo 2.

Se adjunta un artículo presentado en la III Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y del Hormigón, titulado: “Efecto de la Morfología y Composición del Cemento Pórtland en su Hidratación” (Molina et al., 2023), donde se evaluaron los cementos CPC40, CPC50B y CPC50V.

• Anexo 3.

Se determina una comparación entre los métodos teóricos de dosificación y la mezcla objetivo en laboratorio.

Capítulo 2 - Aptitud y compatibilidad de cementos, aditivos y adiciones

El objetivo de este capítulo es seleccionar los materiales aglomerantes y el aditivo químico, es decir, cemento, adición y aditivo, aptos y compatibles para su implementación en hormigón de alto desempeño. Para ello, se presenta una breve introducción a la temática del capítulo, se caracterizan individualmente los cementos y las adiciones disponibles en la empresa, se presentan las características técnicas de algunos aditivos químicos comerciales y, finalmente, se evalúa la aptitud y compatibilidad entre los materiales mediante ensayos de calorimetría.

2.1. Introducción

2.1.1. Cemento Portland

Como se conoce, el cemento portland es un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (UNIT, 2022). Sus componentes principales son el clinker de cemento pórtland, el sulfato de calcio, en algunos casos las adiciones y los aditivos (agentes de molienda y mejoradores de calidad).

2.1.1.1. Proceso de Fabricación

El clinker de cemento portland es un mineral artificial que se obtiene por cocción en un horno rotatorio a 1450 °C (clinkerización) de una mezcla cruda constituida mayoritariamente por piedra caliza finamente molida (polvo crudo); la piedra caliza es extraída, triturada, y combinada proporcionalmente con alúmina, sílice y óxidos de hierro, que luego son sometidos a los procesos de molienda y clinquerización (Neville y Aïtcin, 1998).

El clinker es molido finamente con otros componentes (adiciones activas o inertes) y sulfato de calcio (que actúa como regulador de fraguado) constituyendo lo que se conoce como cemento portland (Tutikian, Isaia y Helene, 2011). La Figura 2.1 presenta un esquema del proceso de fabricación por vía seca del cemento portland, más utilizado actualmente.

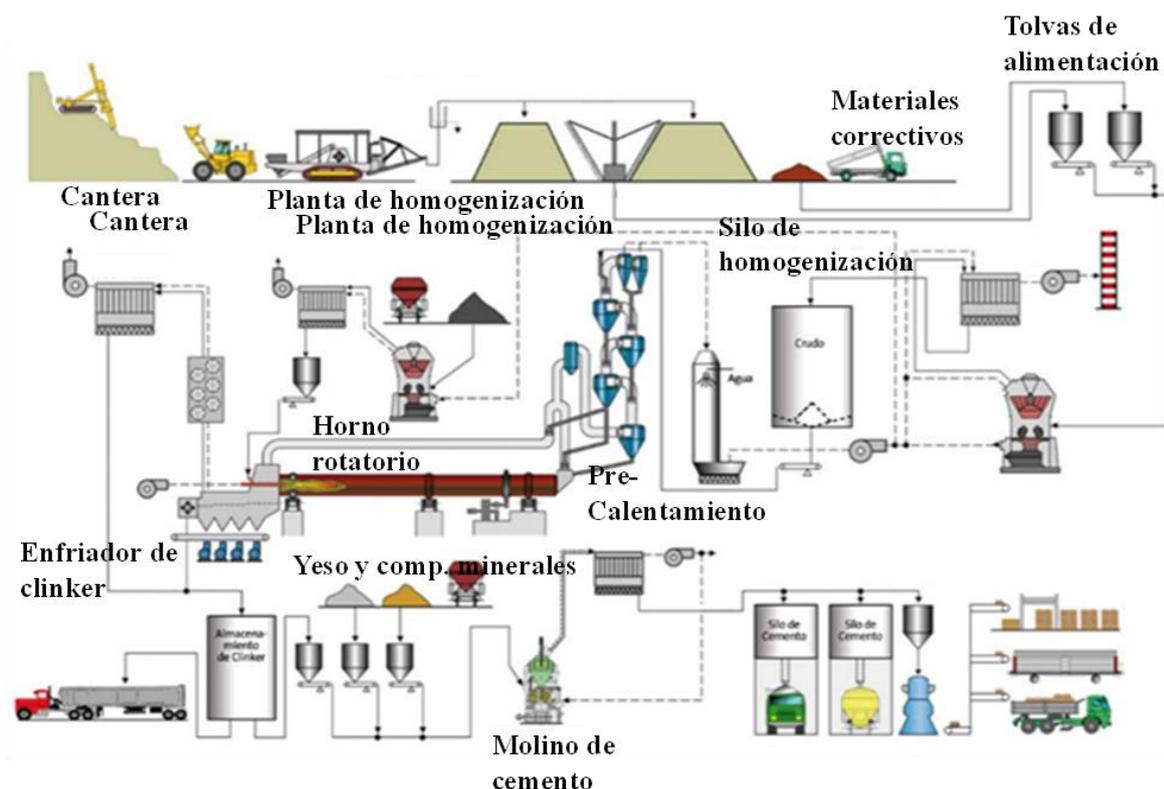


Figura 2.1. Proceso de Fabricación del cemento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2024)

2.1.1.2. Composición Química

El cemento portland, se compone principalmente por las fases minerales aportadas por el clinker, por sulfato de calcio, hemihidrato y/o anhidrita brindados por el yeso (Aïtcin, 1998). Es habitual, en la fabricación del cemento, utilizar un sistema abreviado para indicar los óxidos presentes (Tabla 2.1) (AATH, 2012).

El Clinker, está formado por cuatro fases minerales predominantes (Tabla 2.2), que aportan en gran magnitud las propiedades mecánicas y reológicas al material cementante. Estos cuatro componentes presentan una microestructura cristalina con polimorfos; que en la industria cementera se conocen como Alita (Silicato Tricálcico), Belita (Silicato Dicálcico), Celita (Aluminato Tricálcico) y Ferrita (Ferro-aluminato tetracálcico) (Harrisson, 2019).

Tabla 2.1. Notación de los compuestos químicos del cemento y su proporción habitual (AATH, 2012)

Constituyentes	Elementos químicos			Proporción (%)
	Notación Química	Descripción	Abreviación	
Principales – constituyen un 90%	CaO	Óxido de calcio	C	60,0 – 67,0
	SiO ₂	Sílice	S	17,0 – 25,0
	Al ₂ O ₃	Alúmina	A	3,0 – 8,0
	Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	F	0,5 – 6,0
Secundarios – constituyen un 10%	MgO	Óxido de Magnesio	M	0,1 – 4,0
	K ₂ O	Óxido de potasio	K	0,2 – 1,4
	Na ₂ O	Óxido de sodio	N	(álcalis)
	SO ₃	Sulfato	S̄	1,0 – 4,5

Tabla 2.2. Principales componentes del Clinker, y su proporción habitual (AATH, 2012)

Descripción química	Fase	Notación química	Abreviación	Proporción (% clinker)
Silicato Tricálcico	Alita	3CaO. SiO ₂	C ₃ S	30 – 70
Silicato Dicálcico	Belita	2CaO. SiO ₂	C ₂ S	10 – 40
Aluminato Tricálcico	Celita	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	0 – 15
Ferro-Aluminato Tetracálcico	Ferrita	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5 – 20

Los compuestos del clinker presentan, además de diversos rangos de composición química, cambios mineralógicos a medida que aumenta o disminuye la temperatura en el horno rotatorio. Las diversas estructuras de cristales se pueden agrupar en siete sistemas cristalinos, pudiendo conformar, muchos de los cristales (algunos presentes en el clinker de cemento), más de un sistema. La estabilidad o equilibrio de los cristales dependerá, no sólo de la temperatura a la que se formaron, sino también, de si el proceso de enfriamiento fue lo suficientemente rápido como para estabilizar los polimorfos más reactivos y volverse una estructura ordenada (Harrisson, 2019). Esto hace que, a pesar de que dos cementos presenten exactamente la misma composición química, si las tecnologías aplicadas durante la formación de ambos clinkers no fueron iguales, se obtengan diferentes propiedades hidráulicas (Aïtcin, 1998).

Las propiedades obtenidas por cada una de las fases del cemento se relacionan con la forma en que reaccionan con el agua para formar las fases hidratadas que se unen y brindan la trabajabilidad y resistencia al mortero u hormigón (Neville, 1997).

2.1.1.3. Constituyentes principales del cemento portland

El *silicato tricálcico* (C₃S) es el compuesto mayoritario y el que más influye en las resistencias a edades tempranas. Las propiedades resistentes dependen principalmente de su microestructura y su alta velocidad de hidratación es la que determina la elevada resistencia inicial. Presenta una reacción exotérmica, pudiendo liberar hasta 502-510 J/g de calor al hidratarse. En su forma impura, alita, se presenta como cristales incoloros y opacos de sección

prismática y contornos rectangulares o hexagonales (AATH, 2012; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

El *silicato dicálcico* (C_2S) presenta un desarrollo más lento de su resistencia, aportando resistencia final al mortero u hormigón. Se hidrata a una velocidad menor que el C_3S , liberando también cantidades menores de calor (260 J/g). En forma impura, belita, es polimórfica presentando distintas formas cristalinas que dependen de la temperatura a la que se forma y del proceso de enfriamiento (AATH, 2012; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

El *aluminato tricálcico* (C_3A) reacciona inmediatamente en contacto con el agua, produciendo el fraguado y endurecimiento del cemento. La liberación de calor durante este proceso puede alcanzar valores de 850 J/g. La velocidad de hidratación es controlada mediante la incorporación de yeso que modifica la reacción y aumenta el calor liberado hasta valores de 1400 J/g. Esta liberación de calor inicial, cuando se produce la reacción, suele ser descartada en el análisis de liberación de calor (calorimetría) de una pasta de cemento (AATH, 2012). En forma impura, celita, puede presentar distintas formas cristalinas (cúbicas, ortorrómbicas o monoclinicas) que dependen de la existencia de iones extraños en el clínker y también del proceso de enfriamiento al que fue sometida (AATH, 2012; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

El *ferroaluminato tetracálcico* (C_4AF) reacciona rápidamente con el agua, produciendo también el fraguado en pocos minutos, presentando menor velocidad que la del C_3A . El calor liberado ronda valores de 420 J/g y aporta poca resistencia al conjunto (AATH, 2012; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

Además de los componentes principales ya mencionados, dentro de la composición del Clínter encontramos componentes minoritarios como óxidos de potasio o sodio (conocidos como álcalis), óxidos de magnesio o calcio, cloruros y sulfatos. El *Óxido de Magnesio* (MgO) generalmente proviene de la piedra caliza que se utiliza como materia prima en la producción del Clínter. Cuando el MgO se encuentra en exceso ($> 2\%$) puede cristalizar en periclasa, durante el enfriamiento lento del clínker, generando posteriormente expansión interna y fisuración en el mortero u hormigón endurecido al hidratarse de forma tardía. El *Óxido de Calcio libre* en exceso puede generar expansiones al hidratarse en forma lenta.

Los *Álcalis* provienen tanto de las materias primas como del combustible que se utiliza durante el proceso de clínquerización. Suelen encontrarse como impurezas en el C_2S y C_3A , acelerando la hidratación temprana e influyendo en las propiedades del hormigón en estado fresco al utilizarse aditivos. En cementos con elevadas cantidades de álcalis debe evitarse principalmente el uso de agregados reactivos (AATH, 2012). El porcentaje de álcalis puede calcularse utilizando la Ecuación 2.1.

$$\text{Álcalis (\%)} = \% Na_2O + 0,658 \times \% K_2O \quad 2.1$$

El contenido de *cloruros* proviene generalmente de las materias primas o combustibles alternativos, suele encontrarse restringido por normativas para evitar el riesgo de la corrosión de las armaduras en hormigón armado (AATH, 2012). Los *sulfatos* se encuentran presentes en el cemento portland principalmente por la incorporación de yeso, pero también debido a impurezas en la estructura del Clínter. Si bien su principal función es controlar el fraguado

instantáneo, en cantidades excesivas pueden producir variaciones de volúmenes debido a la elevada formación de sulfoaluminato de calcio o etringita (AATH, 2012; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

2.1.1.4. Hidratación del Cemento Portland

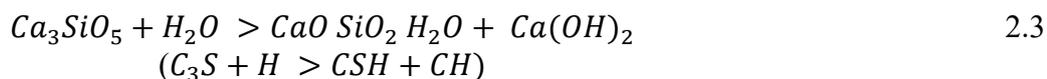
La química del hormigón se basa principalmente en la del cemento, que al entrar en contacto con el agua desencadena una reacción de hidratación. Este proceso exotérmico ocurre a temperatura ambiente, sin necesidad de aporte de calor ni agentes externos, transformando el material de un estado semi-fluido (fresco) a uno sólido (endurecido). La hidratación del cemento está dominada por un mecanismo de disolución y precipitación, donde las partículas de cemento se disuelven en el agua y los productos hidratados se precipitan posteriormente (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

Para que el cemento se hidrate por completo, es esencial mezclarlo con una cantidad suficiente de agua. La relación entre el agua y el cemento, conocida como relación agua/cemento (Rel. a/c), influye tanto en la reología de la mezcla como en el avance de la hidratación y en las propiedades del material una vez endurecido. Este proceso de hidratación está condicionado por varios factores, como la composición de las fases del cemento, su finura, la relación agua-cemento utilizada, la temperatura de curado y la presencia de aditivos y adiciones (Beaudoin y Odler, 2019). El estudio del avance de la hidratación puede llevarse a cabo midiendo de forma continua uno o más parámetros, como la liberación de calor, la viscosidad o la conductividad eléctrica (Beaudoin y Odler, 2019).

A. Productos de Hidratación

Durante la hidratación del cemento, se produce la disolución de sus componentes no inertes, lo que da lugar a la posterior precipitación de tres productos de hidratación primarios: el silicato de calcio hidratado (CSH), el hidróxido de calcio (CH) y el monosulfato (AFm), este último originado a partir de la reacción de la etringita (Aft) (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; NEVILLE, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

El silicato de calcio hidratado (CSH) se forma cuando los silicatos reaccionan con el agua (Ecuaciones 2.2 y 2.3). Generalmente se describe como un gel, y no como un producto cristalino, ya que no es posible obtener una estructura consistente a través de la difracción de rayos X (Harrisson, 2019; Beaudoin y Odler, 2019).

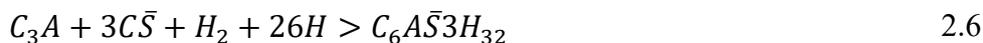


El hidróxido de calcio no solo se genera a partir de la reacción de la cal libre presente en el cemento (Ecuación 2.4), sino también debido al exceso de CaO liberado durante la hidratación

del C_3S (Ecuación 2.3). Este producto forma cristales discretos de tamaño variable en la pasta de cemento, y generalmente tiene una composición pura (Harrisson, 2019). La presencia de hidróxido de calcio (CH) genera una alta alcalinidad en el hormigón, con un pH de 12,5, lo que favorece la protección de las armaduras contra la corrosión. Sin embargo, esta alta alcalinidad también implica una baja resistencia frente al ataque de ácidos (AATH, 2012).



En ausencia de yeso, la hidratación del C_3A (Ecuación 2.5) ocurre de manera rápida, provocando el endurecimiento instantáneo de la pasta de cemento, fenómeno conocido como "flash set". Sin embargo, la presencia de sulfato modifica esta reacción (Ecuación 2.6), generando un hidrato de sulfoaluminato de calcio, conocido como etringita (AFt), que recubre la superficie del C_3A y ralentiza su reacción (Harrisson, 2019; Beaudoin y Odler, 2019). La formación de etringita continúa mientras haya C_3A , sulfato y agua disponibles en el sistema. Cuando el cemento se compone únicamente de clinker y yeso, al agotarse el sulfato, la etringita (AFt) puede disolverse y transformarse en una fase con un solo mol de sulfato de calcio, conocida como monosulfato (AFm).



B. Análisis de la Hidratación del Cemento

Como se mencionó previamente, la hidratación de los componentes del cemento portland está representada por un conjunto de reacciones químicas que liberan calor. La velocidad de liberación de este calor total varía según el compuesto y depende principalmente del avance de las reacciones a lo largo del tiempo. Por ello, es común utilizar la curva calorimétrica como indicador del proceso de hidratación de las pastas. Esta curva se obtiene mediante ensayos de calorimetría, donde se mide la temperatura generada durante la hidratación de una pasta de cemento, lo que permite trazar la variación de temperatura en función del tiempo. Conociendo las constantes del equipo y la masa del cemento, es posible determinar la curva calor-tiempo (Beaudoin y Odler, 2019).

1) Calorimetría:

La calorimetría consiste en la medición del calor y la tasa de producción de calor, siendo una de sus aplicaciones más antiguas y comunes el estudio de la hidratación del cemento. Existen varios tipos de calorímetros que se emplean en la industria del cemento, entre los cuales las técnicas más utilizadas son la calorimetría isotérmica y la semiadiabática, que miden

directamente la tasa de producción de calor, es decir, la velocidad a la que se hidrata la pasta o el mortero.

En la calorimetría isotérmica, se utiliza un sensor de flujo de calor para medir la tasa a la que se genera calor, el cual se transfiere hacia un disipador en un ambiente termostático. Conociendo la capacidad calorífica de una muestra de referencia, se determina la calorimetría como la diferencia entre la señal de la muestra y la de referencia. En cambio, en un calorímetro semiadiabático, la muestra es aislada, permitiendo la medida del aumento de temperatura mediante la hidratación del cemento.

A través del estudio de las curvas calorimétricas, es posible subdividir el proceso de hidratación del cemento en distintas etapas, como reacciones tempranas, período de inducción, y fases de aceleración o desaceleración. Estas etapas proporcionan información sobre el comportamiento de los diferentes componentes del cemento y la velocidad a la que se hidratan. Además, si se conocen las entalpías de hidratación de las fases del cemento, se pueden obtener valores aproximados del grado de hidratación de cada uno de los componentes a partir de los resultados del ensayo. Los cuales pueden verse afectados por varios factores, destacando la preparación de la muestra. Esto incluye tanto el proceso de mezclado como la carga de la pasta en el equipo de ensayo. La manera en que se prepara la mezcla es fundamental, ya que la intensidad o energía aplicada durante el mezclado influye en la tasa de hidratación (Scrivener, Snellings y Lothenbach, 2016).

Cuando la muestra se coloca en el calorímetro, siempre se observará un pico pronunciado al inicio del ensayo, debido a la diferencia entre la temperatura de la mezcla y la temperatura del calorímetro. Si la temperatura del laboratorio es superior a la del calorímetro, el pico será positivo, indicando un proceso exotérmico. Por el contrario, si la muestra presenta una temperatura inferior a la del calorímetro, el pico obtenido será negativo. Al analizar los resultados, es importante no incluir este pico inicial, ya que generalmente no forma parte del proceso de hidratación del cemento. En el caso del cemento portland, se ha demostrado que es posible desestimar los resultados de los primeros 30 minutos (Justs et al., 2014).

Para facilitar la comprensión del tema, es común analizar la hidratación de los compuestos del clínker como fases independientes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, durante la hidratación del cemento, existen interferencias entre los distintos compuestos (AATH, 2012).

- Silicato Tricálcico (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998) :

El proceso de hidratación del C_3S se puede dividir en cinco estados bien definidos (Figura 2.2). Al entrar en contacto con el agua, se observa un período de alta liberación de calor en los primeros 15 minutos (Estado I), durante el cual se disuelve una pequeña parte de los silicatos, seguido de una rápida desaceleración (Estado II). Existen diversas teorías que intentan explicar este fenómeno de desaceleración en la hidratación del C_3S , entre las cuales destaca la formación de una delgada capa de hidratos sobre la superficie de las partículas no hidratadas, que inhibe y ralentiza la reacción.

Durante las siguientes 2 a 4 horas (Estado II), se produce un período inactivo conocido como "período durmiente", en el cual las partículas de silicato comienzan a disolverse, saturando el agua con iones de calcio e hidroxilos. Este estado durmiente representa el

lapso durante el cual el hormigón puede ser transportado, colocado y compactado, antes de iniciar la etapa de fraguado.

Cuando la disolución alcanza un estado de sobresaturación, comienza la precipitación de los compuestos, lo que aumenta la velocidad de la reacción y la liberación de calor (Estado III). En esta fase, los productos comienzan a precipitar, marcando el inicio del fraguado y, en consecuencia, la rigidez y endurecimiento del sistema. Esta etapa finaliza con la máxima liberación de calor alcanzada por el C_3S .

Posteriormente, se inicia un segundo período de desaceleración (Estado IV), donde continúa la formación de productos de hidratación, pero la liberación de calor disminuye hasta llegar a un período estacionario (Estado V), en el que la curva de liberación de calor se vuelve asintótica con el tiempo.

El proceso de hidratación descrito puede verse afectado por diversos factores que influyen en la reacción del C_3S . A medida que aumenta la relación agua/aglomerante o la temperatura exterior, se incrementa la velocidad de hidratación. Además, la presencia de álcalis o iones extraños pueden acelerar inicialmente este proceso. Mientras que la incorporación de yeso, sales, aditivos o adiciones pueden modificar su curso.

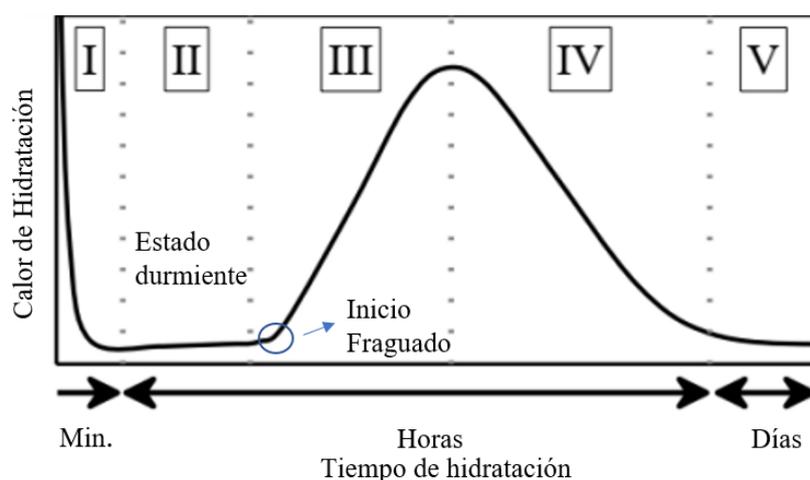


Figura 2.2. Calorimetría típica del C_3S (Beaudoin y Odler, 2019)

- Silicato Dicálcico:

El C_2S presenta un mecanismo de reacción similar a la del C_3S pero la hidratación se desarrolla más lentamente (AATH, 2012).

- Aluminato Tricálcico (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998):

Como muestra la Figura 2.3, al entrar en contacto el cemento con el agua, el C_3A experimenta rápidamente una cristalización metaestable que provoca un fraguado instantáneo. En presencia de yeso, el C_3A reacciona con los iones de sulfato para formar etringita, que precipita en pequeñas agujas prismáticas hexagonales. Esta etringita cubre la superficie de los granos, disminuyendo su solubilidad. Además, se puede

observar un segundo pico en la curva de calorimetría, que se debe a la transformación de la etringita en monosulfato, un proceso que generalmente ocurre entre las 12 y las 36 horas, una vez que el yeso ha sido consumido completamente.

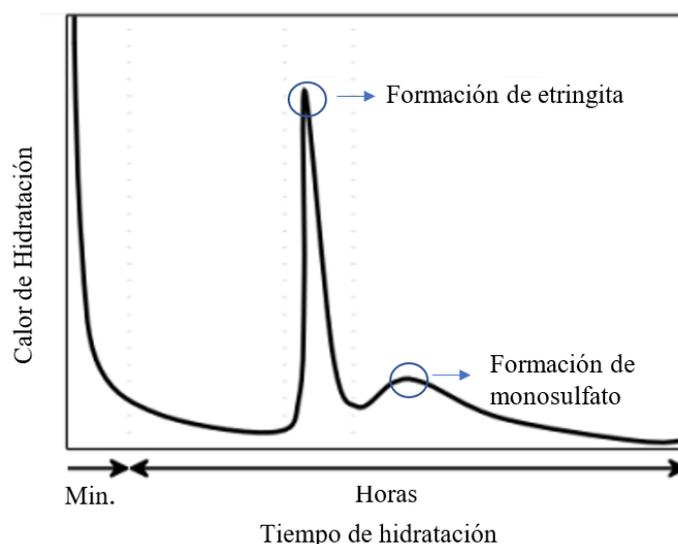


Figura 2.3. Curva calorimétrica típica para el C_3A (Beaudoin y Odler, 2019)

- FerroAluminato Tetracálcico:

El C_4AF presenta una secuencia de hidratación similar a la del C_3A , pero a velocidades más lentas y con una menor liberación de calor. A diferencia del C_3A , la hidratación del C_4AF no se produce instantáneamente en ausencia de yeso, ya que su reacción ocurre de manera más gradual. Además, la presencia de yeso retarda su hidratación, incluso en mayor medida que la del C_3A (AATH, 2012).

Hidratación del sistema (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998):

Al analizar la hidratación de todo el sistema como muestra la Figura 2.4, se observa una superposición de los mecanismos de hidratación de todos los componentes del cemento, lo que genera una mayor dificultad en el análisis de los resultados. La hidratación del sistema se puede subdividir en cuatro fases: el período de Pre-Inducción (I), que ocurre en los primeros minutos; el Período de Inducción (II), que se desarrolla durante las primeras horas; el Período de Aceleración (III), que generalmente se da entre las 3 y las 12 horas después del inicio de la hidratación; y el Período Posterior a la Aceleración (IV (horas posteriores) y V(días)).

- Período de Pre-Inducción:

Inmediatamente después de que el cemento entra en contacto con el agua, y durante los primeros minutos, se da una rápida disolución de iones en la fase líquida, comenzando con la precipitación de los productos hidratados del cemento. Inicialmente el sulfato se disuelve de forma instantánea, cargando el agua de iones. El C_3S comienza a disolverse, generando una pequeña capa de CSH que precipita en la superficie de las partículas de cemento e inhibe

posteriormente la reacción, hidratándose durante esta fase únicamente entre un 2% y un 10% del C_3S . Simultáneamente, el C_3A se disuelve y reacciona con los iones de sulfato presentes en el agua, generando etringita que también precipita sobre las partículas de cemento inhibiendo la hidratación. Si bien depende del cemento, se conoce que la hidratación del C_3A en esta fase varía entre un 5% y un 25%. Y sólo una pequeña fracción del C_2S reacciona en la pre-inducción, produciendo CSH y aportando iones a la fase líquida. Este período se encuentra representado por la etapa I de la Figura 2.4.

- Período de Inducción:

Después del período de pre-inducción, en el cual las reacciones se producen rápidamente, se inhibe la hidratación, lo que provoca una disminución significativa en la velocidad de precipitación de los productos durante las primeras horas. Esto permite el transporte, colocación y compactación de la mezcla. Este período se encuentra representado por la etapa II de la Figura 2.4.

- Período de Aceleración:

Durante esta etapa la hidratación del cemento se acelera (etapa III), resultando en el crecimiento de los productos de hidratación. La velocidad de reacción del C_3S y del C_2S incrementa, dando lugar a la formación de CSH. El CH comienza a precipitar, disminuyendo gradualmente la concentración de iones de calcio en la fase líquida. Durante esta etapa se da la liberación máxima de calor, representada por el pico C-S-H en la Figura 2.4. El sulfato de calcio se disuelve completamente, reaccionando con los aluminatos y precipitando en etringita.

- Período Posterior a la Aceleración:

La velocidad de reacción de los componentes se ve disminuida gradualmente a medida que disminuye la cantidad de material sin hidratar (IV). Los CSH siguen precipitando en forma continua y diferida en el tiempo mientras continua la hidratación del C_3S y particularmente del C_2S que reacciona lentamente. Una vez consumido todo el sulfato disponible en la fase líquida, finaliza la formación de etringita volviéndose la misma a disolver para precipitar en monosulfato.

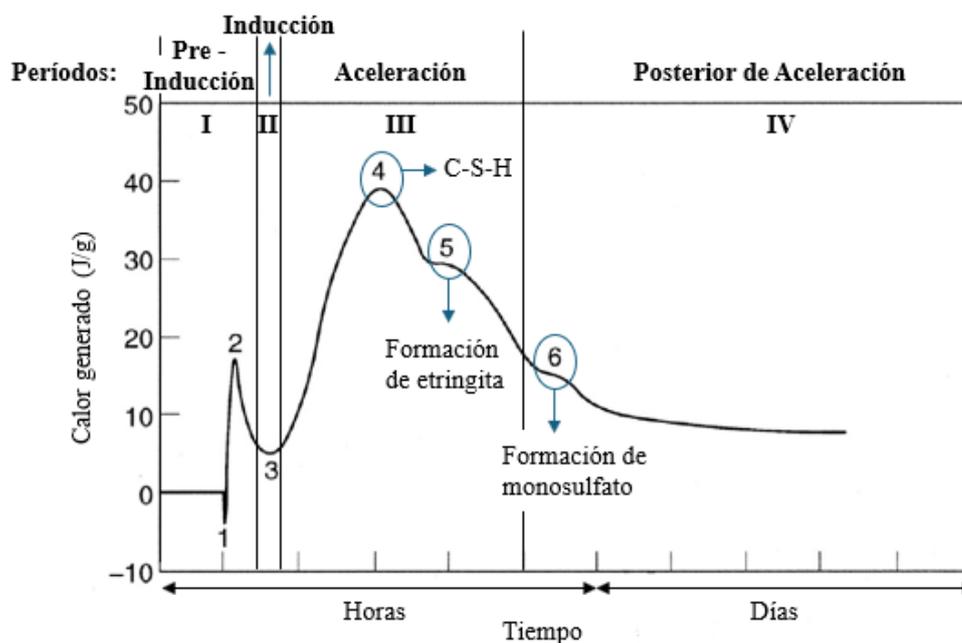


Figura 2.4. Hidratación del cemento (Beaudoin y Odler, 2019)

C. Factores que afectan la hidratación del cemento

Diversos factores influyen en la hidratación del cemento, entre los más importantes están la relación agua/cemento y la finura del material. Cuando la relación agua/cemento es suficientemente alta y el cemento posee una finura adecuada (menor a $45\ \mu\text{m}$), el proceso de hidratación puede completarse, consumiendo todo el cemento disponible. No obstante, si las partículas de cemento no son lo suficientemente finas, incluso con una relación agua/cemento elevada, es posible que el cemento no se hidrate por completo. Asimismo, cuando la relación agua/cemento es baja, las reacciones de hidratación pueden detenerse, dejando partículas sin hidratar debido a la insuficiencia de agua necesaria para completar el proceso en todas las partículas de cemento.

La finura del cemento representa una propiedad importante a la hora de evaluar su reactividad, ya que un conjunto de partículas finas de Clinker reaccionará más rápidamente que una sola partícula de la misma masa; esto se debe al aumento del área superficial en contacto con el agua.

Generalmente, la finura del cemento se expresa en términos de área de superficie específica (ssa) y se calcula mediante un ensayo que determina la permeabilidad al aire, midiendo el tiempo de tarda un volumen conocido de aire en pasar a través de una muestra de cemento. La velocidad con la que se da este fenómeno está relacionada con el área superficial del mismo.

Una técnica alternativa para medir el tamaño de partículas es la difracción láser, que permite conocer la granulometría o distribución de partículas que componen el cemento. A partir de los resultados de este ensayo, es posible utilizar una medida diferente de finura, mediante la evaluación del residuo retenido en el tamiz $45\ \mu\text{m}$ (Malla N° 325). Considerándose que la mayoría del material retenido por este tamiz posiblemente no sea hidratada (Harrison, 2019; Neville, 1997; Hewlett, 1998 y otros).

2.1.1.5. Clasificación de Cementos Pórtland en Uruguay

La norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) contempla cinco tipos de cementos, Cemento Pórtland Normal (CPN), Cemento Pórtland con Filler Calcáreo (CPF), Cemento Pórtland Puzolánico (CPP), Cemento Pórtland con Escoria (CPE) y Cemento Pórtland Compuesto (CPC). Estableciendo sus componentes principales como muestra la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Cementos portland contemplados en la Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022)

Tipo de Cemento	Designación	Composición (g/100 g)				
		Componentes principales				Comp. Minoritarios
		Clínker+sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento Pórtland Normal	CPN	100-95				0-5
Cemento Pórtland con Filler Calcáreo	CPF	94-75			6-25	0-5
Cemento Pórtland Puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento Pórtland con Escoria	CPE	94-65		6-35		0-5
Cemento Pórtland Compuesto	CPC	94-65	Dos o tres componentes, con P + E + F entre 6 y 35% y con F ≤ 25			0-5

Actualmente, el mercado uruguayo cuenta con varias marcas de cemento Portland, la mayoría producidas por industrias locales, además de una importación proveniente de Turquía. Entre los cementos disponibles se encuentran el Cemento Portland Normal, CPN40 y CPN50 (Cemento de Alta Resistencia Inicial, ARI) que es un cemento especial y debe cumplir con la norma UNIT 1085, el Cemento Portland Compuesto, CPC40, y el Cemento Portland con Filler CPF40. Los productos ofrecidos por la industria cementera en el país están fuertemente vinculados a las adiciones disponibles, que generalmente se obtienen como residuos de otras industrias. Esto contribuye a una producción más sostenible y eficiente.

2.1.1.6. Selección del Cemento Portland para Hormigones de Alto Desempeño

Al desarrollar hormigón de alto desempeño, la elección del cemento es una de las decisiones más importantes, incluso cuando se utilizan adiciones minerales. El rendimiento del cemento influye significativamente en la reología y resistencia del hormigón, siendo crucial para aumentar la resistencia a la compresión. Generalmente, con la mayoría de los cementos es posible producir hormigones convencionales con resistencias que varían entre 20 MPa y 50 MPa. Sin embargo, cuando se requiere superar los 50 MPa, como en el caso de los hormigones

de alto desempeño, algunos cementos dejan de ser adecuados. Esto se debe a que, si bien los cementos pueden ofrecer un buen desempeño en términos de resistencia final, su comportamiento reológico puede no ser el óptimo, o viceversa.

Al elegir un cemento para hormigón de alto desempeño, es recomendable optar por aquel que contenga la menor cantidad posible de C_3A , preferentemente con una estructura cúbica o una mezcla entre cúbica y ortorrómbica. La reología del cemento está influenciada por la cantidad de C_3A y la formación de etringita; cuanto más cúbica sea la estructura del C_3A , más fácil será controlar su reología. La morfología del C_3A está controlada por la cantidad de álcalis atrapados en él. Cuando la concentración de Na_2O es inferior al 2,4%, el C_3A mantiene su estructura cúbica; en concentraciones entre 2,4% y 3,8%, presenta una estructura parcialmente ortorrómbica, volviéndose completamente ortorrómbica en valores cercanos al 3,8%. Este análisis también es aplicable al K_2O , lo que subraya la importancia de controlar la cantidad de álcalis en el cemento para gestionar la morfología del C_3A . Durante la hidratación, los álcalis se volatilizan y reaccionan con el óxido de azufre (proveniente de las materias primas o del combustible utilizado) para formar sulfatos, lo que reduce la cantidad disponible para ser atrapada por el C_3A . Por lo tanto, es posible controlar la morfología del C_3A manteniendo un equilibrio adecuado entre los álcalis y el azufre (Aïtcin, 1998).

Otro aspecto relevante es la finura óptima del cemento. A medida que disminuye el tamaño de las partículas, aumenta la resistencia, ya que una mayor proporción de silicatos está en contacto con el agua. Sin embargo, desde el punto de vista reológico, a medida que aumenta la finura del cemento, las fases reaccionan más rápidamente, lo que incrementa la formación de etringita (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

Desde el punto de vista de la resistencia, se recomienda que el cemento tenga una finura elevada y una alta cantidad de C_3S . Aunque es posible determinar la finura del cemento mediante el ensayo de superficie específica de Blaine y obtener una aproximación del contenido de C_3A y C_3S mediante la fórmula de Bogue, no es fácil obtener la estructura cristalina del C_3A ni la velocidad de solubilidad de los sulfatos. Al analizar una muestra de cemento mediante difracción de rayos X (DRX), puede no ser posible obtener información sobre la forma polimórfica del C_3A ni de los sulfatos, ya que los picos son demasiado pequeños en comparación con los del C_3S y C_2S (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

Finalmente, el cemento óptimo será aquel que logre una adecuada optimización entre la trabajabilidad y la resistencia. Para su control de calidad, se recomienda medir la finura de Blaine y analizar mediante DRX, así como llevar a cabo un estudio de compatibilidad entre el cemento y el aditivo (Aïtcin, 1998).

2.1.2. Adiciones

En los últimos años, se ha demostrado que la incorporación de adiciones minerales en el cemento u hormigón puede no solo mantener, sino también mejorar algunas de sus propiedades. Esta práctica permite disminuir el consumo de cemento o clinker, lo que a su vez reduce el impacto ambiental asociado con la emisión de dióxido de carbono durante su fabricación. Además, en algunos casos, la utilización de adiciones minerales puede disminuir el costo final del hormigón y optimizar el uso de recursos no renovables.

Las adiciones minerales presentan una amplia clasificación, pudiendo ser catalogadas por su forma de producción en naturales y artificiales, por su origen como orgánicas o inorgánicas, por su procesamiento en tratadas artificialmente o sin tratar, y por su interacción con el cemento en activas o inactivas.

Las adiciones activas e inactivas, también conocidas como físicamente o fisicoquímicamente activas, suelen proceder de desechos industriales como la ceniza volante, humo de sílice o escoria granulada de alto horno, y pueden incorporarse al hormigón como reemplazo parcial del cemento o del agregado fino, modificando sus propiedades. Las adiciones físicamente activas son minerales sólidos con tamaños de partículas inferiores a 75 μm . Su principal efecto al añadirse al hormigón es la dispersión de las partículas de cemento, lo que mejora la accesibilidad del agua y, por tanto, optimiza las condiciones de hidratación. Por otro lado, las adiciones fisicoquímicamente activas no solo tienen este mismo efecto, sino que también reaccionan químicamente para formar productos que pueden o no aportar a las propiedades mecánicas del hormigón.

Las adiciones hidráulicas, como las puzolanas, reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento para formar silicatos de calcio hidratado, similares a los que se generan durante la hidratación del cemento portland. Estas adiciones incluyen cenizas volantes, humo de sílice, arcillas activadas, entre otras. Finalmente, las adiciones auto puzolánicas, como las escorias granuladas de alto horno y algunas cenizas volantes, contienen óxido de calcio libre, que aporta el hidróxido de calcio necesario para la reacción puzolánica (AATH, 2012; Siddique.R yKhan.M, 2011).

A continuación, se detallan algunas adiciones minerales:

Filler Calcareo:

La caliza molida, denominada por la norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) como filler calcáreo, es un material inorgánico, natural o artificial, que mejora las propiedades físicas del cemento. Entre los materiales que pueden ser caracterizados como filler, la piedra caliza es la que presenta la mejor relación costo/efectividad, motivo del crecimiento de su implementación en hormigón durante los últimos años (AATH, 2012).

Polvo Electrofiltro:

El polvo electrofiltro (PEF) es un subproducto de la fabricación de cemento portland. Su utilización en la industria del hormigón permite incorporarlo como una adición inactiva en la fabricación de hormigón, lo que contribuye a reducir el consumo de cemento y fomenta la sostenibilidad. Algunos estudios realizados en el país han demostrado que su implementación como sustitución del cemento, produce una disminución de la resistencia por la disminución del cemento (Rodríguez et al., 2008), pero permite mejorar la compacidad de la mezcla logrando una matriz más densa y menos porosa.

Puzolanas Naturales y Artificiales:

Las puzolanas naturales provienen de rocas de origen volcánico o sedimentario con naturaleza orgánica. Las puzolanas de origen volcánico son producidas por erupciones, en las que el magma es proyectado a la atmósfera en pequeñas partículas que se enfrían rápidamente, generando cenizas volcánicas que no alcanzan a desarrollar estructuras cristalinas y quedan mayoritariamente en estado vítreo. Las puzolanas de origen sedimentario se componen por

minerales con altos contenidos de sílice hidratada, formados en yacimientos submarinos debido a la acumulación de esqueletos y caparazones de algas acuáticas unicelulares.

Las puzolanas artificiales son materiales obtenidos como residuos en diversos procesos industriales y/o agrícolas, entre las cuales se encuentran las arcillas calcinadas, el humo de sílice, las cenizas volantes y las cenizas de cáscara de arroz (AATH, 2012). Las *arcillas calcinadas* se obtienen a través del proceso de calcinación de las arcillas, que son rocas sedimentarias formadas por la meteorización de silicatos en condiciones de alta presión y temperatura. Cuando estas arcillas calcinadas entran en contacto con agua y cal, experimentan un proceso de hidrólisis que les confiere propiedades aglomerantes y, en algunos casos, desarrollan resistencia mecánica. Entre las diversas arcillas, los caolines son los más adecuados para la activación térmica, ya que su tratamiento a altas temperaturas provoca la pérdida de agua.

El metacaolín es un material fino de color gris claro o blanco, compuesto en su mayoría por sílice, alúmina y minoritariamente cuarzo, cuyos diámetros medios de partículas varían entre valores de 4,70 y 12,46 μm y su superficie específica se encuentra comprendida entre 310 m^2/kg y 1.500 m^2/kg (Siddique, 2008; AATH, 2012).

El *humo de sílice o microsíllice*, es un subproducto que se recoge de los filtros de manga, cuando se genera la reducción de cuarzo con carbón en los hornos de arco eléctrico durante la producción de silicio y aleaciones ferrosilicias. Es un material de color variable entre gris claro y oscuro, constituido por partículas esféricas muy finas, menores a 1 μm , diámetro medio de 0,1 μm y superficie específica alrededor de 20.000 m^2/kg (AATH, 2012; Siddique.R yKhan.M, 2011).

Las *cenizas de cáscara de arroz* son un residuo proveniente de la industria arrocería, generado durante la quema de la cáscara de arroz. Cuyo tamaño medio de partículas ronda los 7 μm y la superficie específica se encuentra en el orden de 50.000 m^2/kg (AATH, 2012). Las *cenizas volantes* son residuos obtenidos de la combustión del carbón pulverizado en usinas termoeléctricas. El color varía de gris claro a oscuro, su tamaño está comprendido entre 0,5 y 100 μm (Siddique, 2008).

Escoria Granulada de alto horno:

La Norma UNIT 20:2022 define la Escoria Granulada de alto horno como “Material granular vítreo formado cuando la escoria de alto horno en estado líquido es enfriada bruscamente” (UNIT, 2022). Cuando la escoria obtenida de la producción de arrabio en el alto horno es enfriada bruscamente, se dificulta la cristalización produciendo que endurezca de manera vítrea. La medida con la que hayan logrado vitrificar, definirá posteriormente las propiedades hidráulicas y consecuentemente su aporte al hormigón cuando es adicionado al cemento. Una vez enfriada, es molida en partículas menores a 45 μm , cuya superficie específica comprende valores entre 400 m^2/kg . y 500 m^2/kg . Su composición química dependerá de los minerales de hierro, del combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. Su composición mineralógica depende del tipo de enfriamiento utilizado (Siddique, 2008; AATH, 2012).

2.1.2.1. Influencia sobre el Hormigón

La implementación de adiciones minerales en el hormigón modifica el comportamiento fisicoquímico del mismo, afectando sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido (AATH, 2012). Por su finura, textura superficial y microestructura, las adiciones afectan la demanda de agua, alterando las propiedades reológicas de la mezcla, mejorando la cohesión y la estabilidad del hormigón (Aïtcin, 1998).

Mediante el uso de adiciones se espera mejorar la trabajabilidad, reduciendo la exudación y la segregación, además de contribuir a la compacidad de la mezcla (Aïtcin, 1998). La implementación de adiciones minerales afecta la velocidad de hidratación y la cantidad de calor producido durante este proceso, cuyos valores ahora no dependen sólo del cemento sino también de la adición incorporada y de la compatibilidad entre ambos. Ahora se introduce el concepto de relación agua/aglomerante, que ya no considera únicamente el cemento incorporado, sino también las adiciones que tienen capacidad aglomerante (AATH, 2012).

Cuando se utilizan adiciones activas en la fabricación de hormigón, las resistencias obtenidas pueden verse significativamente influenciadas. En general, estas adiciones tienden a aumentar las resistencias a edades tardías. Sin embargo, en las etapas tempranas, los resultados pueden verse afectados tanto positivamente como negativamente. El efecto filler, que se refiere al impacto físico de las partículas que incrementan la velocidad de hidratación, puede mejorar la resistencia inicial. Por otro lado, la reacción puzolánica, que generalmente reduce la ganancia de resistencia en las primeras etapas, contribuye a un aumento en la resistencia a edades avanzadas (Hewlett, 1998; Beaudoin y Odler, 2019; Neville, A.M., 2011; Aïtcin, 1998).

La implementación de adiciones colabora en la durabilidad del hormigón armado manteniendo, en algunos casos, el medio básico necesario para la pasividad de las armaduras (a partir del aumento de la cantidad de hidróxido de calcio). El refinamiento que aportan las adiciones en el tamaño de los poros y de los granos ayuda a densificar la matriz de hormigón y consecuentemente disminuir su porosidad y permeabilidad, dificultando el ingreso de agentes externos que aceleran la corrosión del acero (AATH, 2012).

La implementación de adiciones minerales permite mejorar tanto la resistencia como la impermeabilidad del hormigón, aportando cierto grado de control en el problema de pérdida de asentamiento que puede producirse al utilizar aditivos superplastificantes. Finalmente, el desempeño de una mezcla con adiciones minerales y la compatibilidad entre los aglomerantes utilizados dependerá del tamaño de partículas, de las características hidráulicas, del grado de dispersión y de las condiciones de curado implementadas (Aïtcin, 1998).

2.1.2.2. Adiciones en Uruguay

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de las adiciones minerales se obtienen como residuos de otras industrias, tales como la producción de arrabio, la reducción de cuarzo con carbón en hornos de arco eléctrico, y la combustión de carbón pulverizado en plantas termoeléctricas. Esto implica que su disponibilidad está vinculada al desarrollo industrial del país. Actualmente, la mayoría de las empresas cementeras en Uruguay cuentan con piedra caliza, que se utiliza como componente principal en la fabricación del clínker. Además, aprovechan este recurso para obtener filler calcáreo, ofreciendo cementos compuestos o

cementos fillerizados que contribuyen a reducir la huella de carbono y promueven la sostenibilidad ambiental.

A nivel local, destacan las investigaciones sobre el uso de adiciones minerales en la fabricación de hormigón, centradas en la evaluación de residuos como la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y el polvo de electrofiltro (PEF) para la elaboración de hormigones convencionales, de alta resistencia y autocompactantes (Rodríguez et al., 2008). Como resultado, la cáscara de arroz se utiliza actualmente como combustible alternativo en la producción de clínker, en lugar de ser empleada como adición potencial en la fabricación de hormigón Rodríguez de Sensale, 2000; Rodríguez de Sensale, Rodríguez Viacava, 2018; Rodríguez de Sensale, Rodríguez Viacava, Godoy, 2015; Rodríguez de Sensale; Romay, Costa, 2012; Rodríguez et al., 2008).

Por otro lado, las investigaciones sobre el uso de PEF como filler en hormigones autocompactantes (Rodríguez et al., 2008) permitieron que, en la actualidad, la empresa Cementos Artigas incorpore este material como sustituto del cemento en su producción de hormigón. Esto ha generado una reducción significativa en el consumo de toneladas de cemento, marcando un avance importante en términos de sostenibilidad.

Entre los materiales que hoy en día se comercializan en el país, es posible encontrar el humo de sílice, cuya implementación incrementa significativamente el costo del hormigón al ser una adición importada con un precio aproximado de 75 pesos uruguayos / kilo (un 30% mayor al precio del cemento).

2.1.2.3. Selección de adiciones minerales para Hormigón de Alto Desempeño

La literatura consultada indica que es posible fabricar hormigones de alto desempeño con resistencias que oscilan entre 50 MPa y 100 MPa utilizando diversos sistemas aglomerantes. Estos sistemas pueden incluir hormigones compuestos exclusivamente por cemento portland, así como aquellos adicionados con cenizas volantes, humo de sílice y escoria de alto horno. Sin embargo, para desarrollar hormigones con resistencias que rondan entre 100 MPa y 125 MPa es necesario incorporar humo de sílice, lo que incrementa el costo final de la mezcla.

Si bien es factible elaborar una mezcla de hormigón de alto desempeño utilizando exclusivamente cemento Portland, se recomienda la incorporación de cenizas volantes o escoria. Esto no solo permite reducir la cantidad de cemento utilizado, sino que también contribuye a disminuir los costos, así como a optimizar la dosis de superplastificante. En general, se sugiere un 15% de cenizas volantes como sustitución del cemento en la formulación de hormigones de alto desempeño (Aïtcin, 1998).

En el contexto de este trabajo, dado que en Uruguay no se dispone de cenizas volantes ni escorias, y la utilización de humo de sílice está fuera del alcance del proyecto, se optó por desarrollar hormigón de alto desempeño utilizando exclusivamente los materiales disponibles. Esto implicó trabajar con un sistema aglomerante compuesto únicamente por Cemento Portland. Sin embargo, el cemento empleado fue el CPC40, que contiene un alto porcentaje de filler calcáreo como parte de su composición.

2.1.3. Aditivos

Los aditivos son compuestos químicos en forma de líquidos o polvos adicionados en pequeñas dosis al hormigón, cuya finalidad es mejorar sus características en estado fresco y/o en estado endurecido. A continuación, se realiza una breve reseña de los aditivos más comúnmente utilizados en hormigón y su influencia (Gómezjurado Sarriá y Sánchez de Guzmán, 1997; AATH, 2012; Kosmatka et al., [s.f.]):

Aditivos reductores del agua de amasado:

Los aditivos reductores de agua son agentes dispersantes diseñados para disminuir el contenido de agua en una mezcla sin alterar su consistencia. Estos aditivos no solo facilitan el manejo de la mezcla, sino que también pueden influir en el fraguado del cemento, provocando un retraso en este proceso. Se caracterizan por tener una parte hidrófoba que se adsorbe rápidamente al cemento, evitando su floculación, y una parte hidrófila compuesta principalmente por grupos carboxilatos, como jabones, o sulfonatos, como detergentes.

Debido a las cargas electrostáticas en las superficies de las partículas, el cemento tiende a flocular al entrar en contacto con el agua, atrapando moléculas de agua entre los flóculos. La utilización de aditivos reductores de agua ayuda a disminuir e incluso eliminar estos flóculos, lo que posibilita que toda el agua de mezclado esté disponible, tanto para la hidratación de las partículas aglomerantes como para mejorar la trabajabilidad del hormigón. Cuando se emplean pequeñas dosis de aditivos, la reducción del agua está mayormente controlada por la calidad del aditivo utilizado. Sin embargo, la dosis máxima suele estar limitada por el posible retraso en el tiempo de fraguado.

Dentro de los aditivos reductores de agua de amasado se encuentran los *Fluidificantes* (reductores convencionales o *plastificantes* y *reductores de medio rango*), los *superplastificantes* y los *hiperplastificantes*.

Los reductores convencionales o *plastificantes* derivan de la combinación química de ácidos carboxílicos hidroxilados y carbohidratos, y se utilizan en dosis que varían entre el 0,2% y el 0,5% en peso del aglomerante. Estos aditivos suelen aplicarse en hormigones con relaciones agua/aglomerante superiores a 0,45 y asentamientos entre 12 y 15 cm, logrando una reducción de agua del 5% al 8%.

Los *reductores de agua de medio rango*, compuestos principalmente por lignosulfonato de sodio y de calcio, contienen azúcares que pueden generar un retraso en el tiempo de fraguado del cemento. La cantidad de azúcares presentes en la materia prima influye en la dosis del aditivo, que puede oscilar entre el 0,3% y el 1% del peso del aglomerante. Estos aditivos se aplican en hormigones con relaciones agua/aglomerante entre 0,40 y 0,45, y con asentamientos entre 15 cm y 18 cm. Su implementación permite reducir el contenido de agua en un rango del 6% al 18%.

Los *superfluidificantes* o *hiperplastificantes* son aditivos cuya base química principal está compuesta por polisulfonatos, como los naftalenos y melaminas, pudiendo ser también policarboxilatos. Es muy importante estudiar la compatibilidad entre el cemento y estos aditivos, ya que los sulfonatos pueden reaccionar con el C₃A cuando el cemento no libera rápidamente los iones de sulfato aportados por el yeso. Los policarboxilatos generan una barrera que impide el contacto de las partículas, además de la repulsión entre ellas. Sin

embargo, cuando se emplean altas cantidades, suelen ser muy propensos a incorporar aire en la mezcla de hormigón. Suelen ser utilizados en hormigones con relación agua/aglomerante entre 0,29 y 0,31 y hormigones con asentamientos mayores a 18 cm, principalmente fluidos y autocompactantes. Permitiendo reducir entre un 12% y 30%, cuando son superplastificante y hasta un 40% cuando son hiperplastificantes.

Aditivos Modificadores del fraguado y la resistencia inicial:

Los aditivos modificadores del fraguado y de la resistencia inicial influyen en la cinética de la hidratación del cemento, ya sea acelerando o retardando las reacciones químicas. Los *aditivos aceleradores* actúan principalmente sobre los silicatos de calcio (C_2S y C_3S), promoviendo la disolución de la cal y acelerando la hidratación, lo que resulta en un desarrollo más rápido de la resistencia inicial. Estos aceleradores también pueden influir en los aluminatos de calcio (C_3A), facilitando la disolución del óxido de aluminio.

Los *aditivos retardadores* se utilizan para retrasar el proceso de fraguado, prolongando el tiempo durante el cual el hormigón se mantiene trabajable. Los retardadores suelen estar compuestos por lignosulfonatos, ácidos carboxílicos y sus sales, como el gluconato de sodio o calcio, ácido cítrico y glucónico, además de hidratos de carbono, como glucosa, sacarosa, almidón y celulosa. Estos compuestos actúan enlenteciendo la reacción entre el cemento y el agua, ralentizando el fraguado del hormigón. Es común que los aditivos retardadores también funcionen como aditivos reductores de agua, lo que mejora la trabajabilidad de la mezcla además de prolongar el tiempo de inicio de fraguado, permitiendo manejar el hormigón por períodos más largos sin perder consistencia ni calidad.

Los *aditivos retardadores del fraguado* se utilizan cuando es necesario extender el tiempo de transporte y colocación del hormigón, como en obras de gran tamaño o en climas cálidos, donde el fraguado rápido puede ser un problema. Las dosis recomendadas para retardadores suelen ser relativamente bajas, generalmente entre el 0,2% y el 0,4% del peso del cemento. Los *aditivos aceleradores del fraguado* son empleados principalmente para acelerar la ganancia de resistencia inicial del hormigón, facilitando el desencofrado en tiempos más cortos. Esto es particularmente útil en proyectos con tiempos ajustados o en condiciones de bajas temperaturas donde el fraguado es más lento. A medida que estos aditivos incrementan la resistencia a edades tempranas (como a los 7 días), se observa una disminución en la tasa de ganancia de resistencia a los 28 días, debido a la rápida hidratación de los componentes del cemento. Las dosis recomendadas para los aceleradores son más altas que las de los retardadores, oscilando entre el 1% y el 5% del peso del cemento.

2.1.3.1. Selección de aditivos para Hormigón de Alto Desempeño

La implementación de aditivos permite optimizar las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido, mejorando la calidad y aumentando su vida útil. La elección del tipo de aditivo dependerá de la característica que se quiera mejorar, ya sea la trabajabilidad y consistencia del hormigón para relaciones agua/cemento muy bajas, la ganancia de resistencia y/o la durabilidad (AATH, 2012). De esta manera, una correcta selección de los aditivos dependerá principalmente del desempeño y de los resultados que se busquen obtener luego de su implementación (Harrisson, 2019).

Para el desarrollo de hormigón de alto desempeño, es fundamental utilizar un aditivo superplastificante eficiente. La literatura destaca que no todos los superplastificantes tienen la misma eficacia para dispersar las partículas de cemento, e incluso pueden presentarse problemas de compatibilidad. Este problema suele estar relacionado con la velocidad de precipitación de la etringita, lo que hace crucial evaluar la compatibilidad entre el aglomerante y el aditivo antes de su uso (Aïtcin, 1998).

El éxito en la incorporación de los aditivos depende de la dosificación adecuada, comenzando generalmente con la dosis recomendada por el fabricante. Posteriormente, se ajusta mediante ensayos en laboratorio, como calorimetrías, pruebas con el cono de Marsh o la elaboración de hormigones de prueba. Una vez que se determina la dosis correcta en laboratorio, es esencial replicar la mezcla a escala industrial para ajustar la dosis final y asegurar el comportamiento óptimo del hormigón en condiciones reales (Harrisson, 2019).

2.2. Metodología

Se caracterizaron y analizaron los cementos, adiciones y aditivos con el objetivo de evaluar su aptitud y compatibilidad para su implementación en hormigones de alto desempeño. El enfoque inicial consistió en lograr un hormigón con las propiedades requeridas utilizando los materiales disponibles en ambas plantas (de cementos y de hormigones). Seleccionando materiales como el cemento CPC40 y dos tipos de fillers, PEF1 y PEF2, que ya forman parte del proceso de producción. Adicionalmente, por interés de la empresa, se fabricó y evaluó un cemento de distinta composición química (CPC50) y se analizaron diferentes métodos de molienda: en molino vertical (CPC50V) y en molino de bolas (CPC50B).

Para los aditivos, se seleccionaron reductores de agua de distintos proveedores y un inhibidor de hidratación (IH) implementado en la evaluación de la mezcla a escala industrial. La Tabla 2.4 resume los datos técnicos de los aditivos reductores de agua e inhibidor de hidratación seleccionados, obtenidos de las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes.

Tabla 2.4. Aditivos seleccionados y datos técnicos de los proveedores

Aditivos	Base Química	Densidad (kg/l)	Cont. Sólidos (%)	Dosificación recomendada*	
A1	Policarboxilatos	~ 1,095	[33,5-36,5]	[0,3% – 1,1%]	
A2	Lignosulfonato	~ 1,200	[34,0-40,0]	[0,3% – 0,6%] [0,6% – 1,2%]	
Reductores de agua	A3	Policarboxilatos	~ 1,100	[33,5-36,5]	[0,2% – 1,1%]
	A4	Policarboxilatos modificados	~ 1,080	[33,0-37,0]	[0,2% – 1,1%]
	A5	-	[1,055-1,095]	-	[0,2% – 1,2%]
A6	Policarboxilatos	[1,045-1,085]	-	[0,4% – 1,1%]	
Inhibidor de hidratación	A7	-	[1,105-1,125]	-	[0,25% – 3,0%]

*En relación con la masa de cemento.

A continuación, se indica la metodología seguida para la caracterización de cementos y adiciones, así como, la compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos.

2.2.1. Caracterización de Cementos y Adiciones

La caracterización se realizó mediante ensayos a nivel micro y macroscópico. La composición química y las fases minerales se analizaron mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX), respectivamente. Los ensayos físicos y mecánicos incluyeron: Retenido en Tamiz 45 μm , finura de Blaine (UNIT – NM 76 (UNIT, 1998a)), consistencia para pasta normal (APN) (UNIT – NM 43 (UNIT, 2004a)), inicio y final de fraguado (FI – FF) (UNIT – NM 65 (UNIT, 2004b)), resistencia a compresión a 1, 7 y 28 días (UNIT – ISO 679 (UNIT, 2009)) y granulometría por difracción láser. La morfología de las partículas se analizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido. Esta caracterización se realizó con fines de investigación, no se prevé su implementación como parte del control de calidad habitual en la elaboración del producto.

2.2.1.1. Ensayos Químicos

A. Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X es un método no destructivo que permite analizar cualitativa y cuantitativamente los elementos químicos de una muestra. Este método se basa en la medición de las intensidades de las líneas espectrales de rayos X emitidas por excitación secundaria. Para minimizar efectos mineralógicos o de tamaño de partículas, el ensayo se realiza idealmente sobre una perla de vidrio, formada a partir de la fusión de la muestra de cemento con un

fundente compuesto de tetraborato de litio, metaborato de litio y bromuro de litio (Harrisson, 2019).

Un haz primario de rayos X irradia la muestra, excitando los elementos químicos, que luego emiten líneas espectrales secundarias con longitudes de onda características de cada elemento e intensidades proporcionales a su concentración. La composición química se determina mediante la comparación de estos resultados con valores de referencia obtenidos a partir de calibraciones previas (Harrisson, 2019). El análisis de fluorescencia de rayos X fue realizado en el laboratorio de Cementos Artigas con un equipo Malvern Panalytical, modelo Axios mAX.

B. Difracción de rayos X

Las fases minerales se determinaron mediante difracción de rayos X (DRX). La DRX permite caracterizar de forma rápida y confiable los materiales cristalinos, proporcionando información cuantitativa y cualitativa sobre la estructura cristalográfica de las muestras e identificando las fases presentes. La técnica genera un patrón de DRX sobre el material cristalino, que consiste en picos de intensidad variable en ángulos de difracción característicos. El ángulo de difracción o posición de los picos está determinado por la simetría y el tamaño de la celda unitaria, mientras que las intensidades están relacionadas con la naturaleza y disposición de los átomos dentro de la celda unitaria del material cristalino (Scrivener, Snellings y Lothenbach, 2016).

El análisis cualitativo de fases se realiza comparando los picos de DRX obtenidos con patrones de fases conocidas. En la práctica, la identificación de fases menores puede ser más compleja, proporcionando una lista de sugerencias que el analista debe interpretar y confirmar a partir de otros análisis químicos y ensayos complementarios (Scrivener, Snellings y Lothenbach, 2016).

La difracción de rayos X se realizó en el laboratorio del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería con un difractómetro de polvos Philips PW 1840 con un barrido de θ - 2θ . La fuente de rayos X utilizada por el difractómetro es la radiación de la línea $K\alpha$ del cobre, con una longitud de onda de 1.5406 Å producida por medio de un tubo de rayos X con un anticátodo de Cobre. El anticátodo de Cobre se excitó con 30kV y 40 mA. El espectro se realizó variando 2θ entre 10° y 60°, con un paso de 0,1 °/s, un tiempo de integración de x s y un slit de 0,2 mm.

2.2.1.2. Ensayos Físicos

A. Inicio, Final de Fraguado (FI-FF) y consistencia de pasta normal (APN)

El inicio y el final de fraguado se determinan en el laboratorio de Cementos Artigas mediante la aguja de Vicat. Según la norma UNIT – NM 65:20024 (UNIT, 2004b), el tiempo de inicio de fraguado se define como el momento en que la aguja de Vicat penetra en la pasta de consistencia normal hasta una distancia de (4 ± 1) mm de la placa base. Por otro lado, el tiempo final de fraguado se refiere al momento en que la aguja de Vicat penetra 0,5 mm en la pasta de consistencia normal.

La norma UNIT – NM 43:2004 (UNIT, 2004a) establece que la pasta de consistencia normal es aquella en la que la sonda de Tetmajer penetra una distancia de (6 ± 1) mm desde la placa base, bajo las condiciones estipuladas. A partir de este ensayo, se determina la demanda de agua (APN), que se calcula como el porcentaje de agua necesario para obtener una pasta de consistencia normal.

B. Finura

Conocer la finura del cemento es fundamental ya que influye en propiedades clave para lograr altas resistencias, como la velocidad de hidratación y el desarrollo de calor de hidratación. A medida que aumenta la finura del cemento, crece su superficie específica, es decir, la superficie de contacto con el agua, lo que incrementa tanto la velocidad de hidratación como la resistencia final. La finura se determinó en el laboratorio de Cementos Artigas mediante dos métodos: el retenido en tamiz 45 μm , realizado con una tamizadora Hosokawa Alpine 200 LSN, y el método de Blaine (UNIT – NM 76 (UNIT, 1998a)).

C. Granulometría por difracción láser

La granulometría láser es un método rápido para determinar la distribución de tamaños de partículas mediante difracción láser. La composición granulométrica se obtiene a partir de la variación angular de la intensidad de la luz al atravesar un rayo láser a través de una muestra de partículas (Frias et Al., 1990). Para este trabajo, fue necesario conocer la granulometría de los materiales finos, ya que se utilizó para obtener la curva de mayor compacidad presentada en el Capítulo 4: “Dosificación”. El ensayo se realizó en el laboratorio de Cementos Artigas mediante un granulómetro láser Cilas, Modelo 1090.

D. Morfología de las partículas con microscopía electrónica de barrido

La morfología de las partículas se determinó en el laboratorio de la Facultad de Química mediante microscopía electrónica de barrido. La Microscopía electrónica de barrido (MEB o en inglés SEM) es una técnica avanzada para estudiar la microestructura de los materiales, aprovechando su capacidad para obtener imágenes detalladas mediante la interacción de un haz de electrones con la superficie de la muestra. En el MEB, el haz de electrones escanea la superficie en un patrón de rejilla, generando diferentes señales en función de los tipos de interacción que ocurren en un volumen conocido como "volumen de interacción". Las señales más relevantes son los electrones secundarios (SE), los electrones retrodispersados (BSE) y los rayos X característicos, que aportan información sobre la morfología, la composición y la estructura del material. La magnificación en el MEB se logra mediante la diferencia de escala entre el raster del haz incidente y el de la imagen, lo que permite obtener imágenes de alta resolución, facilitando el análisis detallado de microestructuras complejas en materiales como el cemento (Scrivener, Snellings y Lothenbach, 2016).

2.2.1.3. Ensayos Mecánicos

A. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó a los 1, 7 y 28 días, en probetas de mortero de 4x4x16 cm (UNIT – ISO 679 (UNIT, 2009)). Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de Cementos Artigas.

2.2.2. Compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos

La compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos se evaluó mediante ensayos de calorimetría en el laboratorio de Cementos Artigas. Para ello, se utilizó un calorímetro isotérmico Calmetrix, modelo I-Cal 8000 HPC. El método de ensayo fue definido a partir de un análisis experimental (Anexo 1), el cual incluyó pruebas preliminares para evaluar la influencia de diversos factores en el mezclado de las pastas.

Para cada mezcla, se preparó una pasta con 400-500 g de cemento y una relación agua/cemento de 0,45. Se utilizaron dos dosificaciones de aditivo: una cercana al límite máximo recomendado (1% del peso del cemento) y otra en torno al valor medio (0,6% del peso del cemento). La mezcla se realizó mediante una mezcladora IBERTEST (modelo Ibermix, año 2022), ajustando los tiempos y procedimientos según la incorporación de aditivos. Se empleó agua destilada, estabilizada previamente a la temperatura ambiente del laboratorio. La temperatura y la duración del ensayo se establecieron en 20°C y 48 horas, respectivamente. De la mezcla preparada, se extrajeron 15 g de pasta para el ensayo de calorimetría, descartándose el resto. La Tabla 2.5 presenta el procedimiento abordado para las pastas que no contenían aditivos (Procedimiento 1) y la

Tabla 2.6 el procedimiento utilizado en las pastas que contenían aditivos (Procedimiento 2).

Tabla 2.5. Procedimiento de mezclado 1: muestras sin aditivo

Procedimiento 1:

-
- Paso 0- Pesar todos los materiales, previo al inicio del mezclado. El agua deberá ser pesada directamente en el recipiente de mezclado.
 - Paso 1- Colocar el material seco (cemento con o sin adiciones) en el recipiente de mezclado que contiene el agua pesada, tomar la hora de contacto entre ambos materiales como hora de inicio. Colocar el recipiente en la mezcladora y comenzar con el mezclado.
 - Paso 2- Mezclar durante 1 minuto a velocidad lenta (paleta 140 rpm y planetario 61 rpm).
 - Paso 3- Parar la mezcladora durante ½ minuto, y con una espátula raspar las paredes del recipiente despegando el material adherido.
 - Paso 4 Mezclar durante 3 minutos a velocidad rápida (paleta 285 rpm y planetario 124 rpm).
-

Tabla 2.6. Procedimiento de mezclado 2: muestras con aditivo

Procedimiento 2:

-
- Paso 0- Pesar todos los materiales, previo al inicio del mezclado. El agua deberá ser pesada directamente en el recipiente de mezclado. Se recomienda pesar el aditivo utilizando una jeringa.
 - Paso 1- Colocar el material seco (cemento con o sin adiciones) en el recipiente de mezclado que contiene el agua pesada, tomar la hora de contacto entre ambos materiales como hora de inicio. Colocar el recipiente en la mezcladora y comenzar con el mezclado.
 - Paso 2- Mezclar durante 1 minuto a velocidad lenta (paleta 140 rpm y planetario 61 rpm).
-

- Paso 3- Parar la mezcladora durante ½ minuto, y con una espátula raspar las paredes del recipiente, despegando el material adherido.
- Paso 4- Mezclar durante 1 minuto a velocidad rápida (paleta 285 rpm y planetario 124 rpm).
- Paso 5- Parar la mezcladora por un máximo de ½ minuto para añadir el aditivo a la pasta.
- Paso 6- Mezclar durante 2 minutos a velocidad rápida (paleta 285 rpm y planetario 124 rpm).

Resulta importante aclarar que, si bien en este capítulo se emplearon distintas dosis de aditivos, su selección tuvo como principal objetivo evaluar la compatibilidad entre los componentes de la pasta. Por tanto, no se pretende adoptar directamente en la elaboración del hormigón las dosis utilizadas en esta etapa, sino que se procurará determinar dichas dosis de forma experimental.

2.3. Presentación y análisis de resultados

2.3.1. Caracterización de Cementos y Adiciones

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos químicos, físicos y mecánicos realizados para los cementos y/o adiciones, según corresponda, junto con el análisis de las fases minerales del cemento portland y la morfología de sus partículas.

2.3.1.1. Ensayos Químicos

A. Fluorescencia de rayos X

Las Tablas 2.7 y 2.8 muestran los resultados de las FRX obtenidos sobre las muestras de cemento (CPC40 y CPC50) y las adiciones, respectivamente.

Tabla 2.7. Resultados de fluorescencia de rayos X en las muestras de cemento CPC40 y CPC50 y los límites establecidos por la norma UNIT 20:2022, PPC: pérdida por calcinación

Fases	CPC40	CPC50B	CPC50V	Límites CPC Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022)
SiO_2 (%)	19,58	20,7	20,96	--
Al_2O_3 (%)	3,96	3,92	4,02	--
Fe_2O_3 (%)	2,44	2,00	2,70	--
CaO (%)	59,39	61,38	60,82	--
MgO (%)	2,52	3,05	3,12	--
SO_3 (%)	2,80	3,00	2,84	≤ 3,5
K_2O (%)	1,41	1,43	1,40	--
Na_2O (%)	0,14	0,14	0,16	--
PPC (%)	7,08	3,46	2,80	≤ 14,5

Tabla 2.8. Resultados de fluorescencia de rayos X en las muestras de adiciones PEF1 y PEF2, PPC: pérdida por calcinación

Fases	PEF1	PEF2
SiO ₂ (%)	12,01	2,41
Al ₂ O ₃ (%)	3,97	0,23
Fe ₂ O ₃ (%)	1,44	0,07
CaO (%)	41,60	55,57
MgO (%)	2,05	0,45
SO ₃ (%)	0,82	0,51
K ₂ O (%)	2,12	0,06
Na ₂ O (%)	0,12	1,06
PPC (%)	35,46	36,53

La Tabla 2.7 muestra que los cementos seleccionados presentan una composición química similar, con valores comparables de óxidos de aluminio, hierro, magnesio y azufre. Sin embargo, se observan algunas diferencias notables. En primer lugar, las muestras de CPC50B y CPC50V tienen un contenido de óxido de calcio (CaO) y óxido de sílice (SiO₂) levemente mayor en comparación con el CPC40. Estos mayores contenidos resultan relevantes desde el punto de vista de una mayor resistencia, donde se espera que los cementos CPC50 desarrollen mayores propiedades mecánicas.

Por otro lado, los contenidos de álcalis, representados por K₂O y Na₂O, son muy similares en todas las muestras, con valores totales que oscilan entre el 1,07% y el 1,08% según la Ecuación 2.1. Este nivel de álcalis es favorable, al ser menor de 1,5%, minimiza el riesgo de reacciones perjudiciales con los agregados, las cuales podrían comprometer la durabilidad del hormigón. En cuanto a la pérdida por calcinación (PPC), el cemento CPC40 presenta el mayor valor (7,08%), lo que sugiere una mayor cantidad de compuestos volátiles. Sin embargo, este valor se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma UNIT (UNIT, 2022) ($\leq 14,5\%$).

El contenido de SO₃ en los tres cementos también está próximo al límite máximo permitido (3,5%), siendo el CPC50B el que presenta el valor más elevado (3,05%). Un alto contenido de sulfatos podría aumentar el riesgo de formación de etringita y afectar negativamente la durabilidad del material.

La Tabla 2.8 muestra una composición química significativamente diferente entre los fillers PEF1 y PEF2, donde el PEF1 presenta una composición más rica en sílice y el PEF2 en óxidos de calcio.

B. Difracción de Rayos X

La Figura 2.5 muestra los resultados de difracción de rayos X para la muestra de cemento CPC40.

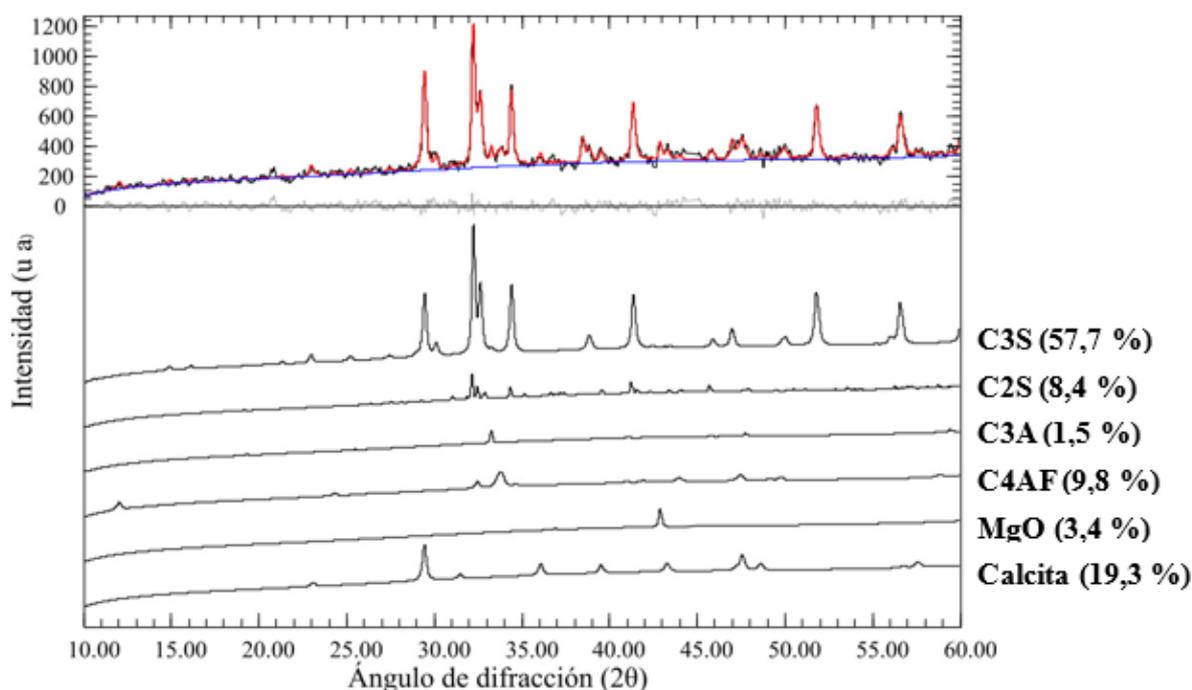


Figura 2.5. Resultados de difracción de rayos X

Mediante la difracción de rayos X se identificaron los componentes del Clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) cuyos porcentajes aproximados se encuentran dentro de la bibliografía recomendada (Tabla 2.2). Se identificó un 1,5% de C_3A con estructura microcristalina cúbica, acorde con las recomendaciones bibliográficas y el contenido de álcalis del cemento CPC40. Esto indica que el cemento CPC40 resulta apto para hormigones de alto desempeño.

2.3.1.2. Ensayos Físicos

A. Inicio y Final de Fraguado (IF-FF) y Consistencia de Pasta Normal (APN)

La Tabla 2.9 presenta los resultados de la consistencia de pasta normal y los tiempos de inicio y final de fraguado obtenidos mediante una única determinación para los tres cementos.

Tabla 2.9. Resultados de Consistencia de Pasta Normal (APN) e Inicio y Final de fraguado (IF: Inicio de fraguado e FF: final de fraguado)

Cemento	APN (%)	IF (min)	FF (min)	Límite IF Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) (min)
CPC40	30,0	163	210	≥ 60
CPC50B	29,8	241	300	≥ 60
CPC50V	30,0	218	340	≥ 60

Las tres muestras de cemento mostraron valores de APN similares, oscilando alrededor del 30%, lo que indica que tienen una demanda de agua comparable para alcanzar una consistencia

de pasta normal. Sin embargo, el CPC50B presentó un tiempo de inicio de fraguado considerablemente mayor en comparación con el CPC40 y el CPC50V. Esto sugiere que el mayor tamaño de partícula resultante del proceso de molienda en molino de bolas podría enlentecer la velocidad de reacción de las partículas y consecuentemente el inicio del fraguado.

B. Finura

La Tabla 2.10 muestra los resultados del retenido tamiz 45 μm para los cementos y adiciones, y la Tabla 2.11 presenta la finura de Blaine obtenida para las tres muestras de cementos.

Tabla 2.10. Resultados del retenido Tamiz 45 μm de los cementos y las adiciones

Cemento	Retenido Tamiz 45 μm (%)
CPC40	3,20
CPC50B	8,50
CPC50V	2,80
PEF1	0,66
PEF2	2,50

Tabla 2.11. Resultados de Finura de Blaine de los cementos y los límites establecidos por la norma UNIT 20:2022

Cemento	Superficie Específica (m^2/kg)	Límite Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) (m^2/kg)
CPC40	387	≥ 250
CPC50B	325	≥ 250
CPC50V	336	≥ 250

El cemento CPC50B fue el que presentó mayor retenido en el tamiz 325 y menor superficie específica, representando la muestra de menor finura. Si bien el CPC40 presentó mayor retenido en el tamiz 325 que la muestra CPC50V, brindó mayor superficie específica por el método de finura de Blaine.

C. Granulometría por difracción láser

La Figura 2.6 muestra las curvas granulométricas de los cementos y las adiciones, obtenidas mediante difracción láser.

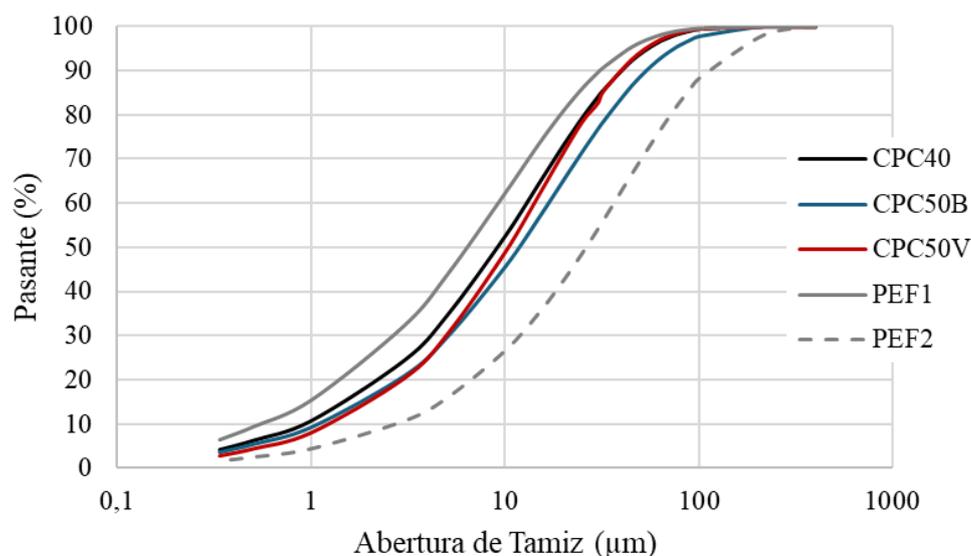


Figura 2.6. Curvas Granulométricas de los Cementos y las adiciones, obtenidas mediante difracción láser

Los cementos (CPC40, CPC50B y CPC50V) mostraron distribuciones granulométricas muy similares, indicando que sus tamaños de partícula son bastante parecidos. Con un porcentaje en el entorno del 90% de pasante del tamiz 45 µm. Sin embargo, se observa que la curva del CPC50V está ligeramente desplazada hacia tamaños de partícula menores en comparación con el CPC50B. Esta mayor finura puede ser beneficiosa para la reactividad del cemento, ya que las partículas más pequeñas tienden a hidratarse más rápidamente, favoreciendo el desarrollo temprano de la resistencia. El CPC40 sigue una tendencia granulométrica muy cercana a la de los otros cementos, pero presenta una mayor finura que las demás muestras, lo cual podría tener implicaciones en la hidratación y el desempeño a largo plazo del cemento.

Las curvas granulométricas de los fillers (PEF1 y PEF2) mostraron diferencias significativas, siendo el PEF1 la muestra más fina, incluso más que los cementos. La alta finura del PEF1 podría influir notablemente en la trabajabilidad del hormigón, al retener mayor cantidad de agua en su superficie. Sin embargo, contribuye a reducir la porosidad, al ocupar los espacios entre las partículas de cemento y mejorar la compacidad de la mezcla.

D. Morfología de las partículas con microscopía Electrónica de Barrido

La Figura 2.7 presenta la morfología de las partículas de cemento, obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido.

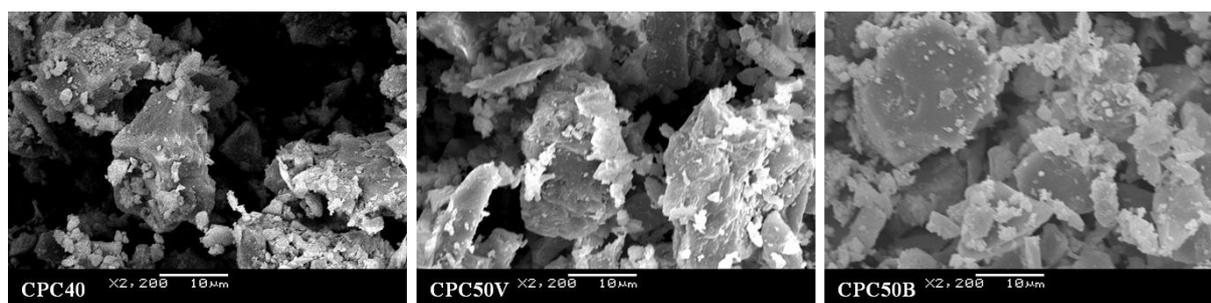


Figura 2.7. Morfología de las partículas de cemento – Microscopía electrónica de barrido

Es posible observar que el cemento CPC50B, obtenido mediante el molino de bolas presenta una forma más redondeada que las partículas de las muestras obtenidas mediante el molino vertical. Para una misma energía de molienda, el molino vertical no sólo aumenta la finura del cemento sino además su angulosidad. El aumento de la angulosidad de las partículas contribuye a su hidratación, aumentando su superficie específica y consecuentemente el contacto con el agua y/o el aditivo utilizado.

2.3.1.3. Ensayos Mecánicos

A. Resistencia a Compresión

Las Tablas 2.12 y 2.13 muestran los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para los cementos CPC40 y CPC50, respectivamente, junto con los requisitos establecidos por la UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) para cada caso.

Tabla 2.12. Resultados de resistencia a compresión CPC40

Edad (días)	Resistencia (MPa)		Límites Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) (MPa)
	CPC40		
1 día	18,6		--
7 días	39,7		--
28 días	49,9		$40 \leq R_{28d} \leq 60$

Tabla 2.13. Resultados de resistencia a compresión CPC50

Edad (días)	Resistencia (MPa)		Límites Norma UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) (MPa)
	CPC50B	CPC50V	
1 día	15,6	21,4	--
7 días	45,2	46,1	--
28 días	55,3	56,0	$50 \leq R_{28d}$

Las tres muestras presentaron resistencias adecuadas, dentro de los límites establecidos por la normativa UNIT 20:2022 (UNIT, 2022) para su categoría. Los cementos CPC50 mostraron mayores resistencias a los 28 días en comparación con el cemento CPC40, como era esperable. Sin embargo, los cementos CPC40 y CPC50V presentaron mayores resistencias a edades tempranas, lo cual puede atribuirse al aumento de la superficie específica, que influye en la reactividad y en la hidratación de estos cementos.

2.3.2. Compatibilidad de cementos, adiciones y aditivos

Se realizaron 23 calorimetrías, de las cuales:

A)- 3 fueron para analizar pastas de cemento

B)- 16 fueron para analizar compatibilidad entre cemento-aditivo y cemento-adición

C)- 4 fueron para analizar la compatibilidad entre cemento-adición-aditivo

A)- Pastas de cemento

La Tabla 2.14 presenta las masas de las muestras incorporadas en el calorímetro, detallando la tanto la masa total de la pasta, así como las masas de cemento y agua incorporadas en cada caso. La Figura 2.8 muestra los resultados de calorimetría para las pastas de cemento CPC40, CPC50B y CPC50V.

Tabla 2.14. Masas de los materiales: pastas de cemento

Código	Agua (g)	Cemento (g)	Pasta (g)
CPC40	4,659	10,350	15,009
CPC50B	4,671	10,376	15,047
CPC50V	4,683	10,401	15,084

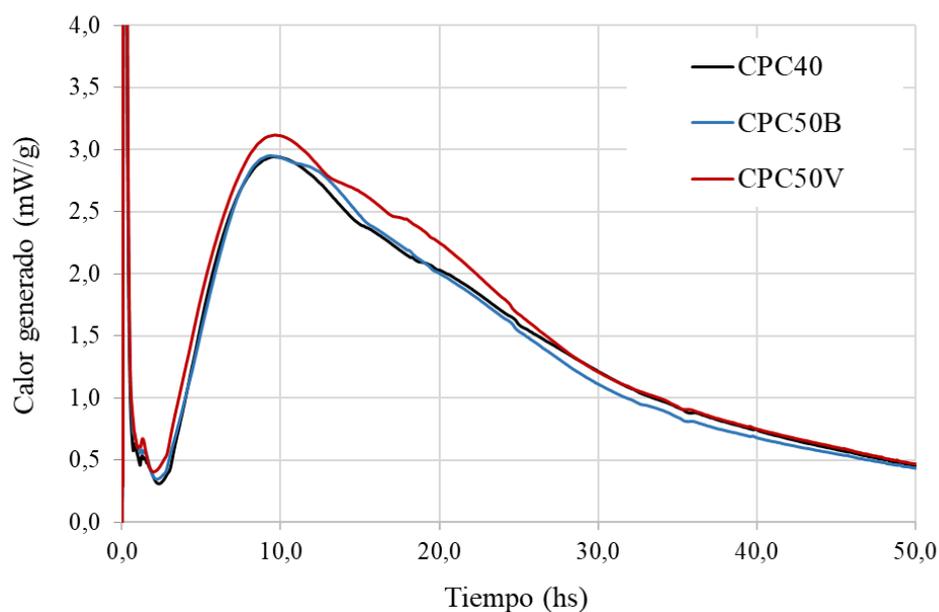


Figura 2.8. Resultados de calorimetrías de las pastas de cementos, CPC40, CPC50B y CPC50V.

Los resultados presentados en la Figura 2.8 concuerdan con lo esperado. El cemento CPC50V, cuya molienda fue realizada mediante un molino vertical, presenta una mayor velocidad de hidratación, un pico máximo de calor más pronunciado y una cantidad de calor desprendido superior en comparación con el cemento CPC50B, molido con el molino de bolas. Esto se relaciona con la finura obtenida en ambos cementos, dado que el molino vertical permite obtener partículas más finas y angulosas. A medida que aumenta la finura del cemento, se incrementa la superficie de contacto con el agua, lo que facilita y acelera su hidratación.

Al comparar los resultados de calorimetría de las pastas de cemento CPC50B con el cemento CPC40, se observa un comportamiento similar. Esto sugiere que el aumento de la finura del cemento CPC40, permite una hidratación de las partículas comparable a la de un cemento más reactivo desde el punto de vista de su composición química, pero de menor finura, como el caso del CPC50B.

B)- Compatibilidad pastas cemento-aditivo y cemento-adición

Se analizó la compatibilidad entre los cementos y los aditivos reductores de agua, así como la compatibilidad del cemento CPC40 con los fillers PEF1 y PEF2, que forman parte del sistema aglomerante implementado habitualmente por la empresa.

1) Compatibilidad: pastas de cemento-aditivo

La Tabla 2.15 presenta las masas de las muestras de pasta incorporadas en el calorímetro y su correspondiente al cemento, al agua y al aditivo, respectivamente. La Figura 2.9 muestra los resultados obtenidos, en curva punteada el resultado de la pasta de cemento CPC40 sin aditivo y luego en color las curvas obtenidas para las pastas con aditivo, mostrando en tono oscuro la dosis mayor (1%) y en tono claro la dosis menor (0,6%).

Tabla 2.15. Masas de los materiales: Pastas CPC40-aditivos

Fig.	Código	Agua (g)	Cemento (g)	Aditivo (%)	Pasta (g)
(a)	CPC40-A1-0,6%	4,673	10,380	0,61	15,052
	CPC40-A1-1%	4,664	10,361	1,01	15,025
(b)	CPC40-A2-0,6%	4,658	10,348	0,61	15,006
	CPC40-A2-1%	4,676	10,387	1,01	15,063
(c)	CPC40-A3-0,6%	4,658	10,350	0,60	15,008
	CPC40-A3-1%	4,674	10,382	1,00	15,055
(d)	CPC40-A4-0,6%	4,662	10,359	0,61	15,021
	CPC40-A4-1%	4,684	10,408	1,01	15,092
(e)	CPC40-A5-0,6%	4,669	10,377	0,60	15,046
	CPC40-A5-1%	4,674	10,386	1,00	15,060
(f)	CPC40-A6-0,6%	4,659	10,348	0,61	15,007
	CPC40-A6-1%	4,686	10,413	1,00	15,099

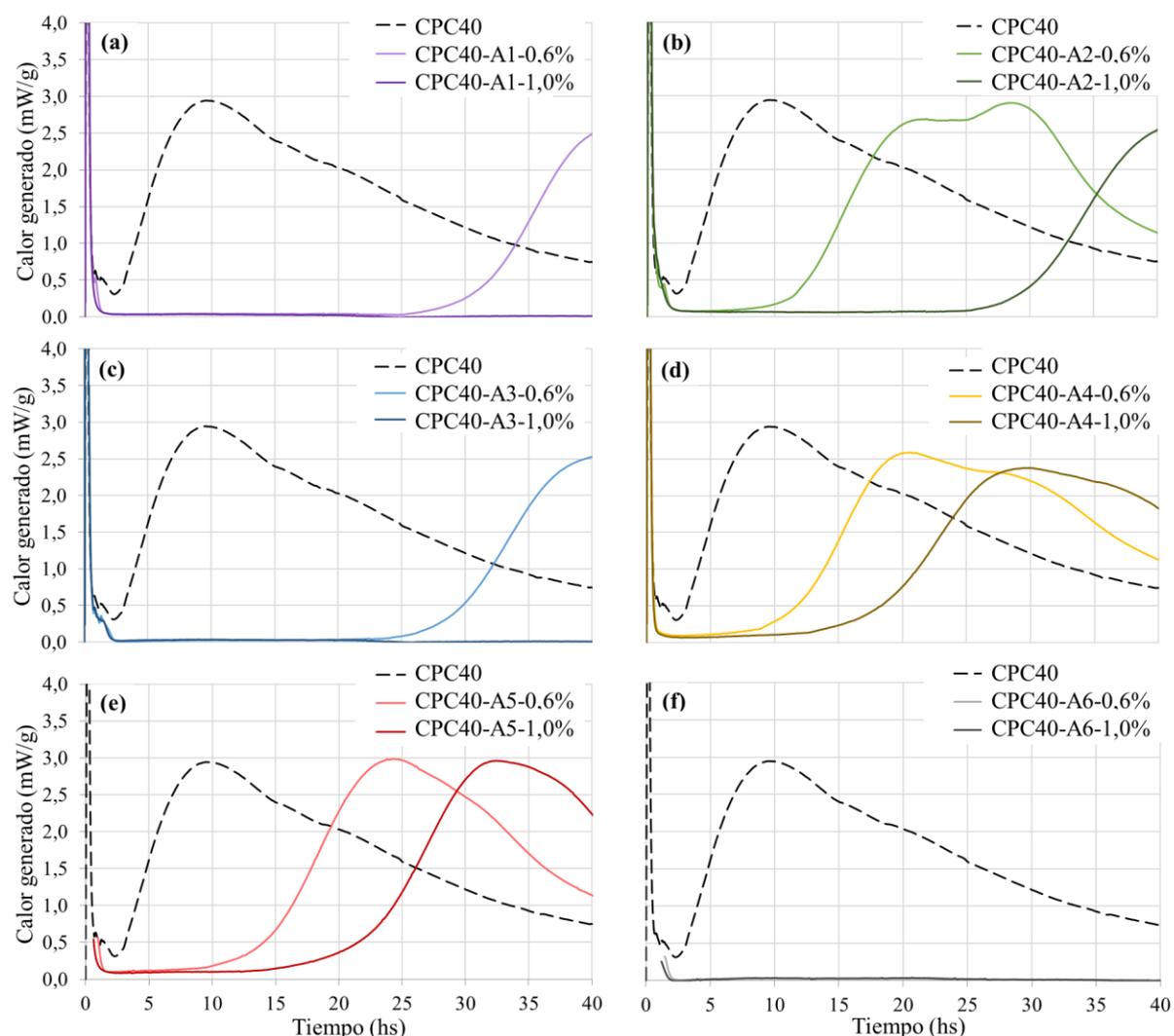


Figura 2.9. Resultados de calorimetrías del estudio de compatibilidad CPC40 – Aditivos

El aumento en la dosis de aditivo reductor de agua retrasa la hidratación del cemento. Los aditivos A1 y A3 (Figura 2.9.a y Figura 2.9.c) producen un retraso considerable en el inicio de fraguado, de 3 horas a aproximadamente 25 horas, incluso con dosis medias recomendadas por los fabricantes (0,6 %). Al elevar la dosis al límite máximo recomendado, no se observó inicio de fraguado. Un efecto similar se obtuvo con el aditivo A6 (Figura 2.9.f), en el que no se registró inicio de fraguado para ninguna de las dos dosis implementadas.

Tanto el aditivo A2 como el A4, además de retrasar el inicio de fraguado a aproximadamente 10 horas, promovieron la hidratación de los aluminatos, incrementando la precipitación de etringita. Sin embargo, picos intensos de formación de etringita, como en el caso del aditivo A2 (Figura 2.9.b), podrían generar tensiones internas y aumentar el riesgo de fisuración.

Si bien, al utilizar el aditivo A4 (Figura 2.9.d), se observó una variación en las reacciones de los aluminatos y silicatos, estos cambios no representan valores preocupantes. El aditivo A5 (Figura 2.9.e) fue el que mostró resultados más adecuados, con un retardo en el inicio de fraguado de aproximadamente 10 horas para una dosis de 0,6 % y 20 horas para una dosis de

1 %. Su principal ventaja fue el pico máximo de calor generado, no viéndose afectado por la adición del aditivo.

Con el objetivo de mantener la continuidad en la producción habitual de hormigón de la empresa, se seleccionó el aditivo A4, que ya se emplea en la fabricación de hormigones especiales. No obstante, si fuese necesario, también se considera viable la incorporación del aditivo A5.

Aunque para los cementos CPC50 (V y B) se realizaron ensayos de compatibilidad con todos los aditivos reductores de agua, considerando que este cemento, en primera instancia, no será seleccionado para el desarrollo de hormigón de alto desempeño, a continuación se presentan únicamente los resultados obtenidos con el aditivo A4, que demostró ser compatible con las tres muestras analizadas. La Tabla 2.16 presenta las masas correspondientes a las muestras de pastas incorporadas en el calorímetro, y su correspondiente a los cementos (CPC50V y CPC50B), el agua y el aditivo. La Figura 2.10 muestra los resultados obtenidos, en la cual se presenta en línea continua los resultados del CPC50B con el aditivo A4 y la línea punteada los resultados del CPC50V con el aditivo A4.

Tabla 2.16. Masas de los materiales: Pastas CPC50-aditivo A4

Código	Agua (g)	Cemento (g)	Aditivo (%)	Pasta (g)
CPC50B-A4-0,6%	4,674	10,380	0,59	15,054
CPC50V-A4-0,6%	4,670	10,373	0,61	15,042

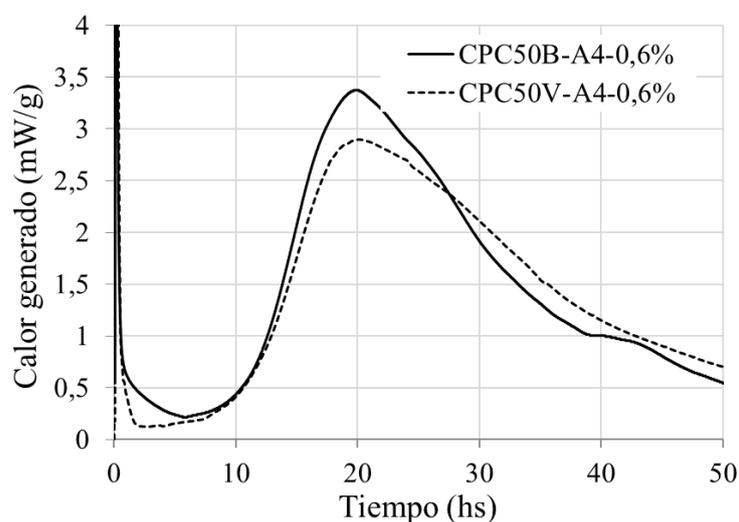


Figura 2.10. Resultados de calorimetrías obtenidas del estudio de compatibilidad CPC50 – A4

Cuando se analiza el resultado de ambas muestras de cemento CPC50 con el aditivo A4, se observa que la muestra CPC50V presentó un menor calor de hidratación. Al incorporar el aditivo, éste es adsorbido en la superficie de las partículas. Que al presentar la muestra CPC50V mayor superficie específica, aumenta la adsorción con el aditivo, dando lugar a una mayor

dispersión entre las partículas de cemento y por ende una menor hidratación, el Anexo 2 presenta un artículo en donde se realizó una comparación entre las muestras de cemento, detallando las características y comportamientos mencionados.

2) Compatibilidad: pastas de cemento-adición

La Tabla 2.17 presenta las masas de las muestras de pasta incorporadas en el calorímetro, especificando la masa total, así como las masas de cemento, adiciones y agua incorporadas en cada caso. La Figura 2.11 muestra las curvas de calorimetría obtenidas, el resultado de la pasta sin adición está representado en línea negra punteada y los resultados de las pastas con adiciones se encuentran representados en color, en donde el PEF1 está en línea continua y el PEF2 en línea punteada.

Tabla 2.17. Masas de los materiales: pastas de CPC40-adición

Código	Agua (g)	Cemento (g)	Adición (g)	Pasta (g)
CPC40-PEF1	4,677	9,878	0,521	15,075
CPC40-PEF2	4,686	9,892	0,520	15,099

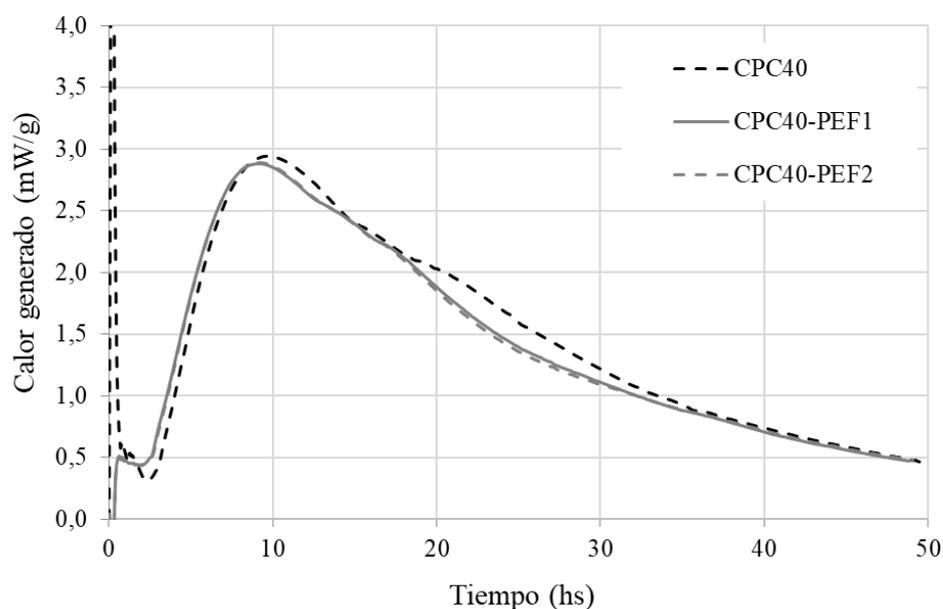


Figura 2.11. Resultados de calorimetría del estudio de compatibilidad CPC40 - Adiciones PEF1 y PEF2

Ambas adiciones mostraron una hidratación prácticamente idéntica para sustituciones del 5% en peso de cemento. Al comparar estos resultados con la pasta sin adiciones, se observa que el período de inducción y el inicio del fraguado no fueron afectados por su incorporación. Sin embargo, se detecta una leve variación en la hidratación de los aluminatos, que reaccionan un poco antes cuando se incorporan adiciones. Esta variación no parece afectar significativamente la hidratación de los silicatos, ya que los picos de calor máximo generados por estos últimos se mantuvieron prácticamente sin cambios.

C)- Compatibilidad pastas cemento-aditivo-adición

La Tabla 2.18 presenta las masas de las muestras de pasta incorporadas en el calorímetro, especificando la masa total de la pasta, así como el porcentaje de aditivo utilizado y las masas de cemento, adiciones y agua incorporadas en cada caso. La Figura 2.12 muestra los resultados obtenidos, donde se presenta, en todos los cuadrantes, en línea negra punteada la hidratación del cemento sin aditivo ni adición y en línea negra continua la hidratación del cemento con el aditivo (resultados ya mostrados); en los cuadrantes de la izquierda (a y c) se muestran los resultados para el aditivo A4 y en los cuadrantes de la derecha (b y d) los resultados para el aditivo A5. La línea continua en tono claro (en las figuras a, b) presenta los resultados de la incorporación de PEF1 al sistema cemento-aditivo y la línea punteada en tono claro (en las figuras c, d) los resultados de la incorporación de PEF2 al sistema cemento-aditivo, respectivamente.

Tabla 2.18. Masas de los materiales: Pastas de CPC40-adición-aditivo

Fig.	Código	Agua (g)	Cemento (g)	PEF (g)	Aditivo (%)	Pasta (g)
(a)	CPC40-PEF1-A4	4,676	9,861	0,519	0,60	15,056
(b)	CPC40-PEF1-A5	4,659	9,835	0,518	0,61	15,012
(c)	CPC40-PEF2-A4	4,664	9,846	0,518	0,60	15,028
(d)	CPC40-PEF2-A5	4,664	9,845	0,518	0,61	15,028

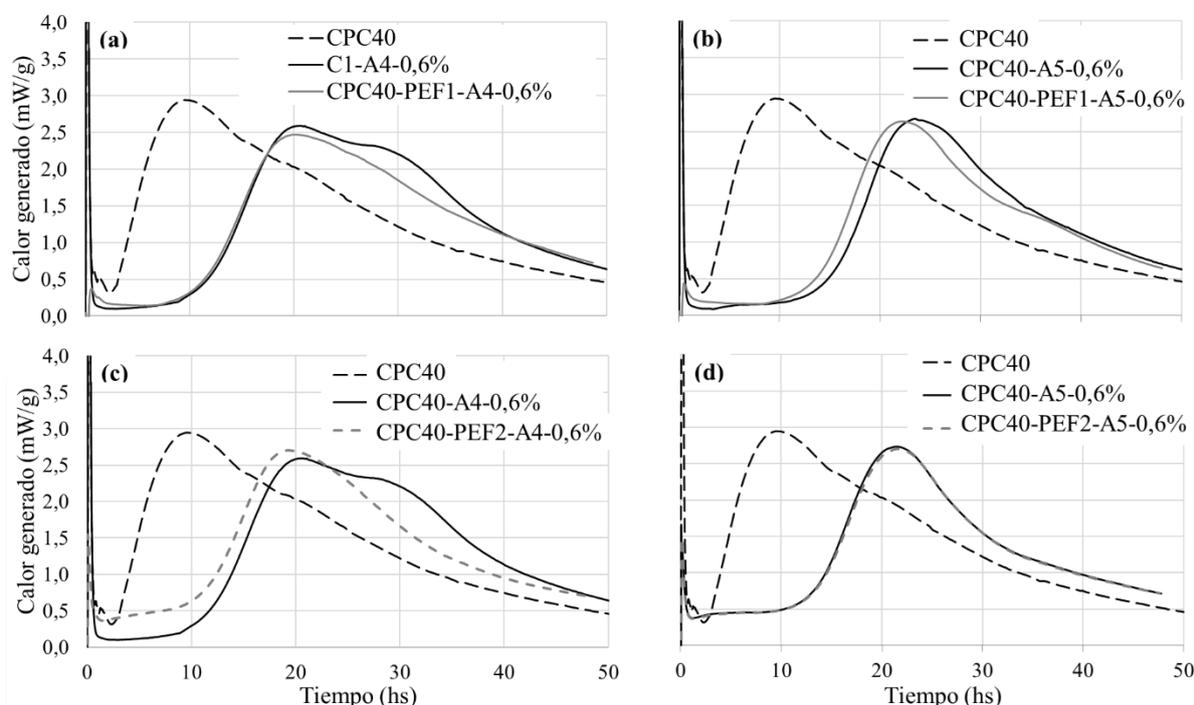


Figura 2.12. Resultados de calorimetrías del estudio de compatibilidad entre el CPC40, las adiciones y los aditivos A4 y A5.

La incorporación de un 5 % de adiciones como sustituto del cemento no afecta negativamente la compatibilidad entre el cemento y los aditivos, ya que se observan curvas similares en los

resultados. Sin embargo, al incorporar PEF al sistema cemento-aditivo A4 (Figura 2.12.a y Figura 2.12.c), se produce una alteración positiva en la reacción de los aluminatos, inhibiendo su hidratación.

La adición de PEF1 también aumenta la velocidad de hidratación cuando se emplea el aditivo A5 (Figura 2.12.b), lo cual implica una leve disminución en el período de inducción, sin modificar el calor máximo generado durante la hidratación de los silicatos.

2.4. Conclusiones parciales

Se caracterizaron los cementos y las adiciones. Se analizó la compatibilidad cemento-adiciones-aditivos para ser usados en el desarrollo de hormigón de alto desempeño. Se corroboró que los ensayos de calorimetría son una herramienta apropiada para analizar la compatibilidad entre cementos, adiciones y aditivos, permitiendo identificar el período de inducción, el inicio de fraguado y el orden de reacción de los productos de hidratación. Estos indicadores ayudan a detectar potenciales fenómenos perjudiciales, como la formación de etringita diferida.

En cuanto a la composición química, los cementos mostraron resultados dentro de los rangos recomendados por la bibliografía. No obstante, ciertas diferencias, como el contenido de óxidos de calcio y sílice en los cementos CPC50, aportan una mayor resistencia en el tiempo. Por otro lado, la mayor PPC en el CPC40 y los niveles elevados de sulfatos en el CPC50B son factores relevantes para evaluar su desempeño y durabilidad en diversas condiciones de uso.

En relación con las propiedades físicas, el cemento CPC50B presentó menor superficie específica según el ensayo de Blaine, mayor retenido en el tamiz 45 μm y una distribución granulométrica más gruesa. Sin embargo, en términos de agua necesaria para alcanzar la consistencia de pasta normal, los tres cementos se comportaron de manera similar.

Aunque no fue posible cuantificar la angulosidad de las partículas de cemento, a través de microscopía electrónica de barrido se observó que la molienda realizada con molino vertical, incrementa la angulosidad en las partículas en comparación con el molino de bolas.

Las diferencias químicas y físicas mencionadas para las muestras de cemento se comprobaron mediante su hidratación, donde el cemento CPC50V presentó mayor velocidad de hidratación inicial y consecuentemente un calor máximo superior. Este comportamiento se atribuye a la finura cuando se compara con el CPC50B y a la composición química cuando este se compara con el CPC40, respectivamente. La comparación de la hidratación entre el CPC40 y el CPC50B sugiere que el incremento en la finura del cemento CPC40 permite una hidratación de las partículas comparable a la de un cemento más grueso, pero químicamente más reactivo, como el caso del CPC50B.

En cuanto a los aditivos, los aditivos A1, A3 y A6 se consideraron no compatibles debido al retraso significativo en el inicio de fraguado con las dosis empleadas. El aditivo A2 también fue clasificado como no compatible, ya que favoreció la hidratación de los aluminatos e incrementó la precipitación de etringita, lo cual podría generar tensiones internas y aumentar el riesgo de fisuración. Los aditivos A4 y A5 mostraron los mejores resultados, con tiempos de inicio de fraguado de aproximadamente 10 horas para una dosis del 0,6 % en peso de cemento. Además, estos aditivos generaron productos de hidratación en un orden y magnitud dentro de

los valores reportados en la bibliografía consultada (Scrivener, Snellings y Lothenbach, 2016). La incorporación de adiciones (PEF1 y PEF2) a las pastas, tanto con aditivo como sin aditivo, mostró una adecuada compatibilidad al disminuir la precipitación de etringita.

En función de los resultados expuestos, se considera apropiado utilizar, en el desarrollo de hormigón de alto desempeño, los materiales actualmente disponibles en la empresa, como el cemento CPC40, las adiciones PEF1 y PEF2 y los aditivos A4 o A5, cuyos sistemas fueron compatibles. Si bien, el cemento CPC50 no forma parte de la producción habitual, su implementación permitiría alcanzar mayores resistencias en el hormigón.

Capítulo 3 - Agregados

El objetivo de este capítulo es seleccionar y evaluar la aptitud de los agregados para su uso en hormigón de alto desempeño. Para ello, se procede a caracterizarlos siguiendo los lineamientos de la norma UNIT 1050:2005 y se determina la curva de mayor compacidad.

En este capítulo se exponen y analizan los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados. Se presentan los límites establecidos por la normativa vigente para su implementación en hormigón y se incluyen recomendaciones para hormigones de alto desempeño disponibles en la bibliografía de referencia. Se evalúa el esqueleto granular utilizando un método matemático y otro semi-empírico, obteniendo en ambos casos la curva de mayor compacidad.

3.1. Introducción

3.1.1. Agregados para hormigón de alto desempeño

Teóricamente se puede analizar el hormigón como el conjunto de tres fases; la pasta de cemento hidratada, el agregado y la zona de transición pasta-agregado (ZT). El aumento de la resistencia del hormigón se obtiene mediante la optimización de alguna de ellas. De las tres fases, es posible mejorar la pasta de cemento hidratado, mejorando consecuentemente la ZT. Por lo que el agregado se convierte en la fase más débil de la mezcla, influyendo en la ZT y limitando en la mayoría de los casos la resistencia final del compuesto. La imposibilidad en la modificación de la composición mineralógica de los agregados naturales hace que su correcta selección se torne un factor importante (Tutikian, Isaia y Helene, 2011).

A medida que aumenta el Tamaño Máximo del agregado (TMA), tanto la cantidad de fallas presentes en su microestructura como la retención de agua de exudación se verán aumentadas, generando entonces una ZT mayor y consecuentemente una menor resistencia. Por otro lado, es necesario buscar un empaquetamiento de partículas que siga una distribución continua y que presente la menor fracción de poros (Tutikian, Isaia y Helene, 2011).

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones, presentadas por Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990), para la utilización de agregados en hormigones de alto desempeño:

- Son adecuados los agregados finos naturales con un Módulo de Finura (MF) medio-alto (2,5-3).
- La forma de los agregados gruesos deberá ser lo más equidimensional posible, siendo satisfactoriamente utilizadas: rocas calcáreas densas o rocas ígneas plutónicas.
- Los agregados gruesos con TMA mayor a 25 mm, perjudican la resistencia e impermeabilidad del hormigón. Se recomienda la implementación de agregados con TMA menor a 10-15 mm, procurando reducir la probabilidad de defectos internos en las partículas.

Sin embargo, Tutikian, Isaia y Helene (2011), recomiendan los tamaños máximos de agregados característicos en función de la resistencia a la compresión que se desea alcanzar:

Para hormigones con resistencias entre 20 y 50 MPa se recomienda que el TMA sea igual a 25 mm, mientras que para hormigones entre 50 y 100 MPa el TMA recomendado es 19 mm (Tutikian, Isaia y Helene, 2011).

3.1.2. Curva de mayor compacidad

En los últimos años, el estudio del empaquetamiento de partículas se ha vuelto un parámetro clave en el desarrollo de hormigones de alto desempeño. Estos hormigones, en particular los de alta resistencia, son considerados materiales de alta densidad, cuya idea es obtener un “sólido rígido” a partir de granos con granulometrías complementarias. Se puede definir el estudio del empaquetamiento granular como la selección correcta de las proporciones y tamaños de partículas, de manera que los vacíos entre los agregados de tamaños mayores sean rellenados por agregados más pequeños, cuyos vacíos nuevamente sean llenados por partículas aún más pequeñas y así sucesivamente. Obteniéndose la mezcla con menor fracción de poros y consecuentemente la curva de mayor compacidad (De Castro y Pandolfelli, 2009).

El empaquetamiento de partículas resulta de gran importancia ya que incide en las propiedades mecánicas y durables del hormigón. En dónde no sólo influye el tamaño de los granos, sino también su forma y superficie específica (Christ, 2019).

Existen diversos métodos que permiten la determinación de la curva de mayor compacidad, no obstante, la mayoría de ellos son basados en un modelo teórico de empaquetamiento de partículas esféricas, cuya forma se aleja bastante a los agregados que son utilizados comúnmente en hormigón. A medida que las partículas presentan formas menos esféricas, la densidad de la mezcla que las contiene se verá disminuída, debido a la fricción existente entre sus superficies. A medida que disminuye el tamaño de las partículas irregulares este efecto se intensifica, ya que presentan mayor superficie específica (De Castro y Pandolfelli, 2009).

3.1.2.1. Métodos de optimización de partículas

Los métodos de optimización del esqueleto granular pueden clasificarse, en términos generales, en tres grandes grupos:

A. Optimización por curvas ideales

Son métodos basados en un enfoque continuo, ya que buscan la optimización granular de la mezcla a partir de curvas ideales. En 1907 Fuller (Fuller y Thompson, 1907) propone una ecuación teórica (Ecuación 3.1) para determinar la curva de mayor compacidad, en donde el retenido por cada tamiz se calcula en función de su abertura, del tamaño máximo de agregados y de un coeficiente de ajuste que representa la fracción de poros entre las partículas, cuyo valor fue definido fijo $q = 0,5$.

Años más tarde, en 1930, Andreasen & Andersen (A&A) (Andreasen, 1930) no concuerdan con el valor del coeficiente de ajuste (q) definido por Fuller, establecen que este depende de las características de los agregados y de las propiedades buscadas en cada hormigón. Por lo que determinan experimentalmente un rango posible de valores $q = [0,33 ; 0,50]$.

$$PAD (\%) = \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^q * 100 \quad 3.1$$

donde

PAD es el porcentaje pasante en el tamiz de abertura (d), expresado en porcentaje;

d es la abertura del tamiz, expresado en micrómetros;

d_{max} es el tamaño de abertura mayor de los tamices utilizados, expresado en micrómetros.

q es el coeficiente de ajuste

Posteriormente, en 1980, Funk y Dinger (Tutikian y Alegre, 2007) no se conforman totalmente con la teoría inicial, consideran que la curva de mayor compacidad se ve afectada también por las partículas de diámetros menores. Modifican la ecuación establecida por Fuller, considerada por A&A, y desarrollan la ecuación de Andreasen & Andersen modificada (Ecuación 3.2). Presentan un valor de coeficiente de ajuste óptimo, $q = 0,37$ fijo, determinado por un modelo computacional del empaquetamiento de partículas esféricas en tres dimensiones.

$$PAD (\%): \frac{d^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} * 100 \quad 3.2$$

donde

PAD es el porcentaje pasante en el tamiz de abertura (d), expresado en porcentaje;

d es la abertura del tamiz, expresado en micrómetros;

d_{max} es el tamaño de abertura mayor de los tamices utilizados, expresado en micrómetros.

d_{min} es el tamaño de abertura menor de los tamices utilizados, expresado en micrómetros.

Es importante analizar que a medida que aumentamos el rango de tamaños de partículas, aumenta la densidad de la mezcla, independientemente de la forma de la partícula (Fennis y Walraven, 2012).

A lo largo de los años, distintos autores han investigado y analizado estos métodos, partiendo del modelo de A&A modificado, buscando establecer el valor óptimo del coeficiente de ajuste. En 1985, Peronius y Sweeting (Peronius y Sweeting, 1985) desarrollaron una ecuación para determinar la porosidad de las mezclas dependiendo de la redondez de las partículas y la desviación de la curva de Fuller. Autores como Kumar y Santhanam (Santhanam, 2003); Brouwers y Radix (Brouwers y Radix, 2005); Garas y Curtis (Garas y Kurtis, 2008); buscaron ajustar el valor del coeficiente q en función de sus resultados experimentales y la trabajabilidad que requerían (Fennis y Walraven, 2012).

La determinación de la composición de la mezcla de acuerdo al modelo de A&A modificado, a grandes rasgos, está basado en la relación entre la densidad del paquete granular, la reología

del hormigón y las propiedades físicas-mecánicas del producto finalmente endurecido. La selección del valor del coeficiente de ajuste óptimo es entonces un valor apropiado obtenido a partir del equilibrio entre las propiedades mecánicas y la trabajabilidad requeridas (Galetakis et al., 2016).

Existen programas computacionales, que en función de la granulometría y los tamaños de las partículas, brindan la curva de mayor compacidad. Cuyo resultado es obtenido a partir de la aplicación del modelo de A&A modificado y la iteración del valor del coeficiente de ajuste. Por ejemplo, el programa EMMA (Elkem Materials Mixture Analyzer) establece que el valor óptimo del coeficiente de ajuste siempre es cercano al valor definido por Funk y Dinger ($q = 0,37$), pero determina la curva óptima iterando dentro del rango $q = [0,32 ; 0,42]$ (Galetakis et al., 2016).

Con los años, fue verificado mediante simulaciones computacionales, que valores del coeficiente de ajuste menores o iguales a 0,37 generalmente favorecen el empaquetamiento máximo, particularmente en distribuciones infinitas, mientras que valores superiores a éste representan una porosidad residual. Se observó que, para hormigones con bastante fluidez el valor del coeficiente resultaba inferior a 0,30, por lo que se dedujo que valores cercanos a 0,30 favorecían a las mezclas compactadas mediante vibración, mientras que valores inferiores a 0,25 resultaban en hormigones autocompactantes, pudiéndose asociar este valor para hormigones de alto desempeño (De Castro y Pandolfelli, 2009). Finalmente, la búsqueda en la reducción del coeficiente de ajuste se limita al aumento de la cantidad de finos en la mezcla, influyendo en la interacción entre las partículas (De Castro y Pandolfelli, 2009).

Partiendo de la base en que el método de A&A modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) no sólo es aplicado al esqueleto granular, sino también es posible aumentar el rango de tamaños de partículas, incluyéndose en el estudio las adiciones minerales y el cemento utilizado, el resultado brindará un ajuste óptimo de la curva de compacidad, con la menor fracción de poros entre partículas y consecuentemente la densidad máxima de la mezcla (Christ, 2019).

Posteriormente, Roberto Christ en un trabajo realizado (Christ, 2019) presentó el Índice de Desvío de Empaquetamiento (IDE) como la diferencia entre la curva teórica ideal y la curva de mayor compacidad determinada mediante el método de A&A modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007). A medida que este valor se aproxima a cero, significa que los porcentajes pasantes de cada abertura de los tamices presentan el empaquetamiento perfecto de partículas. Si bien no se determinó un valor óptimo del IDE, demostraron que se logra mejorar el desempeño de la mezcla a medida que disminuye este valor (Christ, 2019).

B. Optimización por modelos analíticos

Son métodos discretos que determinan el empaquetamiento de partículas mediante el análisis de la densidad de una mezcla. El cálculo se realiza en base a la distribución de tamaños de partículas y la densidad de empaquetamiento de los distintos grupos de agregados que componen una mezcla determinada. Existen ecuaciones matemáticas que permiten determinar la interacción geométrica entre partículas (Fennis y Walraven, 2012).

En 1929 Furnas (Furnas, 1929) introduce por primera vez ecuaciones referidas a la densidad del esqueleto granular. Permitiendo inicialmente, trabajar únicamente con la interacción de dos grupos de partículas, en donde o bien la cantidad de partículas de mayor tamaño dominaba la matriz y la cantidad de vacíos era rellenada por partículas menores, o eran éstas las que dominaban la matriz y los agregados de mayor tamaño quedaban incrustados en ésta. Una ventaja del método fue que al trabajar únicamente con la cantidad de partículas y del empaquetamiento de éstas, las ecuaciones son válidas para cualquier tipo de agregado, sin importar su forma o textura, siempre que estos fueran conservados durante todo el empaquetamiento (Fennis y Walraven, 2012). En 1931, Furnas (Furnasz, 1931) extiende el método, permitiendo calcular la máxima densidad de empaquetamiento de múltiples grupos de agregados, lo cual siguió perfeccionándose con el correr de los años por medio de otros autores (Fennis y Walraven, 2012).

Hoy en día, es posible determinar el esqueleto granular, mediante el análisis de la densidad máxima, cuyos métodos trabajan únicamente con la distribución de tamaño de partículas y la densidad de empaquetamiento de los agregados incluidos a la mezcla. Se determina la máxima densidad de empaquetamiento, como la mayor densidad obtenida mediante distintas mezclas de agregados. Procurando finalmente obtener la curva de mayor compacidad, determinada por las proporciones de agregados que conforman la mezcla más compacta (Fennis y Walraven, 2012).

Uno de los modelos analíticos más utilizado en la actualidad es el método semi-empírico de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007), en el cual mediante la compactación de distintos grupos de partículas se determina el empaquetamiento óptimo, como resultado de la mezcla con máxima densidad y por ende, menor fracción de poros.

El método consiste en compactar mezclas con distintas proporciones de agregados, comenzando por los dos grupos de partículas de mayor dimensión y prosiguiendo en la incorporación individual de granos con tamaños consecutivamente menores. A modo de ejemplo, si quisiéramos obtener la curva de mayor compacidad compuesta por un agregado grueso (piedra) y dos agregados finos (arena gruesa y arena fina), primero se aplicaría el método al conjunto de la piedra y la arena gruesa, generando mezclas con distintas proporciones de cada uno de ellos y una vez obtenida la mezcla con mayor densidad se le incorporaría la arena fina. En la segunda iteración del método, la piedra y la arena gruesa se corresponden con las partículas grandes mientras que las partículas pequeñas serán establecidas por la arena fina. De esta manera el método busca rellenar con partículas pequeñas los vacíos que se van generando en mezclas de mayor granulometría, de manera de obtener la mayor compacidad posible. Para cada una de las mezclas generadas es necesario determinar la masa unitaria compactada (Ecuación 3.3), la masa específica de la mezcla (Ecuación 3.4), y la fracción de poros (Ecuación 3.5) (Tutikian y Alegre, 2007).

$$M_{unit}AB = \frac{m}{v} \quad 3.3$$

donde

M_{unitAB} es la masa unitaria compactada de la mezcla de agregados A y B, expresada en gramos/litros;

m es la masa compactada de la mezcla, expresada en gramos;

v es el volumen del recipiente donde se compacta la mezcla, expresado en litros.

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} * (\%A)) + (M_{espB} * (\%B))}{100} \quad 3.4$$

donde

M_{espAB} es la masa específica de la mezcla de agregados A y B, expresada en gramos/litros;

M_{espA} es la masa específica del agregado A, expresada en gramos/litros;

M_{espB} es masa específica del agregado B, expresada en gramos/litros;

$\%A$ es la proporción del agregado A en la mezcla, expresada en porcentaje;

$\%B$ es la proporción del agregado B en la mezcla, expresada en porcentaje.

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} * 100 \quad 3.5$$

donde

V es la fracción de poros, expresado en porcentaje;

M_{espAB} es la masa específica de la mezcla de agregados A y B, expresada en gramos/litros;

M_{unitAB} es la masa unitaria compactada de la mezcla de agregados A y B, expresada en gramos/litros.

C. Métodos de elementos discretos

Son modelos discretos generados a partir de una estructura virtual de partículas. Como en los casos anteriores, estos modelos fueron avanzando junto con el tiempo, comenzaron como modelos tridimensionales donde no era posible cambiar la posición de las partículas, obteniendo un resultado en el que las partículas no tenían contacto entre sí y que no representaba claramente un empaquetamiento granular. Con la evolución computacional, estos modelos permiten la simulación de estructuras virtuales en las que se conocen el tamaño, la forma y la ubicación de partículas.

Algunos autores resolvieron estos problemas, sin embargo, con el avance de los métodos, aparecen nuevas variables de entrada entre los cuales se encuentran el tamaño de partículas, el tamaño del recipiente que las contiene y/o la cantidad de partículas, la gravedad, la densidad,

el amortiguamiento, la elasticidad, el corte, la fricción y el contacto entre partículas; lo que resulta de mayor complejidad y vuelven el método más lento y trabajoso (Fennis y Walraven, 2012).

3.2. Metodología

Con la finalidad de estudiar la aptitud de los agregados para su implementación en hormigón de alto desempeño producido a escala industrial, se seleccionaron los materiales disponibles en la empresa de referencia, procurando que cumplieran con las recomendaciones brindadas en la bibliografía, además de los lineamientos establecidos por la normativa nacional vigente (UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005)).

Los materiales seleccionados fueron dos agregados finos disponibles en la empresa: arena fina (AF) y arena gruesa (AG), identificadas por sus módulos de finura como $1,1 \pm 0,30$ y $3,7 \pm 0,3$, respectivamente. Si bien, se analizaron otras arenas gruesas disponibles, la selección de la arena mencionada se debió principalmente a su disponibilidad y frecuencia en la planta.

Se procuró utilizar como agregado grueso una piedra partida (PP) granítica, conocida a nivel nacional por su buena calidad. Se prefirió la piedra partida sobre el pedregullo, ya que su método de obtención disminuye las fallas en la microestructura, volviendo el material más resistente. Siguiendo las recomendaciones de los autores de referencia, se seleccionó la PP disponible de menor TMA (5-14) mm.

Los materiales seleccionados fueron caracterizados siguiendo los lineamientos de la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005), y posteriormente se evaluó la curva de mayor compacidad mediante dos métodos: el método matemático de Andreasen y Andersen modificado (A&A) (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) y el método semi-empírico de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007).

3.2.1. Caracterización de los agregados

Para evaluar el uso potencial de los agregados en hormigón, particularmente de alto desempeño, se realizó la caracterización mediante ensayos micro y macroscópicos. Los ensayos físicos realizados a los agregados fueron los siguientes: Composición granulométrica (UNIT-NM 248:2002 (UNIT, 2002a)), densidad y absorción (UNIT-NM 52:2002 (UNIT, 2002b)), UNIT-NM 30:2002 (UNIT, 2002c), UNIT-NM 53:2002 (UNIT, 2002d)), terrones de arcilla (UNIT-NM 44:1998 (UNIT, 1998b)), material pasante del tamiz 75 micras (UNIT-NM 46:2002 (UNIT, 2002e)), coeficiente de forma (UNIT 1029:99 (UNIT, 1999)). La forma de las partículas de agregado fino se analizó mediante microscopio óptico. Por lo tanto, se presentan en esta sección los procedimientos empleados para la caracterización de las muestras.

3.2.1.1. Preparación de las muestras de ensayo

Se caracterizaron tres muestras de material, dos de agregados finos y una de agregado grueso, cuyas identificaciones son presentadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Identificación de los Agregados Caracterizados

Tipo de Agregado	Identificación	Descripción
Agregado Fino	AF	Arena Fina
	AG	Arena Gruesa
Agregado Grueso	PP	Piedra Partida 5-14

Las muestras (25 kg), fueron extraídas de los acopios de la planta, siguiendo los lineamientos de la norma UNIT NM 26:2002 (UNIT, 2002f). Se secaron en horno hasta masa constante, a 105°C, y posteriormente se realizó el cuarteo siguiendo el procedimiento del Método “A”-Separador Mecánico (UNIT-NM 27:2002 (UNIT, 2002g)). Las cantidades mínimas, obtenidas finalmente, para cada ensayo se encuentran en la Tabla 3.2.

Para la obtención de terrones de arcilla en los agregados finos, se utilizaron muestras de ensayo de aproximadamente 2500 g, se lavaron por el tamiz 75 μm y luego se tamizaron, obteniéndose finalmente 850 g secos retenidos en los tamices 1,18 mm y 0,6 mm para la AG y AF respectivamente.

Tabla 3.2. Cantidades Mínimas para Ensayos

Agregado	Agregado Fino		Agregado Grueso	
	Ensayo	Cantidad (g)	Norma	Cantidad (g)
Difracción de rayos X	500	-	500	-
Composición Granulométrica	1000	UNIT-NM 248:2002 (UNIT, 2002a)	2000	UNIT-NM 248:2002 (UNIT, 2002a)
Densidad	1000	UNIT-NM 52:2002 (UNIT, 2002b)	2000	UNIT-NM 53:2002 (UNIT, 2002d)
Absorción	1000	UNIT-NM 30:2002 (UNIT, 2002c)		
Terrones de Arcilla	850	UNIT-NM 44:1998 (UNIT, 1998b)	-	-
Material pasante del Tamiz 75 μm	500	UNIT-NM 46:2002 (UNIT, 2002e)	-	-
Coefficiente de forma	-	-	20 granos	UNIT 1029:99 (UNIT, 1999)

3.2.1.2. Ensayos

A. Composición Granulométrica

El estudio de la granulometría de los agregados resulta de gran importancia ya que, en la mayoría de los casos, establece el punto de partida para la optimización de la compacidad de la mezcla.

El ensayo de composición granulométrica (UNIT-NM 248:2002 (UNIT, 2002a)) consiste en determinar las fracciones de tamaño de partículas presentes en una muestra. Pudiendo, además, determinar su graduación (como se distribuyen estas fracciones). El objetivo principal de este ensayo es representar la curva granulométrica de la muestra. Pudiendo también determinar el Tamaño Máximo del Agregado (TMA), definido como la abertura del tamiz de la serie normal cuyo porcentaje retenido acumulado es igual o inferior al 5% en masa (UNIT 82:1951 (UNIT, 1951)).

Por último, también se podrá obtener el Módulo de Finura (MF), principalmente en agregados finos, como la suma de los retenidos acumulados en los tamices de la serie normal (UNIT NM 248:2002 (UNIT, 2002a)) dividido entre 100. Este parámetro representa un índice de la finura del agregado. Cuanto mayor sea su valor, más grueso es el material que se está analizando.

B. Densidad

Se determinó la densidad de los agregados por dos motivos, en primer lugar, para aplicar el método de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007), consistente en la determinación de las proporciones óptimas de agregados mediante la compactación de distintas mezclas. Obteniéndose la mayor compactación, en la mezcla que presenta la menor fracción de poros y consecuentemente la máxima densidad. Para la aplicación del método es importante conocer las densidades de los agregados, ya que proporcionan el valor de la masa específica de la mezcla, inevitable para conocer la fracción de poros.

En segundo lugar, es necesario tener la densidad de todos los materiales componentes del hormigón para poder establecer la dosificación por peso de cada uno de ellos; motivo también por el cual se realizó el ensayo UNIT-NM 52:2002 (UNIT, 2002b), UNIT-NM 53:2002 (UNIT, 2002d).

C. Absorción

La absorción se determinó con la finalidad de evitar que el agua absorbida por los agregados altere la cantidad de agua de amasado y consecuentemente la resistencia mecánica y la trabajabilidad del hormigón, los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos de las normas UNIT NM 30:2002 (UNIT, 2002c) y UNIT-NM 53:2002 (UNIT, 2002d).

D. Terrones de Arcilla

Resulta importante conocer la cantidad de terrones de arcilla ya que partículas finas como las arcillas tienden a absorber parte del agua de amasado, afectando la trabajabilidad y la durabilidad del hormigón. El ensayo de terrones de arcilla se realizó siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-NM 44:1998 (UNIT, 1998b).

E. Material Pasante por el Tamiz 75 μ m

Las partículas finas (menores a 0,075 mm) como los limos o las arcillas, pueden afectar el desempeño del hormigón (al disminuir la adherencia entre la pasta y el agregado) en cuanto a sus propiedades físico-mecánicas. Adicionalmente, éstas tienden a absorber parte del agua de

amasado, afectando la trabajabilidad. El ensayo se realizó en los agregados finos, siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-NM 46:2002 (UNIT, 2002e).

F. Coeficiente de Forma

El ensayo de coeficiente de forma (UNIT 1029:99 (UNIT, 1999)) se realizó con la finalidad de evaluar el grado de redondez de la PP, (cuanto mayor sea este valor, más redondeadas son las partículas). Las muestras de ensayo se conformaron por 57 y 46 granos cada una, obteniéndose prácticamente el mismo resultado final para ambas. El volumen de los agregados se determinó mediante la resta del peso saturado a superficie seca y el peso sumergido de los mismos.

3.2.2. Curva de mayor compacidad

Se plantea realizar una combinación entre el método de Andreasen & Andersen modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) y el método experimental de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007) implementando el procedimiento establecido por la norma ASTM C29 (ASTM, 2003).

En base al desconocimiento del coeficiente de distribución óptimo para los agregados seleccionados, se propone, obtener mediante el método de O'Reilly la combinación de agregados que determinen la menor fracción de poros en la mezcla y consecuentemente la mayor densidad. Para luego, a partir de las proporciones obtenidas aproximar la curva resultante a la curva óptima de Andreasen & Andersen modificado, mediante la iteración del coeficiente de distribución.

Se procuró obtener el esqueleto granular mediante el método de O'Reilly, ya que éste se encuentra desvinculado a la forma de las partículas, las cuales son decisivas y más preponderantes que la granulometría (Tutikian y Alegre, 2007). De esta manera, la curva de mayor compacidad representa más adecuadamente a los agregados utilizados que la obtenida mediante métodos de curvas ideales, los cuales no incorporan la forma de la partícula en sus análisis.

Se destaca que, si bien el método es más confiable a las partículas que se utilizan, requiere de mayores plazos de tiempo para su implementación. Dicho esto, se espera obtener una similitud con el método de Andreasen & Andersen modificado debido a su practicidad, una vez generada la planilla de Excel, los únicos datos de entrada serán los tamaños de partículas y sus granulometrías. En caso de poder vincular el coeficiente de distribución a las proporciones obtenidas por el método de O'Reilly, es posible para futuras dosificaciones en las que se utilicen los mismos agregados, mantener este valor constante.

3.3. Presentación y análisis de resultados

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados y la determinación de la curva de mayor compacidad.

3.3.1. Caracterización de los agregados

3.3.1.1. Ensayos

A. Composición Granulométrica

La Tabla 3.3 presenta los resultados de la composición granulométrica de los agregados finos (AF y AG) y gruesos (PP), así como también el MF para las arenas y el TMA para la PP.

La Figura 3.1 presenta las curvas granulométricas junto con los límites establecidos por tres normativas. Todos los agregados fueron analizados mediante la norma IRAM 1627 (IRAM, 1997) y la norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005). Para el agregado fino se contemplaron los límites establecidos por la norma nacional UNIT 82:1951 (UNIT, 1951); no disponiendo de referencias para agregados gruesos.

La norma argentina, IRAM 1627 (IRAM, 1997), presenta una franja óptima, delimitada por los límites A y B, en donde la curva granulométrica debería quedar contenida. Para obras no muy emblemáticas, se permite que la granulometría de arenas naturales sobresalga de los límites establecidos por la granulometría B, evitando exceder del límite C.

La norma brasilera, ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005), presenta cuatro granulometrías límites, recomienda que la curva granulométrica quede intermedia a las curvas límites óptimas. Para aquellas granulometrías que excedan la zona óptima, contempla dos franjas tolerables representadas mediante los límites utilizables.

La norma nacional, UNIT 82:1951 (UNIT, 1951), presenta dos zonas. La clase I se corresponde a una zona óptima en la que se recomienda que la curva quede contenida en la misma y la clase II presenta una zona con límites inferiores y superiores; contemplando una tolerancia adicional para las curvas excedentes a la clase I.

Tabla 3.3. Resultados composición granulométrica; Pasantes (%), TMA y MF.

Abertura Tamiz (mm)	Pasantes (%)		
	AF	AG	PP
19,00	100,0	100,0	100,0
12,50	100,0	100,0	97,0
9,50	100,0	99,9	72,8
4,75	100,0	90,0	17,4
2,36	100,0	64,0	3,4
1,18	100,0	34,7	1,9
0,60	97,5	15,5	1,4
0,30	67,0	4,11	1,2
0,15	7,6	0,7	0,9
0,00	0,0	0,0	0,0
TMA (mm)			12,5
MF	1,28	3,91	

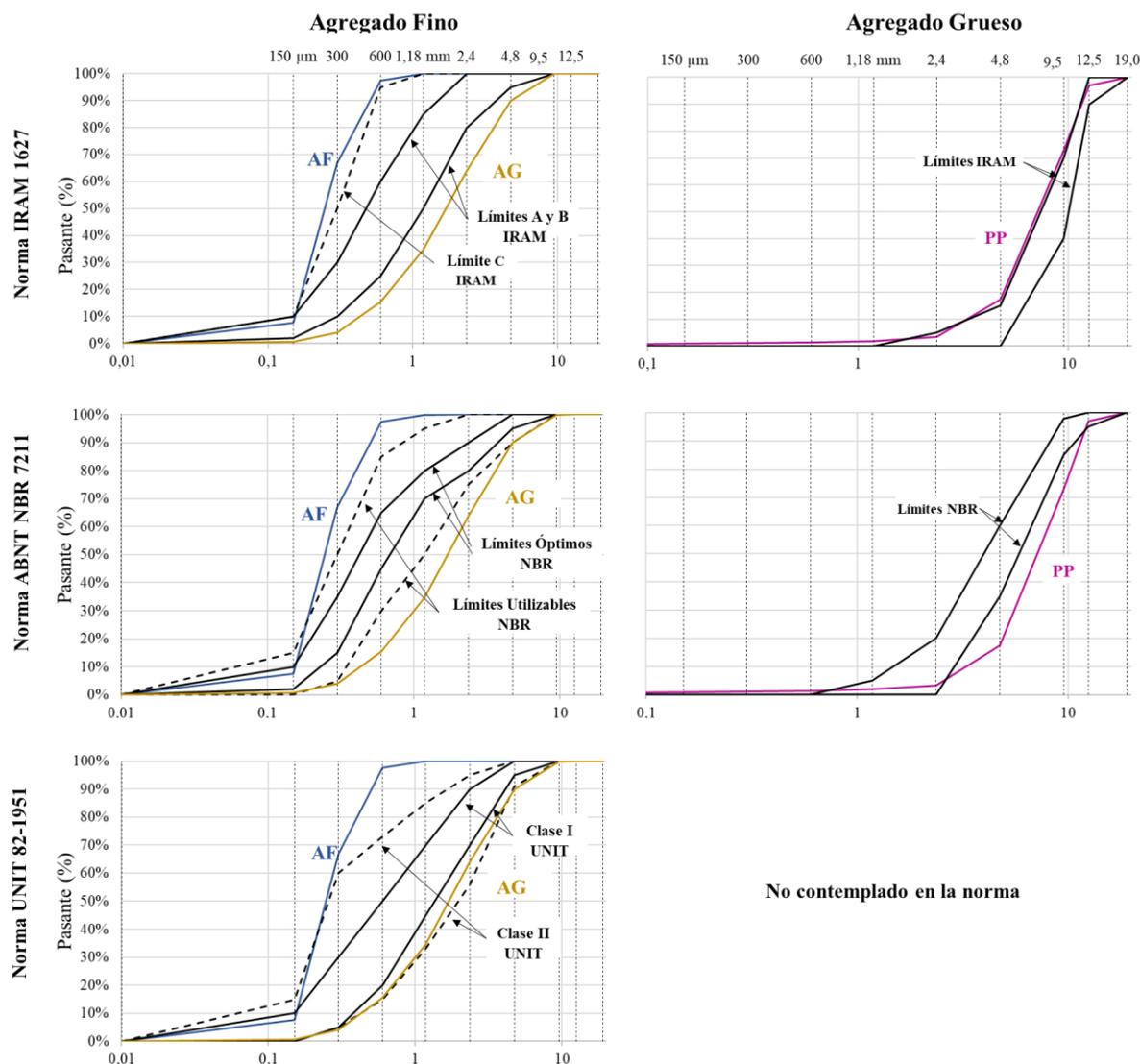


Figura 3.1. Curvas granulométricas; y límites establecidos por normas IRAM 1627 (IRAM, 1997), ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005), UNIT 82-1951 (UNIT, 1951).

B. Densidad

La Tabla 3.4 presenta los resultados obtenidos para el ensayo de densidad.

Tabla 3.4. Resultados de las densidades de los agregados

Densidades (g/cm^3)	AF	AG	PP
d_1^*	2,54	2,63	2,60
d_2^{**}	2,55	2,61	2,60
d_3^{***}	2,58	2,60	2,61

*Densidad aparente del agregado seco (Volumen sin considerar los poros permeables)

**Densidad aparente del agregado saturado a superficie seca.

***Densidad del agregado (Volumen real del agregado, considerando poros permeables)

C. Absorción

La Figura 3.2 presenta la secuencia de ensayo para obtener la absorción en los agregados finos y la Tabla 3.5 los resultados obtenidos junto al límite máximo permitido por normativa.

Tabla 3.5. Resultados de Absorciones de los agregados

	AF	AG	PP	Límite máximo (UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005))
Absorción (%)	0,70	0,50	0,33	5



Figura 3.2. Obtención de condición saturada a superficie seca

D. Terrones de Arcilla

La Tabla 3.6 presenta los resultados obtenidos para el ensayo de terrones de arcilla en los agregados finos, junto con el límite máximo permitido por normativa.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de terrones de arcilla en los agregados

	AF	AG	Límite máximo (UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005))
Terrones de arcilla (%)	0,11	0,21	1,5

E. Material Pasante por el Tamiz 75 µm

La Tabla 3.7 presenta los resultados obtenidos junto al límite máximo permitido por normativa y las Figura 3.3.a y 3.3.b la muestra de AG con y sin partículas finas, respectivamente.

Tabla 3.7. Resultados pasante tamiz 75 µm

	AF	AG	Límite máximo (UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005))
Pasante tamiz 75 µm (%)	0,20	0,96	5

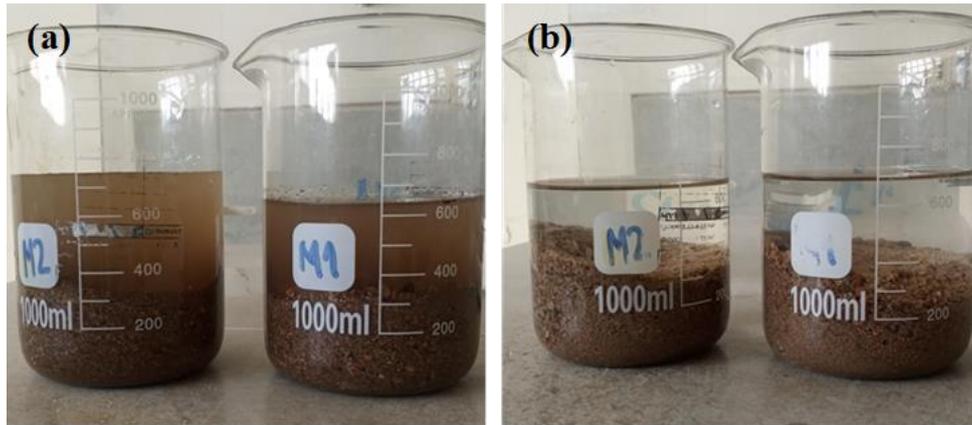


Figura 3.3. Pasante tamiz 75 µm

F. Coeficiente de Forma

Se obtuvo un valor de coeficiente de forma del agregado grueso igual a 0,44, mayor al límite inferior de 0,20 establecido por la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005). La Figura 3.4 muestra el agregado seleccionado.



Figura 3.4. Piedra Partida 5-14

G. Forma del agregado fino mediante microscopio óptico

Se analizó la forma de los agregados finos (AF y AG) mediante un microscopio óptico. Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran la forma redondeada y angulosa de las partículas de la arena fina y la arena gruesa respectivamente.

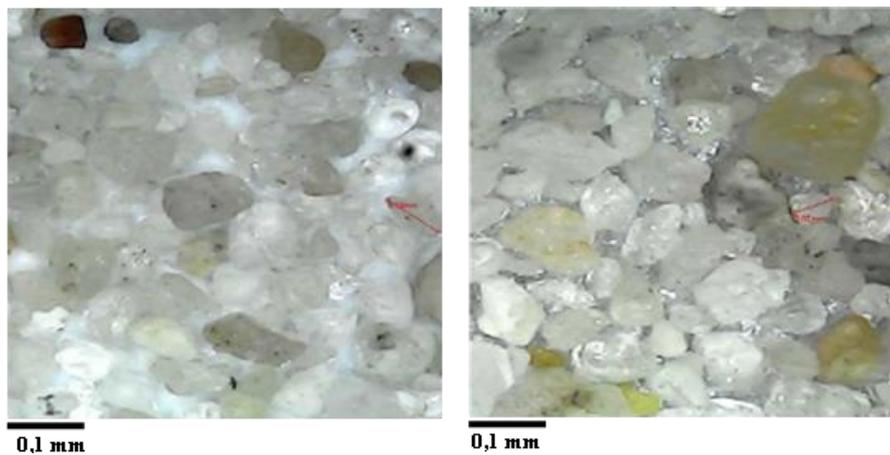


Figura 3.5. Análisis óptico de la AF.



Figura 3.6. Análisis óptico de la AG.

3.3.1.2. Análisis de resultados

A partir de los resultados de granulometría obtenidos para la AF se destaca que las fracciones de partículas entre 0,15 y 1,18 mm no se encuentran dentro de los rangos planteados por las normativas. Presentando en ambos casos, la mayor dispersión en las partículas menores a 0,3 y 0,6 mm, resultando en un material más fino que lo esperado.

La AG resultó ser más gruesa que el rango óptimo, quedando contenida dentro del límite inferior de la clase II planteada por la norma UNIT 82:1951 (UNIT, 1951) y por fuera de los límites establecidos por las restantes normativa.

El agregado grueso, no cumple con los límites establecidos por las normativas, quedando levemente por encima del límite superior de la norma IRAM 1627 (IRAM, 1997) y presentando fracciones más gruesas que las permitidas por el límite inferior de la norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005).

Del análisis realizado anteriormente se destaca que, si bien los agregados finos estudiados individualmente no cumplen con todos los límites establecidos, presentando la arena fina fracciones más finas de lo previsto y la gruesa fracciones más gruesas, una combinación óptima

de ambas podría resultar en una curva dentro de los rangos establecidos. Lo cual se evaluará al determinar las proporciones óptimas para la curva de mayor compactación, presentado en la sección 3.3.3.

El coeficiente de forma de la piedra partida se encuentra por encima del valor mínimo presentado en la norma de referencia, indicando su valor una forma sub-redondeada. Mediante la observación microscópica del agregado fino, se resalta la redondez de la AF, presentando granos bastante esféricos. Caso contrario al de la AG, con partículas sub-angulosas.

Para los restantes ensayos realizados se destaca que tanto la absorción como la presencia de finos en las muestras, no son parámetros limitantes.

3.3.2. Curva de mayor compactación

3.3.2.1. Método de O'Reilly

Se elaboraron 6 mezclas con distintas proporciones de PP y AG (ASTM C29 (ASTM, 2003)). Para cada una de ellas se realizaron tres repeticiones, a partir de lo cual se determinó la masa unitaria compactada (Ecuación 3.3), la masa específica de la mezcla (Ecuación 3.4), y la fracción de poros (Ecuación 3.5). Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran las mezclas elaboradas de AG y PP, y la secuencia de mezclado y compactado. La Tabla 3.8 y Figura 3.9 presentan los resultados.

Tabla 3.8. Proporciones AG – PP método O'Reilly con procedimiento ASTM C29 (ASTM, 2003).

AG (%)	PP (%)	Masa unitaria compactada (g/cm ³)	Masa específica de la mezcla (g/cm ³)	Fracción de Poros (%)
100	0	1561	2460	36,53
60	40	1707	2512	32,03
50	50	1734	2525	31,35
40	60	1727	2538	31,96
30	70	1670	2551	34,54
0	100	1452	2590	43,94

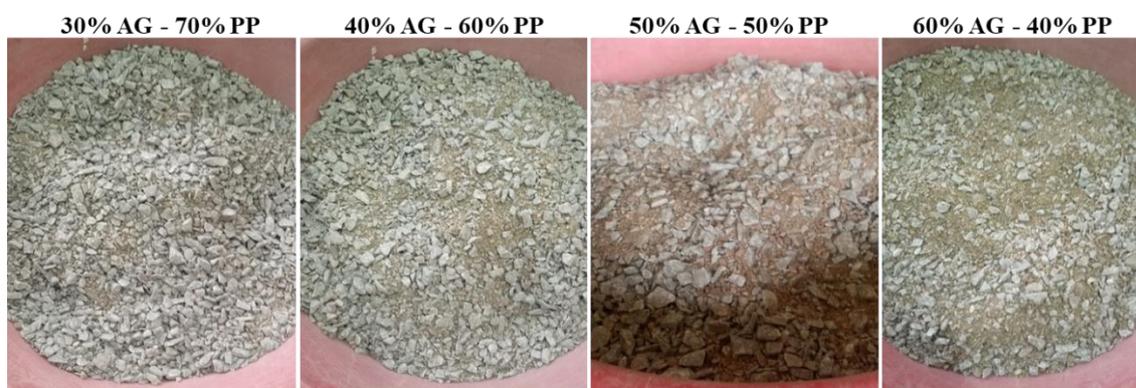


Figura 3.7. Mezclas AG y PP, método O'Reilly con procedimiento ASTM C29.



Figura 3.8. Secuencia de mezclado y compactado

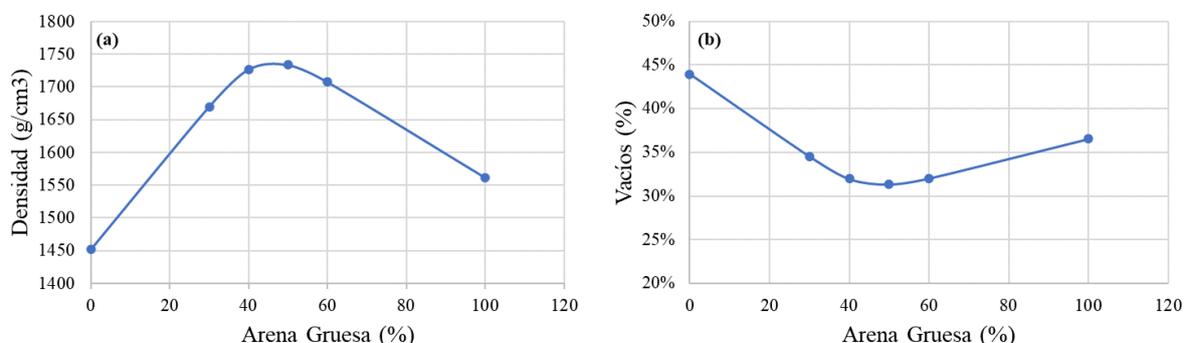


Figura 3.9. Densidad (a) y fracción de poros (b) para las mezclas de AG – PP

La incorporación y aumento proporcional de la AF como parte del esqueleto granular, disminuye la cantidad de PP incluida a la mezcla, afectando consecuentemente el módulo de elasticidad y la resistencia final del hormigón. Se procuró, entonces, trabajar con mezclas que contuvieran mayor proporción de PP (30 % AG - 70 % PP y 40 % AG - 60 % PP), cuya densidad no difiere en gran medida con la densidad máxima obtenida (50 % AG – 50 % PP).

Se elaboraron 7 mezclas (ASTM C29 (ASTM, 2003)) para ambas proporciones, variando el porcentaje de arena fina agregada, se calcularon nuevamente la masa unitaria compactada (Ecuación 3.3), como un promedio de tres determinaciones, la masa específica de la mezcla (Ecuación 3.4), y la fracción de poros (Ecuación 3.5). La Figura 3.10 muestra las mezclas elaboradas de AF, AG y PP. La Tablas 3.8 y 3.9 los resultados obtenidos para las mezclas compuestas por (30 % AG - 70 % PP) y (40 % AG - 60 % PP) respectivamente y la Figura 3.11 grafica los resultados de densidad y vacíos en función del porcentaje de AF.

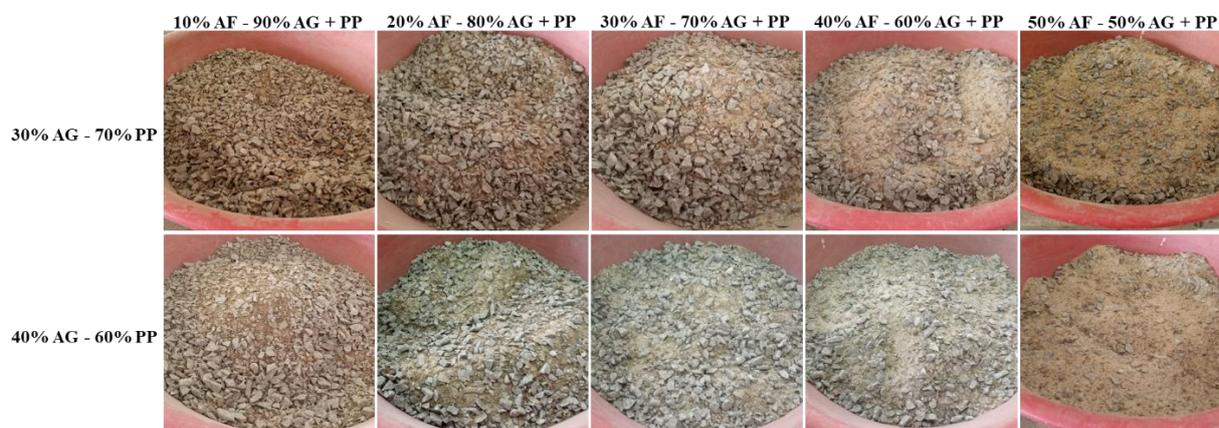


Figura 3.10. Mezclas de AF, AG y PP.

Tabla 3.9. Proporciones AF con mezcla 30 % AG – 70 % PP, método O'Reilly

AF (%)	AG + PP 30 % - 70%	AG (%)	PP (%)	Masa unitaria compactada (g/cm ³)	Masa específica de la mezcla (g/cm ³)	Fracción de Poros (%)
0	100	30	70	1670	2551,00	34,54
10	90	27	63	1788	2550,90	29,93
20	80	24	56	1887	2550,80	26,04
30	70	21	49	1928	2550,70	24,41
40	60	18	42	1929	2550,60	24,37
50	50	15	35	1900	2550,50	25,52
100	0	0	0	1620	2550,00	36,45

Tabla 3.10. Proporciones AF con mezcla 40 % AG – 60 % PP, método O'Reilly

AF (%)	AG + PP 40 % - 60%	AG (%)	PP (%)	Masa unitaria compactada (g/cm ³)	Masa específica de la mezcla (g/cm ³)	Fracción de Poros (%)
0	100	40	60	1727	2538	31,96
10	90	36	54	1805	2539	28,92
20	80	32	48	1920	2540	24,41
30	70	28	42	1937	2542	23,79
40	60	24	36	1913	2543	24,76
50	50	20	30	1875	2544	26,29
100	0	0	0	1620	2550	36,45

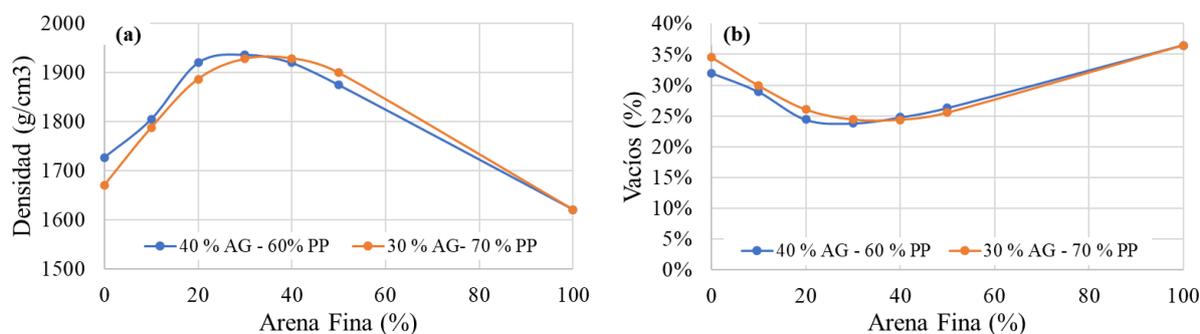


Figura 3.11. Densidad (a) y fracción de poros (b) para las mezclas de AF - AG – PP en función del porcentaje de AF.

Se calcularon los costos de las mezclas cuyas densidades obtenidas fueron mayores a 1800 g/cm³, con la finalidad de evaluar costos Vs. mayor densidad. Los resultados son presentados en la Figura 3.12.

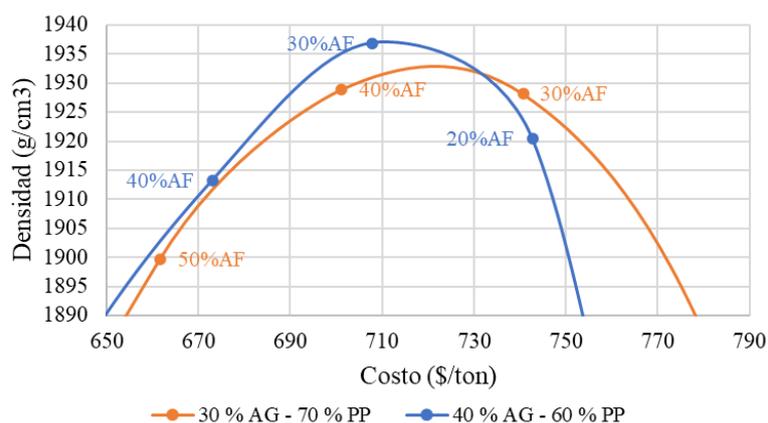


Figura 3.12. Análisis de la compacidad de la mezcla vs. costo

En base a los resultados obtenidos se destaca que las mezclas (30 % AF – 28 % AG – 42 % PP) y (40 % AF - 18 % AG – 42 % PP) presentaron mayor compacidad a un costo no muy elevado.

3.3.2.2. Método de Andreasen & Andersen modificado

Se generó una planilla Excel que, mediante los parámetros de entrada, permite determinar la curva que mejor se aproxima a la curva ideal de A&A (Christ, 2019). De esta manera, una vez ingresados los parámetros de entrada (granulometría, tamaño de partículas y coeficiente de ajuste), se iteran las proporciones de los agregados hasta obtener el menor valor posible del Índice de Desvío de Empaquetamiento, lo cual representa la curva de mayor compacidad.

En este caso, partiendo de las combinaciones óptimas de agregados (obtenidas por O'Reilly) se iteró el coeficiente de ajuste (q) hasta obtener el menor IDE. Se definieron como parámetros de entrada las granulometrías obtenidas en la caracterización de los agregados, y los valores de D_{max} y D_{min} como las aberturas mayor y menor, respectivamente, de los tamices utilizados al realizar la composición granulométrica (12500 μm y 150 μm). La Tabla 3.11 y la Figura 3.13 muestran los resultados obtenidos y la Figura 3.14 presenta una captura de pantalla de la planilla generada.

Tabla 3.11. Valores de IDE obtenidos para distintos coeficientes de ajuste, para las curvas óptimas de O'Reilly

q	IDE	
	30 % AF - 28 % AG - 42 % PP	40 % AF - 18 % AG - 42 % PP
0,20	44 %	64 %
0,21	44 %	65 %
0,22	44 %	66 %
0,23	44 %	67 %
0,24	44 %	68 %
0,25	44 %	69 %
0,26	46 %	70 %
0,27	47 %	71 %
0,28	48 %	72 %
0,29	49 %	73 %
0,30	49 %	74 %
0,31	50 %	75 %
0,32	51 %	76 %
0,33	52 %	77 %
0,34	53 %	78 %
0,35	55 %	79 %
0,36	56 %	81 %
0,37	57 %	83 %

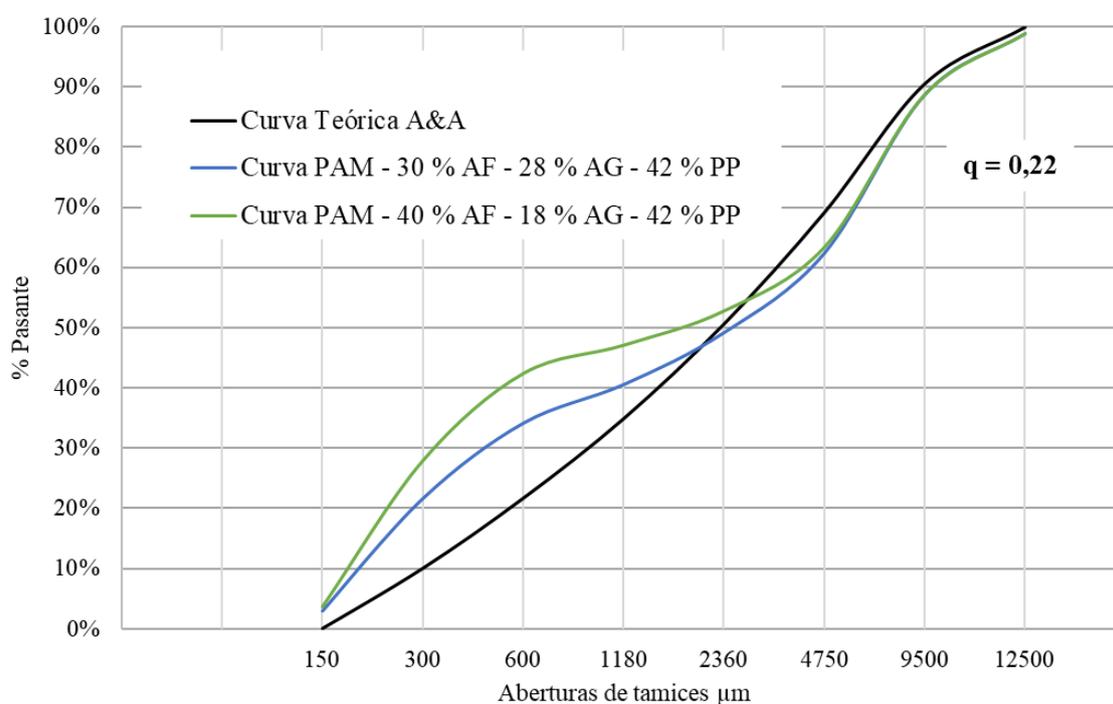


Figura 3.13. Método A&A para el esqueleto granular obtenido por O'Reilly

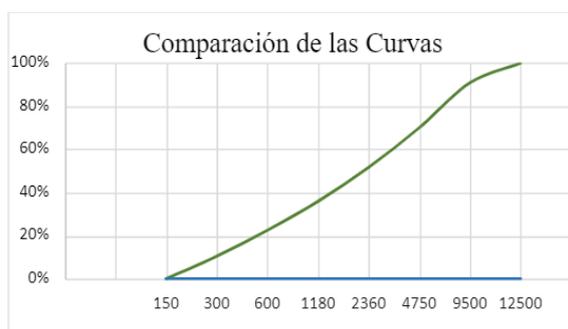
Datos de entrada por usuario	
Datos de entrada del Modelo Andreasen y Andersen modificado	
Coefficiente de distribución q	0,2
D _{min} (µm)	150
D _{máx} (µm)	12500

IDE	
Porcentajes a Iterar	
Material	Q (%)
Arena fina	
Arena Gruesa	
PP 5-14	

$$PAD (\%) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} * 100$$

Curva Teórica Andreasen y Andersen Modificado	
Tamaño de partícula (µm)	Pasante acumulado - PAD (%)
12500	100%
9500	91%
4750	70%
2360	52%
1180	36%
600	22%
300	10%
150	0%

Granulometrías obtenidas por ensayos - Pasantes Acumulados (%)			
Tamaño de partícula (µm)	Arena fina	Arena Gruesa	PP 5-14
12500	100%	100%	97%
9500	100%	100%	73%
4750	100%	90%	17%
2360	100%	64%	3%
1180	100%	35%	2%
600	98%	16%	1%
300	67%	4%	1%
150	8%	1%	1%



$$PAM (\%) = \sum (Q * D_{requerido}) * 100$$

Porcentajes Acumulados de la Mezcla (%)				
Tamaño de partícula (µm)	Arena fina	Arena Gruesa	PP 5-14	PAM (%)
12500	0%	0%	0%	0%
9500	0%	0%	0%	0%
4750	0%	0%	0%	0%
2360	0%	0%	0%	0%
1180	0%	0%	0%	0%
600	0%	0%	0%	0%
300	0%	0%	0%	0%
150	0%	0%	0%	0%

IDE	
Diferencia entre curva teórica y Mezcla	Valor Absoluto
100%	100%
91%	91%
70%	70%
52%	52%
36%	36%
22%	22%
10%	10%
0%	0%

Figura 3.14. Planilla Excel para el método de A&A

Se destaca que si bien ambos esqueletos granulares brindaron altas densidades, la mezcla compuesta por 30 % AF, 28 % AG y 42% PP presenta no sólo mayor densidad mediante el método de O'Reilly, sino que también resulta ser la curva práctica que mejor se ajusta a la curva teórica de A&A, brindando valores de IDE considerablemente menores a los obtenidos para la mezcla restante. Se observa que, a menor valor del coeficiente de ajuste, menor es el IDE obtenido, resultando en un valor constante para el rango de q entre 0,20-0,25.

3.3.3. Verificación del esqueleto granular - límites normativos

La Figura 3.15 muestra a la derecha la curva obtenida del esqueleto granular (30 % AF, 28 % AG y 42% PP) junto a los límites establecidos por la norma IRAM 1627 (IRAM, 1997) y a la izquierda la combinación determinada para las arenas. Es posible observar que la combinación óptima obtenida para la curva de mayor compacidad (30 % AF, 28 % AG y 42% PP) mediante el método de O'Reilly, determina una curva granulométrica contenida dentro de las zonas aceptadas por las normativas establecidas en la Sección 3.3.1

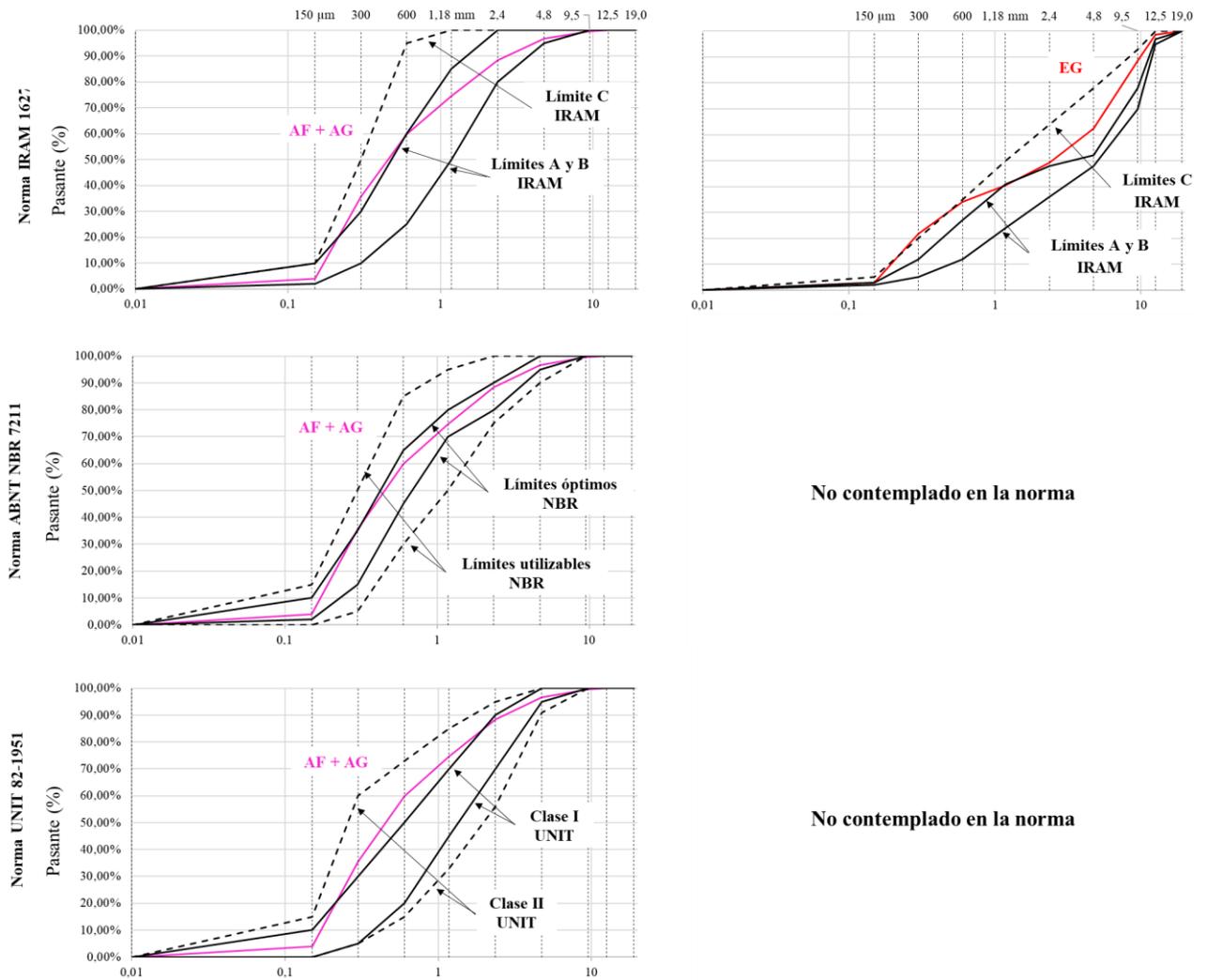


Figura 3.15. Curva granulométrica de mayor compacidad (método de O'Reilly) de la combinación de arenas AF-AG, según límites de las normas IRAM 1627 (IRAM, 1997), ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005) y UNIT 82:1951 (UNIT, 1951).

3.4. Conclusiones parciales

Con el fin de obtener un hormigón HAD C70, entre los materiales disponibles fueron seleccionados los agregados que en lo posible cumplieran con las recomendaciones para Hormigón de Alto Desempeño presentadas por la bibliografía. Se decidió utilizar como agregado grueso la PP, debido a la disminución de las fallas en su microestructura; consecuencia de su método de extracción. Dentro de los tamaños útiles de PP, se procuró que el TMA cumpliera con las recomendaciones presentadas por Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990); procurando seleccionar el menor tamaño posible (PP 5-14).

La caracterización de los agregados se realizó en forma exitosa, obteniéndose, en su mayoría, resultados aceptables según los lineamientos de la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005).

Fue posible determinar la curva de mayor compacidad mediante el Método experimental de O'Reilly, estableciendo la mayor densidad para la combinación 30 % AF, 28 % AG y 42 % PP, resultando en un MF=3,55, valor mayor a los recomendados por Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990).

Se logró vincular los resultados del método experimental con el método analítico de A&A modificado, presentando la curva de mayor densidad, también el menor IDE. Se constató que un coeficiente de ajuste dentro del rango de [0,22 – 0,25] resulta adecuado para trabajar con los agregados seleccionados.

La curva de mayor compacidad manifestó curvas granulométricas dentro de los límites establecidos por las normas IRAM 1627 (IRAM, 1997), ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005), UNIT 82:1951 (UNIT, 1951), mostrando que, si bien los agregados individualmente no cumplían con los requerimientos granulométricos, en su conjunto forman un esqueleto granular compacto y adecuado para su implementación en hormigón.

Capítulo 4 - Dosificación

El objetivo de este capítulo es obtener, a partir de los materiales seleccionados en los Capítulos 2 y 3, una dosificación de HAD en laboratorio que sea viable para implementar a escala industrial, asegurando una resistencia característica mínima de 70 MPa y una trabajabilidad adecuada para ser bombeable. Se analizan diferentes métodos de dosificación y se propone una combinación que aprovecha sus ventajas, se describe la metodología utilizada en el laboratorio para determinar una mezcla de Hormigón de Alto Desempeño. Se realizan ajustes experimentales hasta obtener una dosificación que cumpla con los requerimientos establecidos. Posteriormente, se lleva a cabo la caracterización completa de la mezcla definida, se estudia la variabilidad de los resultados y se determina la resistencia característica alcanzada. Finalmente, se analiza la pérdida de trabajabilidad, buscando alternativas que aseguren su viabilidad para la producción a escala industrial.

4.1. Introducción

4.1.1. Métodos de Dosificación

Los métodos de dosificación buscan determinar la combinación adecuada y económica de los componentes de una mezcla inicial de hormigón que cumpla con ciertas propiedades requeridas (Aïtcin, 1998).

Al diseñar mezclas de Hormigón de Alto Desempeño (HAD), la aplicación de los métodos convencionales de dosificación deja de ser adecuada debido a factores que, si bien no son considerados por los métodos, afectan las propiedades obtenidas y, por consiguiente, los rangos establecidos por los mismos. Por ejemplo, la implementación de adiciones minerales, que en la mayoría de los métodos convencionales no suelen ser consideradas, es un fenómeno muy habitual en los HAD y, en algunos casos, puede reemplazar grandes cantidades de cemento. Además, con la implementación de aditivos superplastificantes la relación agua/aglomerante se reduce a valores muy bajos, que no se encuentran dentro de los rangos admitidos por algunos métodos (Aïtcin, 1998).

Encontrar un método adecuado y óptimo para la dosificación de los HAD se ha convertido en un desafío debido a la complejidad de predecir teóricamente las propiedades del hormigón. Sin embargo, hoy en día diversos investigadores han estudiado esta problemática, desarrollando métodos que se ajustan a este tipo de hormigones (Aïtcin, 1998).

A grandes rasgos los métodos de dosificación de hormigón de alto desempeño pueden ser clasificados en dos tipos (Mehta y Aïtcin, 1990), los que se basan en la optimización de la compacidad del esqueleto granular (algunos ya desarrollados en el Capítulo 3), como son el de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007) y el de De Larrard (De Larrard y Sedran, 1994). O los métodos que siguen el criterio del volumen absoluto como el de Aïtcin (Neville y Aïtcin, 1998). Algunos autores (Tutikian, Isaia y Helene, 2011) han comparado distintos métodos de dosificación buscando encontrar una metodología definitiva que proporcione la combinación más adecuada. Sin embargo, finalmente han concluido que no existe una metodología universal, sino que el método más económico, cuya mezcla proporcione las propiedades requeridas, siempre dependerá de los materiales locales. No obstante, otros autores (Tutikian, 2007) recomiendan combinar varios métodos de dosificación optimizando sus consideraciones como por ejemplo

el Método de O'Reilly con el de "IBRACON". A continuación, se presenta una breve reseña de los métodos considerados en el presente trabajo: Mehta-Aitcin (Mehta y Aitcin, 1990), Aitcin (Aitcin, 1998).

4.1.1.1. Método Mehta Aitcin 1990

El método propone dosificar un hormigón de alto desempeño a partir de recomendaciones, que posteriormente, en función de sus propiedades, es ajustada en laboratorio (Mehta y Aitcin, 1990).

Dosificación en volumen y en peso de los componentes:

El método plantea un rango de resistencia entre 60 y 120 MPa, divididos arbitrariamente en 5 grupos (65, 75, 90, 105 y 120 MPa). Para cada rango de resistencia a partir de la Tabla 4.1 se determina la cantidad de agua de la mezcla (estos valores fueron obtenidos experimentalmente para hormigones con alta fluidez, y grandes explayamientos, utilizándose TMA de 12 a 19 mm y aditivos superplastificantes (Mehta y Aitcin, 1990).

Tabla 4.1. Grados de Resistencia propuesto por el método de Mehta Aitcin - 1990 (Mehta y Aitcin, 1990)

Grado de Resistencia	Resistencia (MPa)	Máximo contenido de agua (kg/m^3)
A	65	160
B	75	150
C	90	140
D	105	130
E	120	120

Si el agregado seleccionado es equidimensional, para ser utilizado en hormigones de alto desempeño, resulta viable utilizar una relación pasta – agregado de 35% - 65% en volumen. Es decir que, si consideramos un volumen de 1 metro cúbico de hormigón, 65% corresponderían al volumen de los agregados y 35% al volumen de la pasta de cemento (Mehta y Aitcin, 1990).

Del volumen de pasta de cemento, se deberá considerar el volumen correspondiente al sistema aglomerante, el volumen de agua incorporada y el porcentaje de aire incluido naturalmente. Considerando un contenido de aire del 2% del volumen, el 33% restante corresponde al sistema aglomerante y al contenido de agua; cuyo valor es conocido mediante la Tabla 4.1. Entonces es posible determinar el volumen del sistema aglomerante, identificado como "A %" (Mehta y Aitcin, 1990).

Mehta Aitcin propone tres posibles sistemas aglomerantes:

- Sistema Aglomerante 1: Compuesto únicamente por cemento pòrtland. En este caso el porcentaje "A %" del sistema aglomerante corresponde al cemento, entonces $A \% = 100\% CP$ (Mehta y Aitcin, 1990).
- Sistema Aglomerante 2: Compuesto por cemento pòrtland y una puzolana (ceniza volante o escoria granulada de alto horno) en una relación de 75:25 en volumen. Es decir, del porcentaje

“A %” correspondiente al volumen del sistema aglomerante, un 75% será cemento y un 25% será la puzolana (Mehta y Aïtcin, 1990).

- Sistema Aglomerante 3: Compuesto por Cemento portland y dos puzolanas (ceniza volante o escoria granulada de alto horno) en una relación de 75:15:10 en volumen. Es decir, del porcentaje “A %” correspondiente al volumen del sistema aglomerante, un 75% será cemento, un 15% será ceniza volante y el 10% restante será de escoria granulada de alto horno (Mehta y Aïtcin, 1990).

Del contenido de agregados (65% del volumen total), el método recomienda distintas relaciones entre agregados finos (Ag.F) y agregados gruesos (Ag.G), cuya definición depende del grado de resistencia seleccionado, Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Correlación entre grados de Resistencia y Relaciones entre agregados (Mehta y Aïtcin, 1990)

Grado de Resistencia	Relación Ag.F:Ag.G
A	2,00:3,00
B	1,95:3,05
C	1,90:3,10
D	1,85:3,15
E	1,80:3,20

Una vez determinada la dosificación inicial en volumen, mediante los pesos específicos es posible determinar la dosificación en peso de todos los componentes. Si no se conoce la dosis de aditivo óptima a utilizar, el autor recomienda comenzar con una dosis de superplastificante, en base de solución anhidra, de 1% en peso del sistema aglomerante (El 1% de la masa de cemento corresponde únicamente a los sólidos contenidos en el superplastificante) (Mehta y Aïtcin, 1990).

Ajuste del agua de amasado:

Cuando se tenga definida la dosificación en peso de todos los componentes seleccionados, se deberá realizar el ajuste de la cantidad de agua, que principalmente consistirá en evaluar la humedad de los agregados y el agua aportada por el aditivo superplastificante.

El método de dosificación considera los agregados en estado saturado a superficie seca (SSS). Para determinar el ajuste del agua debido a los agregados se debe considerar la humedad y la absorción potencial de los mismos, si la humedad es mayor a su absorción potencial, los agregados estarán aportando agua en el hormigón, lo que implica una reducción de agua de amasado al realizar el ajuste. Si los agregados presentan menor humedad que su absorción potencial, estarán absorbiendo parte del agua de amasado, lo que generará un aumento al realizar el ajuste.

Para determinar el agua aportada por el aditivo superplastificante se deberán conocer el porcentaje de sólidos en base anhidra y la densidad del aditivo para aplicar las Ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$VT_s = \frac{(C \times d/100)}{\left(\frac{s}{100}\right) \times \rho_{ad}} \quad 4.1$$

$$A_{ad} = VT_s \times \rho_{ad} \times \left(1 - \left(\frac{s}{100}\right)\right) \quad 4.2$$

Donde

VT_s es el volumen total de la solución, expresado en L/m^3

C es el contenido de aglomerante, expresado en kg/m^3

d es la dosificación de aditivo en base anhidra del cemento, expresado en %

s es el porcentaje de sólidos en el aditivo, expresado en %

ρ_{ad} es la densidad del aditivo, expresada en kg/m^3

A_{ad} es el contenido de agua que aporta el aditivo, expresado en kg/m^3

Se detalla a continuación el ejemplo planteado por el autor:

Supongamos que tenemos $500 \text{ kg}/m^3$ de cemento y una dosis en base anhidra de 1% de un superplastificante con 40 % de sólidos y densidad de $1,2 \text{ kg}/m^3$.

La cantidad en masa de sólidos del aditivo superplastificante será $500 \times 0,01 = 5 \text{ kg}/m^3$.

La cantidad de solución será $5/0,40 = 12,5 \text{ kg}/m^3$, que implica una cantidad de agua de $12,5 \times (1 - 0,40) = 7,5 \text{ kg}/m^3$ (Mehta y Aïtcin, 1990).

Ajuste de la dosificación:

Una vez obtenida la dosificación inicial, sus componentes serán ajustados en base a las propiedades obtenidas en laboratorio, principalmente por la trabajabilidad requerida en el hormigón. Si la mezcla realizada presenta poca fluidez, dificultando su trabajabilidad, se recomienda aumentar la dosis de aditivo superplastificante, lo que puede generar efectos negativos, como la tendencia a la segregación o el retardo del fraguado. Si al aumentar la dosis del superplastificante, se presencia la tendencia a la segregación, se recomienda aumentar la cantidad finos (arenas) en la mezcla, modificando la relación entre agregado fino y agregado grueso o utilizando un agregado fino con menor módulo de finura. En caso de obtenerse un retardo excesivo de fraguado se recomienda utilizar un aditivo con mejor compatibilidad con el cemento o con menor cantidad de agente retardante, e incluso evaluar la posibilidad de implementar en conjunto una pequeña dosis de aditivo acelerador de fraguado.

4.1.1.2. Método Aïtcin 1998

Aïtcin (Aïtcin, 1998; Mehta y Aïtcin, 1990). propone una combinación entre resultados obtenidos empíricamente y cálculos analíticos basados en el método de volumen absoluto. El método parte de cinco suposiciones iniciales: Rel. a/c, contenido de agua, dosis del aditivo

(para el que se debe considerar la cantidad de agua que se adiciona a la mezcla como parte de él), contenido de agregado grueso y contenido de aire.

1 – Determinación de la Rel. agua/aglomerante:

Partiendo de la resistencia a la compresión requerida, se define la Rel. Agua/aglomerante mediante el ábaco presentado en la Figura 4.1; la cual muestra para distintos sistemas aglomerantes, la resistencia a compresión a los 28 días, obtenida mediante probetas cilíndricas de 100 x 200 mm, para distintas relaciones agua/aglomerantes. Presentando el rango inferior, el comportamiento de un sistema aglomerante menos eficiente y el rango mayor el sistema más eficiente (Aïtcin, 1998).

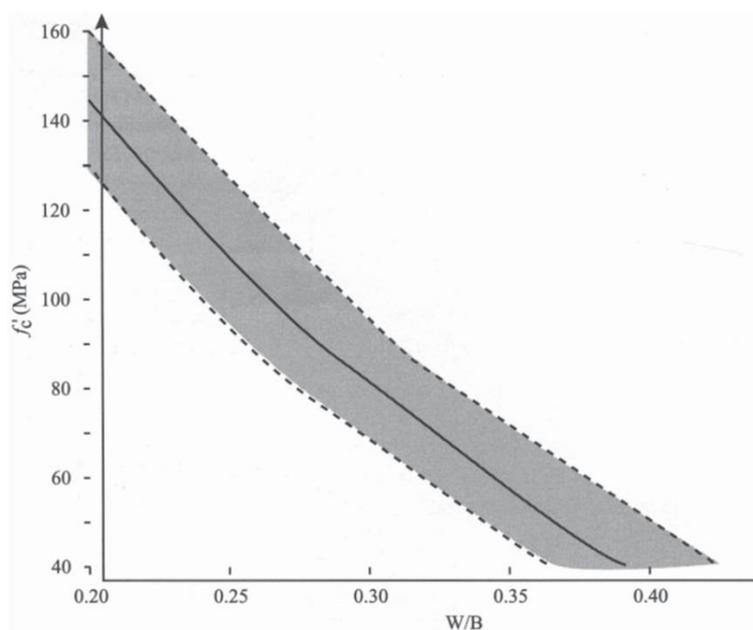


Figura 4.1. Resistencia vs Rel. a/agl. - Método Aïtcin (Aïtcin, 1998)

2 – Determinación del contenido de agua:

Definir la cantidad de agua requerida para obtener un asentamiento dado en un hormigón de alto desempeño resulta complicado, debido a que el mismo asentamiento podría obtenerse para bajas cantidades de agua y altas dosis de aditivo o para altas cantidades de agua y bajas dosis de aditivos, cuya variación puede representar grandes diferencias desde el punto de vista reológico. E incluso la determinación de la cantidad de agua para hormigón de alto desempeño varía dependiendo de la reactividad reológica del cemento o sistema aglomerante, donde la finura, composición e hidratación de las fases y la composición y solubilidad del sulfato influyen significativamente, pudiendo generar que la mezcla se vuelva pegajosa rápidamente cuando son utilizadas pequeñas cantidades de agua y altas dosis de aditivo (Aïtcin, 1998).

Si el punto de saturación del aditivo es conocido, el autor propone utilizar un enfoque simplificado basado en el valor conocido como muestra la Figura 4.2, en caso contrario sugiere comenzar con un contenido de agua de 145 l/m^3 . Una vez determinado el contenido de agua y la Rel. a/c es posible determinar el contenido de cemento.

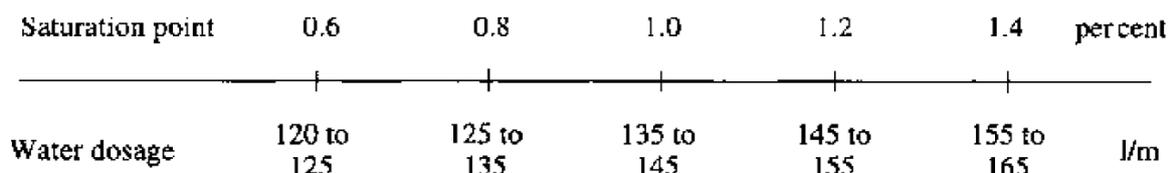


Figura 4.2. Enfoque simplificado para obtener el contenido de agua dependiendo del punto de saturación del aditivo – Método Aitcin (Aitcin, 1998)

3 – Determinación de la dosis de aditivo:

En caso de conocerse el punto de saturación del aditivo, el autor recomienda utilizar ese valor como dosis inicial, en caso contrario sugiere comenzar con una dosis de 1,0% en base de solución anhidra (solución sólida del aditivo) (Aitcin, 1998).

4 – Contenido del agregado grueso:

En caso de conocerse la forma del agregado grueso, el autor recomienda utilizar la cantidad correspondiente según la Figura 4.3, en caso contrario se recomienda comenzar con un contenido de 1000 kg/m³ (Aitcin, 1998).

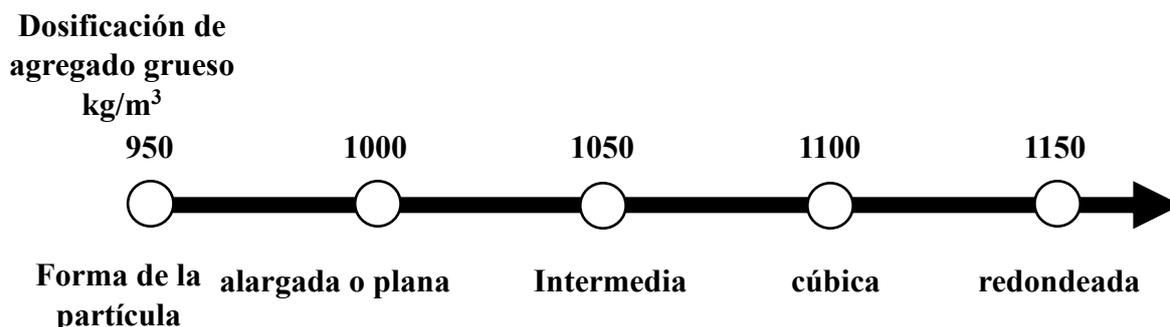


Figura 4.3. Contenido de agregado grueso, en kg/m³, dependiendo de su forma – Método Aitcin (Aitcin, 1998)

5 – Contenido del aire:

El autor sugiere comenzar con un contenido de aire no intencional de 1,5 %, que deberá ajustarse luego del primer pastón de prueba (Aitcin, 1998).

Determinación de la dosificación de mezcla inicial:

Observar que hasta el momento se determinó: El contenido de agua, de cemento (Rel. a/c y contenido de agua), de Agregado grueso, la dosis de aditivo y el contenido de aire. Faltando determinar el contenido de agregado fino. El agregado fino se obtiene mediante el método de volumen absoluto, para ello se determina la dosificación en volumen de los restantes materiales; partiendo de su dosificación en masa y conociendo los pesos específicos de cada uno de ellos. Luego es posible calcular la dosificación en volumen del agregado fino,

definiendo que un metro cúbico de hormigón equivale a la suma de los volúmenes absolutos de sus materiales. Una vez conocido el volumen de agregado fino, se calcula mediante el peso específico su dosificación en masa (Aïtcin, 1998).

Una vez determinada la dosificación inicial se deberá realizar el ajuste de agua, considerando que la dosificación de los agregados se realizó para su condición de Saturado a Superficie Seca (SSS), además deberá considerarse el agua que se agrega como parte de la dosis de aditivo incorporado (Aïtcin, 1998).

4.1.1.3. Comentarios parciales

La determinación de una mezcla de hormigón de alto desempeño se distingue significativamente de las metodologías habitualmente empleadas para el hormigón convencional. Conseguir una mezcla que cumpla con altos requerimientos mecánicos y físicos, es decir, alcanzar una alta resistencia sin perder la capacidad bombeable, exige la implementación de nuevas tecnologías. En este contexto, donde todos los materiales juegan un rol importante, no solo es necesario realizar un estudio más exhaustivo en la selección de sus componentes, sino también encontrar un método de dosificación que, a partir de los materiales disponibles, permita obtener las propiedades establecidas. Aunque se han desarrollado métodos de dosificación para los hormigones de alto desempeño, debido principalmente a su sensibilidad ante cualquier variabilidad, sigue siendo complejo obtener una mezcla que brinde las propiedades requeridas. Si bien la mayoría de los métodos proponen combinaciones analíticas y experimentales, cualquiera de ellos requiere de una gran campaña experimental.

Por este motivo, se propone implementar una metodología de dosificación para Hormigones de Alta Resistencia que reúna tanto las ventajas del método de dosificación planteado por Mehta Aïtcin (Aïtcin, 1998), así como las ventajas de los métodos de optimización del esqueleto granular planteados por Andersen y Andreasen (A&A) modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) y O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007), estos últimos ya presentados y desarrollados en el Capítulo 3. La Tabla 4.3 resume las ventajas y desventajas que se consideraron más relevantes para cada uno de los métodos mencionados.

Tabla 4.3. Ventajas y desventajas de los métodos de dosificación propuestos

Método	Ventaja	Desventaja
O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007)	Determina experimentalmente las proporciones óptimas de los agregados , cuya combinación brinda la mayor densidad y consecuentemente la menor fracción de poros. Optimizar el esqueleto granular permite disminuir el volumen de pasta.	Los resultados dependen de la energía de compactación. No considera las propiedades requeridas en el hormigón. El método es exigente y requiere de más tiempo para aplicarse.
A&A modificado (De Castro y Pandolfelli,	Determina la curva de mayor compactación de los agregados (mayor densidad y menor porosidad) partiendo de las granulometrías de los materiales	Brinda únicamente una dosificación "teórica" obtenida a partir de las granulometrías de los materiales sólidos

2009), (Tutikian y Alegre, 2007)	sólidos, optimizando el tiempo requerido para ello.	constituyentes. No considera las propiedades requeridas en el hormigón.
Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990)	Presenta recomendaciones y pasos para la dosificación inicial de una mezcla, que luego es ajustada experimentalmente procurando mejorar las propiedades obtenidas.	Se desconoce la cantidad de iteraciones y/o ajustes experimentales a realizar hasta obtener las propiedades requeridas (No se conoce la cantidad de pastones necesarios hasta obtener el objetivo).

4.1.2. Resistencia Característica

Al diseñar o proyectar un elemento estructural de hormigón, suele considerarse la resistencia característica, entendida comúnmente como “*el valor estadístico de la resistencia a la compresión que corresponde a la probabilidad de que una cierta proporción de todos los resultados de la población, para una clase especificada de hormigón, exceda dicho valor*” (IRAM, 2020). Generalmente, se adopta un nivel de confianza del 95%, lo que implica aceptar que el 5% de los resultados se sitúen fuera de la distribución esperada (UNIT, 2005; IRAM, 2020; UNE, 2018).

Si bien algunas normas (UNIT, 2005; IRAM, 2020; UNE, 2018) contemplan ensayos de control del hormigón con el fin de verificar que la resistencia característica del hormigón en obra sea igual o superior a la especificada en el proyecto, no ofrecen un método específico para estimar dicha resistencia a partir de resultados obtenidos en laboratorio.

Dado que esta tesis aborda el desarrollo de un producto que aún no ha sido comercializado y, por lo tanto, no dispone de resultados en obra que permitan realizar una estimación estadística directa de la resistencia característica, se plantea evaluar si la resistencia característica estimada a partir de los ensayos de laboratorio es superior a la resistencia característica prevista. En esta sección, se describen los métodos estadísticos propuestos por las normas UNIT 1050:2005, IRAM 1666:2020 y UNE-EN 206:2013+A1:2018 para determinar la resistencia característica a la compresión.

4.1.2.1. UNIT 1050:2005

La norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005) establece que, cuando el número de amasadas colocadas en obra es muy grande y la población de resistencias puede considerarse que sigue una distribución normal (gaussiana), el cuantil del 5 %, y por tanto la resistencia característica real, se determinan mediante la Ecuación 4.3.

$$f_{creal} = f_{cm}(1 - 1,64 \delta) \quad 4.3$$

Donde:

f_{creal} es la resistencia característica real, expresada en MPa.

f_{cm} es la resistencia media de la población, expresada en MPa.

δ es el coeficiente de variación de la población.

Sin embargo, obtener una cantidad de amasadas suficientemente grande como para que la distribución de resultados en obra pueda considerarse normal resulta antieconómico. Por esta razón, se recurre a procedimientos estadísticos que permiten estimar la resistencia característica a partir de un número reducido de determinaciones.

En este contexto, la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005) establece que el control estadístico del hormigón depende del nivel de control aplicado en obra, el cual puede clasificarse en tres categorías: reducido, normal e intenso. En esta sección se describe específicamente el nivel normal.

El control estadístico de nivel normal es aplicable siempre que se haya adoptado un coeficiente de seguridad de 1,5. Para llevar a cabo este control, es necesario determinar la resistencia X_i de N amasadas con $N \geq 2$, donde X_i representa el promedio de al menos dos resultados individuales obtenidos de probetas cilíndricas de 15×30 cm ensayadas a los 28 días.

Los resultados de resistencia de las m amasadas se ordenan de menor a mayor: $X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_m \leq \dots \leq X_N$ y, según las Ecuaciones 4.4 y 4.5, se determina la resistencia característica estimada para este nivel de control.

$$\text{Si } N < 6; f_{est} = K_N \cdot X_1 \quad 4.4$$

$$\text{Si } N \geq 6; f_{est} = \frac{2 \cdot (X_1 + X_2 + \dots + X_{m-1})}{m - 1} - X_m > K_N \cdot X_1 \quad 4.5$$

Donde:

N es la cantidad de muestras

X_1 es la resistencia menor del lote, expresada en MPa.

m es igual a $N/2$ si N es par o m es igual a $(N-1)/2$ si N es impar

K_N es un coeficiente según la Tabla 4.4, se determina en función de N y del tipo de instalación en que se fabrica el hormigón.

Tabla 4.4. Valores de K_N según la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005)

N	Hormigones fabricados en central con laboratorios de reconocida trayectoria	
	Con sello o marca de conformidad con norma	Sin sello o marca de conformidad con norma
2	0,90	0,88
3	0,93	0,91
4	0,95	0,93
5	0,96	0,95
6	0,97	0,96
7	0,98	0,97
8	0,99	0,98

El lote sometido a control es aceptado cuando se verifica que $f_{est} \geq f_{ck}$ siendo f_{ck} la resistencia característica a la compresión esperada.

Es importante señalar que este método de control está diseñado para hormigón colocado en obra, no para ensayos realizados en laboratorio. Por tanto, la cantidad de lotes o amasadas a considerar varía en función del tipo de elementos estructurales a llenar. Además, en el caso de hormigón premezclado, se toma en cuenta el grado de conformidad de la empresa fabricante con la norma.

4.1.2.2. IRAM 1666:2020

La norma IRAM 1666:2020 (IRAM, 2020) establece un control inicial previo a los primeros 15 resultados de ensayo de amasadas y un control posterior a los primeros 15 resultados de ensayo de amasadas. Donde el resultado de ensayo de cada amasada se corresponde al promedio de resistencia de al menos dos probetas cilíndricas ensayadas a la misma edad.

Además, es importante que la diferencia entre las resistencias extremas del grupo de probetas (rango) no supere el 15 % de la resistencia media. Cuando la muestra de ensayo esté constituida por tres o más resultados individuales y no se cumpla esta condición, si las resistencias de las probetas más semejantes difieren, como máximo, un 10 % respecto de su valor promedio, se descarta el valor más discrepante y se adopta el promedio de los resultados más concordantes.

Para el control inicial, es decir, antes de contar con los primeros 15 resultados de ensayo, la resistencia media móvil calculada sobre tres ensayos consecutivos debe cumplir con lo establecido en la Ecuación 4.6.

$$f'_{cm^3} \geq f'_c + r_m \quad 4.6$$

Donde:

f'_{cm^3} la resistencia media móvil de tres ensayos consecutivos, en MPa.

f'_c la resistencia a la compresión especificada, en MPa

r_m rango del conjunto de tres resultados considerados, obtenido como la diferencia entre el valor mayor y el valor menor, en MPa.

Para el control posterior a los primeros 15 resultados de ensayo, se calcula la resistencia media del conjunto mediante la Ecuación 4.7.

$$f'_{cm} \geq f'_c + k \cdot s \quad 4.7$$

Donde:

f'_{cm} es la resistencia media del conjunto de resultados a evaluar, en MPa.

f'_c es la resistencia a la compresión especificada, en MPa.

k es el coeficiente de acuerdo con el percentil adoptado, para 5% de casos defectuosos admitidos $k=1,65$, para 10% de casos defectuosos admitivos, $k=1,28$.

$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f'_{ci} - f'_{cm})^2}{n-1}}$ es la desviación estándar, como estimación del desvío estándar de la población (σ), en MPa. Y se calcula con un número mínimo de 30 resultados.

f'_{ci} son los resultados individuales, en MPa.

f'_{cm} es el promedio de resultados, en MPa.

n es la cantidad de resultados.

Cuando la cantidad de resultados es menor a 30, se aplica un factor de ajuste a la desviación estándar (S), de acuerdo con la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Factores de ajustes por números de ensayos, control estadístico resistencia a la compresión IRAM 1666 (IRAM, 2020)

Número de ensayos	Factor de ajuste para una desviación estándar (S)
15	1,16
20	1,08
25	1,03
Igual o mayor a 30	1,00

Para un n° de ensayos comprendidos entre los valores indicados, se utiliza una interpolación lineal

4.1.2.3. UNE-EN 206:2013+A1

La norma UNE-EN 206:2013+A1 (UNE, 2018) establece que los resultados individuales de resistencia a compresión de las muestras deben cumplir con lo dispuesto en la Ecuación 4.8, donde los resultados de las muestras es el obtenido a partir de una probeta individual o de la media de dos o más probetas fabricadas de una misma amasada y ensayadas a la misma edad.

Además, cuando se fabriquen dos o más probetas de una misma amasada, el rango de los valores obtenidos en el ensayo debe ser inferior al 15 % de la resistencia media.

$$f_{ci} \geq (f_{ck} - 4) \text{ MPa} \quad 4.8$$

Donde:

f_{ci} son los resultados individuales de resistencia a la compresión, en MPa.

f_{ck} es la resistencia característica a la compresión esperada, en MPa.

La norma también establece una condición para la producción inicial, donde se debe satisfacer la Ecuación 4.9.

$$f_{cm} \geq (f_{ck} + 4) \text{ MPa} \quad 4.9$$

Donde:

f_{cm} es la resistencia promedio de tres resultados consecutivos, en MPa.

f_{ck} es la resistencia característica a la compresión esperada, en MPa.

Para producción continua, cuando el número de muestras es superior o igual a 15, se debe cumplir la Ecuación 4.10.

$$f_{cm} \geq (f_{ck} + 1,48 \cdot \sigma) \text{ MPa} \quad 4.10$$

4.2. Metodología

En esta sección se describen los materiales y los métodos utilizados para obtener la dosificación objeto de estudio.

4.2.1. Materiales

Para el estudio de dosificaciones se utilizaron los materiales seleccionados y caracterizados en los Capítulos 2 y 3, resumidos en la Tabla 4.6. En cuanto a cementos, adiciones y agregados, se procuró principalmente trabajar con los materiales disponibles y usados habitualmente en la planta hormigonera, evitando realizar grandes cambios en el proceso de producción. Esto

implicó utilizar en la dosificación de partida “**dosificación inicial teórica**” el mismo sistema aglomerante implementado habitualmente por la empresa, compuesto por cemento CPC40 y polvo electrofiltro (PEF2) como adición mineral inactiva, cuya compatibilidad con los aditivos fue verificada mediante estudios de calorimetría en el Capítulo 2. No obstante, no se descarta la posibilidad de evaluar otros tipos de cemento o la implementación de otras adiciones minerales inactivas.

Los aditivos reductores de agua utilizados fueron los seleccionados mediante los estudios de calorimetría presentados en el Capítulo 2. Como agregados se utilizaron dos arenas comercializadas en el país, arena fina y arena gruesa y una piedra partida granítica de tamaño 5-14, cuyas caracterizaciones se presentan en el Capítulo 3.

Tabla 4.6. Materiales utilizados para las dosificaciones analizadas

Cemento	CPC40	Capítulo 2 (Aptitud y compatibilidad de cementos, aditivos y adiciones)
Adición Mineral	PEF2	
Aditivo reductor de agua (Plastificante)	P (A1)	
Aditivo reductor de agua (Superplastificante)	SP (A4)	
Aditivo Inhibidor de Hidratación	IH (A7)	
Agregado Fino	Arena Fina MF= $1,65 \pm 0,30$ Arena Gruesa MF= $3,7 \pm 0,3$	Capítulo 3 (Agregados)
Agregado Grueso	PP 5-14	

Resulta importante destacar que, buscando obtener una mezcla viable a producir a escala industrial, todas las mezclas de hormigón realizadas se encuentran sujetas a la variabilidad habitual de los materiales en producción.

4.2.2. Métodos

Para obtener una mezcla que cumpla con el objetivo planteado, primero se determinó una dosificación en laboratorio que brinde las propiedades requeridas (dosificación objetivo en laboratorio) y luego mediante estudios de pérdida de asentamiento se realizaron los ajustes para que sea viable implementar la dosificación a escala industrial.

La determinación de la **dosificación objetivo en laboratorio** consistió en:

- Hallar una **dosificación inicial teórica**, basada principalmente en la combinación de los métodos de Mehta Aïtcin (Aïtcin, 1998), de Andersen & Andreasen modificado (Tutikian y Alegre, 2007) y de O’Reilly (O’Reilly Díaz, 2007), y luego se ajustó experimentalmente la dosis de aditivo y el contenido de agua;
- En función de los resultados obtenidos se realizan **ajustes de algunos parámetros de dosificación** (tipo de cemento, adiciones, relación a/c, volumen de agua, volumen de agregados gruesos) para alcanzar el desempeño requerido.
- Una vez determinada la **dosificación objetivo en laboratorio** se procedió a su caracterización completa.

La determinación de la **dosificación para escala industrial** consistió en:

- **El estudio de la viabilidad de implementar la dosificación objetivo en laboratorio a escala industrial.** Para ello, se analizó la ventana de trabajo del hormigón mediante ensayos de asentamiento y explayamiento, evaluando la incorporación de aditivos químicos alternativos que permitieran obtener una ventana de trabajo adecuada para asegurar el transporte y la colocación del hormigón.

La Figura 4.4 resume en un esquema la metodología aplicada.

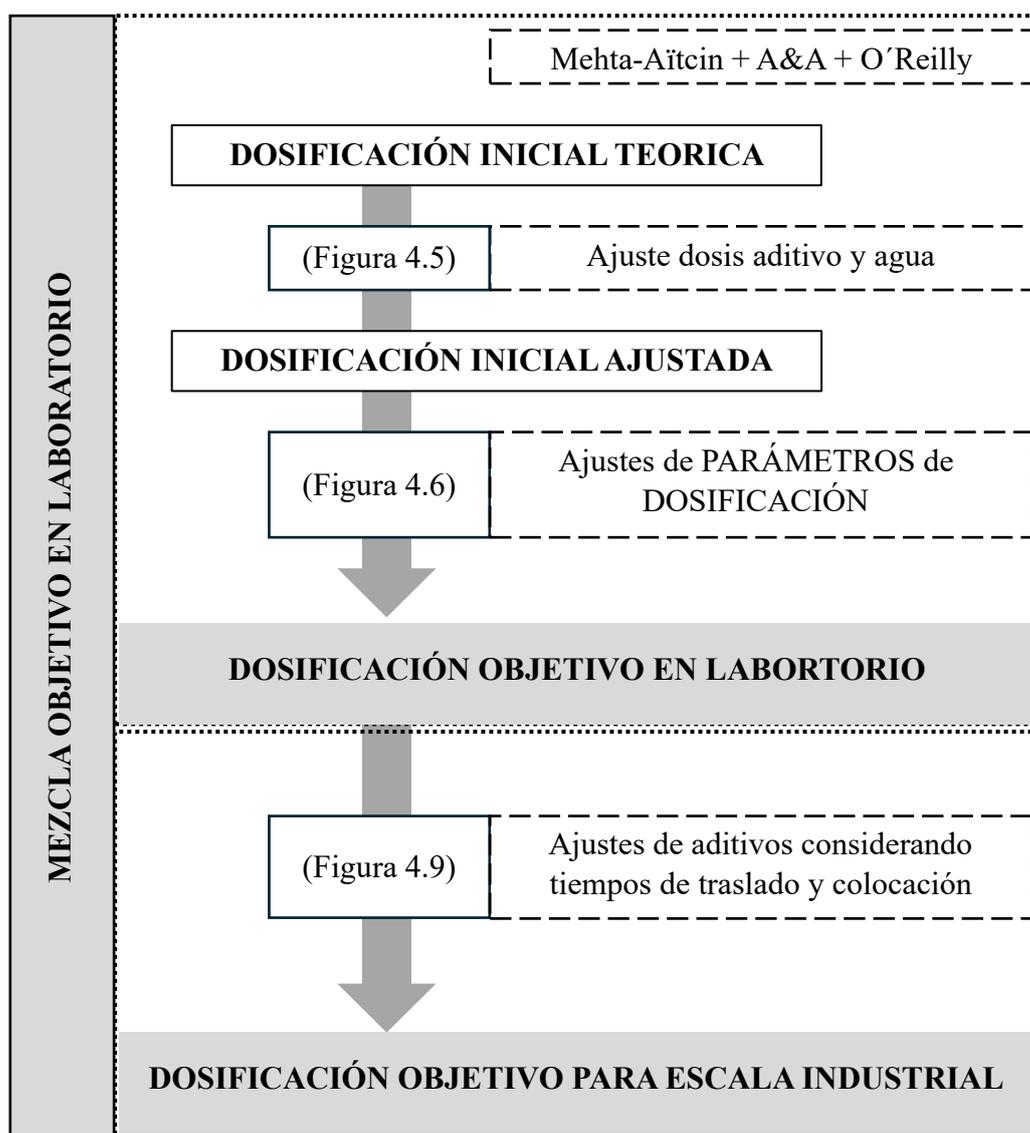


Figura 4.4. Esquema resumen del método de dosificación seguido.

4.2.2.1. Mezcla objetivo en laboratorio

A. Dosificación

Para la determinación de la **dosificación objetivo en laboratorio**, se optó por una metodología de trabajo optimizada partiendo de la combinación de los tres métodos, según se detalla a continuación.

1. Se consideran las recomendaciones de Mehta Aitcın (Aıtcin, 1998) para obtener la **dosificación inicial teórica**:
 - 1 m³ de hormigón de alto desempeño está formado por un 35% de pasta de cemento y un 65% de agregados.
 - Dentro de la pasta de cemento se considera que del 35%, un 2% corresponde al aire, quedando el 33% restante para el agua, el cemento y las adiciones.
El porcentaje de agua se determina en función de los litros que se quieren colocar para lograr la relación a/c buscada, comenzando inicialmente con 145 litros, rel a/c (0,28).
2. Para realizar el **ajuste del esqueleto granular de los agregados y obtener la curva de mayor compacidad de todos los materiales sólidos constituyentes** (agregados, adiciones minerales y cemento), se plantea realizar una combinación entre el método semi-empírico de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007) y el método de Andreasen & Andersen modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007):
 - Tomando como punto de partida, el porcentaje de agregados recomendados por Mehta Aitcın (65%), se determinó el esqueleto granular en base a los resultados del método de O'Reilly (O'Reilly Díaz, 2007) logrando una combinación de agregados con la menor fracción de poros en la mezcla y consecuentemente la mayor densidad.
 - Luego, a partir de las proporciones obtenidas, se buscó aproximar la curva resultante a la curva óptima de Andreasen & Andersen modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) mediante la iteración del coeficiente de distribución (0,25), hasta obtener el menor valor posible del Índice de Desvío de Empaquetamiento (Christ, 2019).
 - Pero, además, el método de A&A modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) se aplicó, no solamente considerando los agregados, sino que se aumentó el rango de tamaños de partículas incluyéndose las adiciones minerales y el cemento utilizado. Ello permitió un ajuste de **la curva de mayor compacidad para el conjunto de los materiales sólidos constituyentes** (agregados, adiciones minerales y cemento), brindando la menor fracción de poros entre partículas y consecuentemente la densidad máxima de la mezcla. Para ello se consideró el porcentaje de aglomerantes brindado por Mehta Aıtcin (35% pasta - 2% aire - % agua = % aglomerantes, que inicialmente se consideró: 33% - 14% = 19%), y mediante el método de A&A se establece la proporción de los aglomerantes que determinan la curva de mayor compacidad para el conjunto de los materiales sólidos constituyentes;
3. A partir de esta **dosificación inicial teórica**, se ajustó experimentalmente la dosis de aditivo y el volumen de agua hasta alcanzar las propiedades frescas esperadas en el hormigón, obteniéndose la **dosificación inicial ajustada**. Si bien en el Capítulo 2 se emplearon distintas dosis de aditivos, su selección tuvo como principal objetivo evaluar la compatibilidad entre los componentes de la pasta. Por tanto, no se pretendió adoptar directamente en la elaboración del hormigón las dosis utilizadas en esa etapa, sino que se procuró determinar dichas dosis de forma experimental.

La Figura 4.5 presenta un esquema de la metodología mencionada para la determinación de la mezcla inicial teórica y la inicial ajustada.

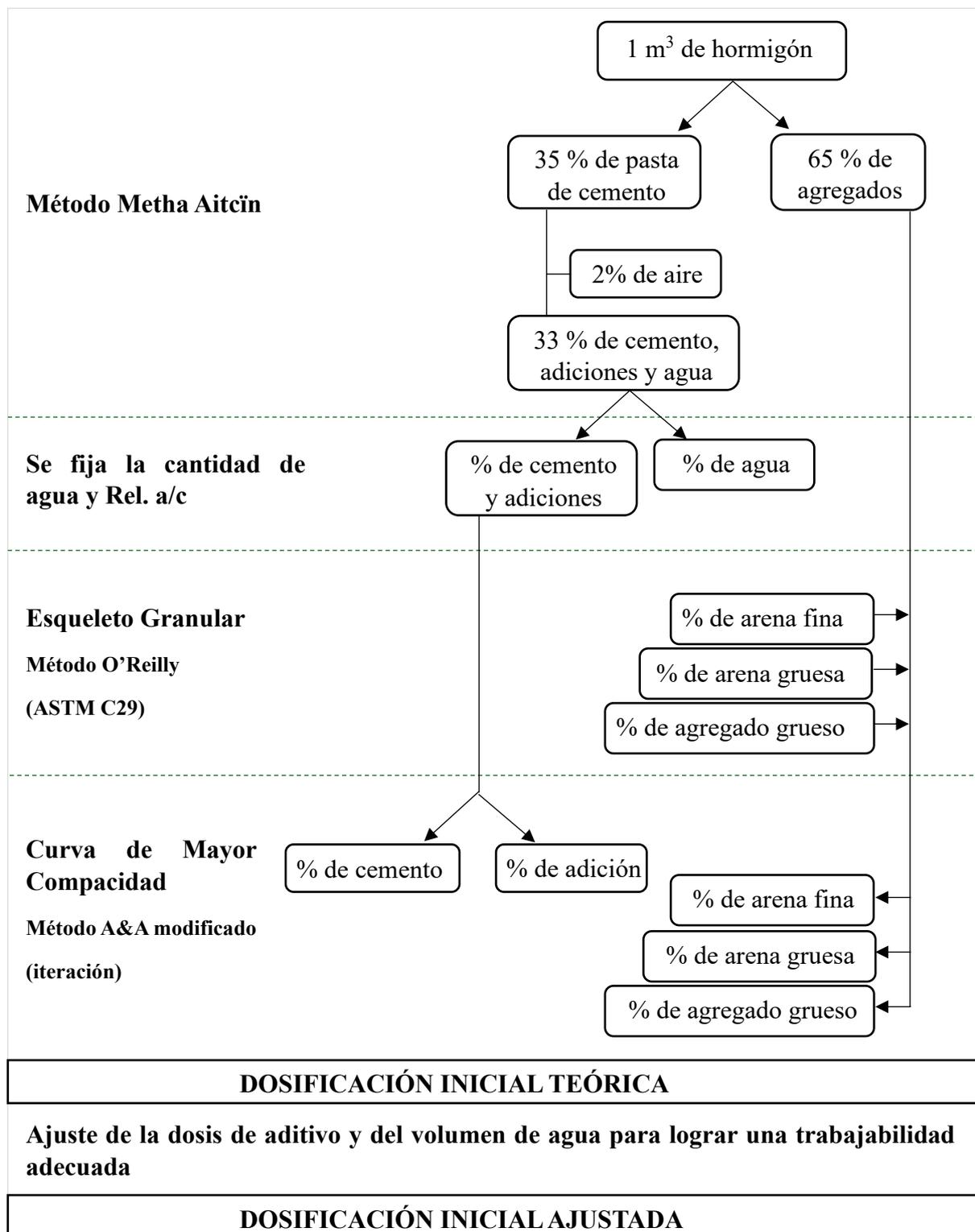


Figura 4.5. Esquema de método de dosificación: dosificación inicial teórica y dosificación inicial ajustada

4. Para alcanzar el desempeño requerido se realizaron algunos **ajustes de los parámetros de dosificación**:

A. Para mejorar la trabajabilidad, particularmente la viscosidad de la mezcla, se realizaron los siguientes ajustes:

- I. *Efecto del PEF en la viscosidad de la mezcla*, aunque se recomienda la implementación de Filler o PEF para mezclas de alto desempeño, como los hormigones autocompactantes, la incorporación de estas adiciones busca aumentar la viscosidad del hormigón. Sin embargo, una alta plasticidad podría disminuir la trabajabilidad y perjudicar la bombeabilidad.
- II. *Aumento del volumen de agregado grueso dejando constante el contenido total de agregados*. En una mezcla de hormigón, las partículas retienen parte del agua de amasado en su superficie. Al disminuir el tamaño de las partículas, aumenta su superficie específica y, por ende, el agua adsorbida. Al mantener constante la cantidad de pasta y aumentar el volumen de agregado grueso (sustituyendo arena por piedra), se incrementa el módulo de finura de la mezcla y la cantidad de agua libre, mejorando la trabajabilidad del hormigón. Sin embargo, es importante considerar que este aumento en la trabajabilidad podría alterar la estabilidad del hormigón, implicando una mezcla segregable, exudable y de menor resistencia.
- III. *Aumento del contenido de agua dejando fija la relación a/c*. Incrementar el volumen de agua sin modificar la relación a/c implica aumentar la cantidad de pasta en el hormigón, disminuyendo el contenido de agregado.

B. Como mejora de la resistencia, se realizaron las siguientes evaluaciones:

- I. *Disminuir la relación a/c*.
- II. *Utilizar cementos con mayores capacidades mecánicas*, en particular, evaluar el comportamiento con los cementos analizados en el Capítulo 2 (CPC40, CPC50 y CPN50 (ARI)). Si bien se reconoce que el cemento CPN50 (ARI) no fue evaluado ni caracterizado en el Capítulo 2, su inclusión en el análisis tuvo un propósito comparativo, orientado a conocer las prestaciones obtenidas con la dosificación adoptada. Sin embargo, no se lo considera una opción adecuada para su implementación.

Para cada uno de los parámetros ajustados se iteraron las proporciones de agregado fino (arena fina y arena gruesa), mediante el método de A&A modificado, buscando obtener la curva de mayor compacidad.

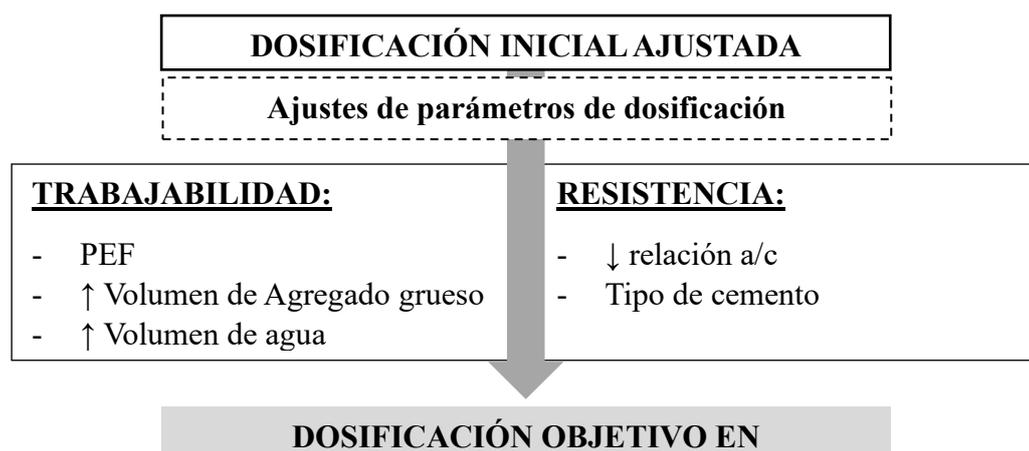


Figura 4.6. Esquema de método de dosificación: ajustes de parámetros de dosificación para alcanzar la dosificación objetivo en laboratorio

5. Una vez determinada la **dosificación objetivo en laboratorio** se procedió a su **caracterización completa**.

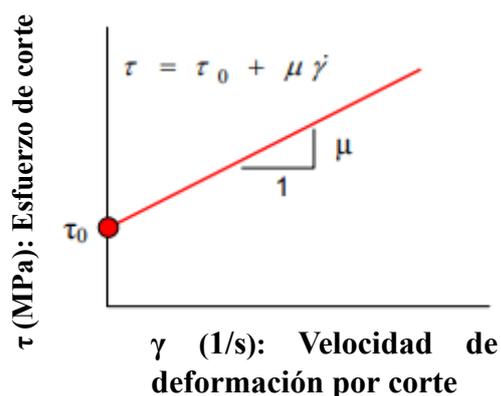
B. Caracterización completa de la mezcla objetivo en laboratorio

La caracterización del hormigón se realizó con el objetivo de conocer, controlar y clasificar sus propiedades. El estudio del comportamiento del hormigón de alto desempeño no difiere significativamente del hormigón convencional (Aitcin, 1998), (AATH, 2004), (Aitcin, 1998).

La evaluación de las propiedades básicas en estado fresco, como la fluidez, la densidad y el contenido de aire, se realiza mediante métodos habituales y de fácil implementación. Tradicionalmente la trabajabilidad del hormigón se evalúa indirectamente midiendo la consistencia con el ensayo de cono de Abrams. No obstante, este método no es aplicable a hormigones muy secos o muy fluidos (rango de resultados admitidos por la norma UNIT-ISO 1920-2:2016: 1-21 cm (UNIT, 2016)).

Para los hormigones de alto desempeño, donde la viscosidad suele aumentar, es importante conocer no solo su fluidez sino también su reología, ya que esto afecta considerablemente la trabajabilidad, la bombeabilidad y la capacidad de colocación del hormigón. Es crucial analizar ampliamente el comportamiento reológico del hormigón, determinando su trabajabilidad no solo por su fluidez, sino también por su viscosidad plástica.

La reología del hormigón puede representarse mediante el modelo de Bingham, como muestra la Figura 4.7. Donde en estado estacionario, el hormigón se comporta como un sólido hasta alcanzar una cierta tensión tangencial o crítica (τ_0) que representa la cohesión del hormigón. Al aplicar esta tensión, el hormigón se comporta como un fluido. La tensión aplicada en el hormigón (τ) está vinculada a la velocidad de deformación, mediante la tensión crítica obtenida (τ_0) y la viscosidad plástica (μ).



τ : Esfuerzo de Corte

τ_0 : Tensión crítica, límite de fluencia (corte con el eje de las ordenadas)

μ : Viscosidad plástica (pendiente de la recta)

γ : Velocidad de deformación por corte

Figura 4.7. Esquema modelo de Bingham (ICAR RHEOMETER, s.f.)

Así, el comportamiento reológico del hormigón se determina mediante dos variables: la tensión crítica (τ_0) y la viscosidad plástica (μ). A medida que disminuye la tensión crítica (τ_0), aumenta la fluidez del hormigón. La viscosidad plástica (μ) está directamente relacionada con la resistencia a la segregación. Por lo tanto, es necesario tener una baja tensión crítica para lograr una gran fluidez, pero una viscosidad plástica (μ) moderada para evitar la segregación.

Existen varios equipos que permiten medir la reología del hormigón. El equipo utilizado en esta experiencia (ICAR RHEOMETER, Figura 4.8), se basa en colocar una muestra de hormigón en un recipiente cilíndrico y rotar una paleta a velocidad variable. Durante la rotación se mide el torque (N.m) generado por la resistencia del hormigón y la velocidad de rotación (rpm), a partir de los datos geométricos del equipo se determina la tensión de corte (Pa) y la velocidad de corte (1/s). La relación entre estos parámetros es aproximada por una recta, cuya pendiente determina la viscosidad plástica (μ) y el valor donde intercepta el eje de ordenadas representa la tensión crítica (τ_0).

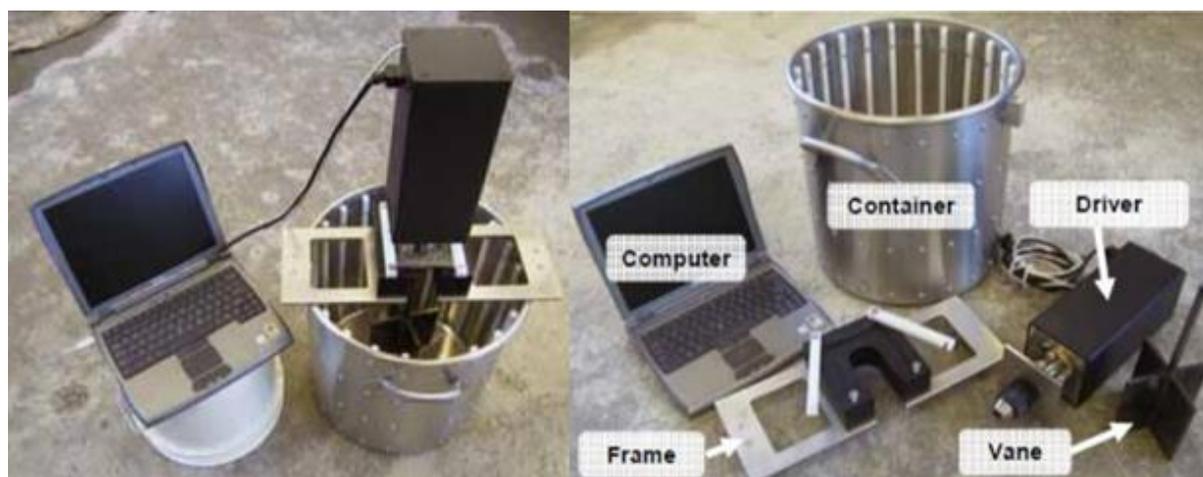


Figura 4.8. Equipo ICAR RHEOMETER (ICAR RHEOMETER, s.f.)

Existen otros métodos para estudiar la fluidez y viscosidad del hormigón, como los ensayos “ad hoc” de caracterización del hormigón autocompactante (Cono de flujo, Caja en L, Anillo J, Embudo en V), que proporcionan un valor indirecto de la viscosidad de la mezcla. Aunque la finalidad de esta experiencia no es obtener un hormigón autocompactante, se espera que,

debido a las tecnologías aplicadas, se obtengan mezclas con fluidez y viscosidad plástica similares, resultando interesante utilizarlas como medida indirecta de la viscosidad del hormigón.

En estado fresco se evaluó la trabajabilidad, la reología y la capacidad autocompactante mediante los siguientes ensayos:

- Densidad, contenido de aire y consistencia a través del ensayo de asentamiento (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016))
- Cono invertido, anillo J, Caja en L, embudo en V y segregación (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)).
- Para evaluar la reología del hormigón se utilizó el reómetro ICAR Rheometer.

El moldeado y compactación de las probetas se realizó siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-3:2019 (UNIT, 2019). Resulta importante aclarar que, si bien se analizaron las propiedades autocompactantes del hormigón, no se espera que el mismo se comporte como tal, a raíz de esto, tanto las probetas como el ensayo de densidad y contenido de aire se realizaron tomando las consideraciones y procedimientos establecidos por las normativas para el hormigón convencional.

En estado endurecido se estudiaron la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la absorción por sumersión. La resistencia a la compresión se determinó como promedio de 3 probetas cilíndricas de 10x20 cm ensayadas a los 1, 3, 7, 28 y 56 días (UNIT-ISO 1920-4:2020 (UNIT, 2020)). El módulo elástico se obtuvo a los 28 días de edad en probetas cilíndricas de 15x30 cm, como promedio de tres determinaciones (UNIT-ISO 1920-10:2010 (UNIT, 2010)). La absorción se determinó mediante el procedimiento mencionado en el manual DURAR (CYTED, 2002), como promedio de 3 probetas cilíndricas de 7,5 x 15 cm.

4.2.2.2. Mezcla a Escala Industrial

En este apartado se analizó la pérdida de trabajabilidad en el tiempo de la dosificación objetivo en laboratorio, buscando alternativas que aseguren su viabilidad para la producción a escala industrial. Como ya se mencionó, el alto contenido de material cementante y los aditivos utilizados hacen que los hormigones de alto desempeño sean mezclas muy cohesivas que, al finalizar el efecto del aditivo SP, pierden trabajabilidad rápidamente.

Considerando que los tiempos de traslado del hormigón generalmente rondan entre 40 y 60 minutos y que para su colocación la mezcla debe permitir su bombeabilidad durante al menos una hora, fue necesario evaluar la pérdida de trabajabilidad del hormigón en el tiempo. Para ello, principalmente se realizaron mediciones de fluidez mediante el cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)) y en algunos casos la viscosidad mediante el reómetro ICAR Rheometer. Se tomó como tiempo cero (T0) el momento en el cual entran en contacto el cemento con el aditivo. La primera medida se efectuó a los 15 minutos (tiempo que tarda en realizarse el mezclado). A partir del tiempo cero, las siguientes mediciones se realizaron cada 30 minutos hasta completar al menos los 120 minutos desde el tiempo cero.

Dado que algunos autores (Aïtcin, 1998) recomiendan utilizar un aditivo plastificante inicial que permita obtener un asentamiento adecuado para mezclar y transportar el hormigón, y posteriormente agregar en obra la dosis del superplastificante, se evaluó la incorporación del

aditivo P (A1) (presentado en el Capítulo 2) como aditivo de sacrificio y se mantuvo el aditivo SP (A4) (presentado en el Capítulo 2) como el aditivo superplastificante que se coloca en obra.

Además, se utilizó un aditivo inhibidor de hidratación IH (A7) (presentado en el Capítulo 2), ya que algunos autores (Aïtcin, 1998) recomiendan utilizar una pequeña dosis de algún aditivo que retarde el fraguado, para mantener el asentamiento durante 60-90 minutos necesarios para la colocación del hormigón.

Se realizaron cuatro mezclas comparativas variando la combinación y la secuencia de colocación de los aditivos (P, IH y SP). Para cada una de ellas se analizó la pérdida de trabajabilidad. La Figura 4.9 muestra un esquema de ello:

- M1: Una mezcla sólo con aditivo superplastificante incorporado durante el amasado del hormigón (tiempo cero), midiendo cada 30 minutos la viscosidad mediante el reómetro y el explayamiento con el ensayo de cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)).
- M2: Una mezcla con la incorporación del aditivo de sacrificio junto con el agua de amasado y a los 60 minutos se agregó el superplastificante. La pérdida de trabajabilidad durante la primera hora se midió mediante el cono convencional (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)), y luego de agregar el superplastificante se evaluó la pérdida del explayamiento en el tiempo mediante el cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)).
- M3: Una mezcla con la incorporación del aditivo de sacrificio junto con el agua de amasado, a los 10 minutos se agregó el inhibidor de hidratación y a los 60 minutos el superplastificante. La pérdida de trabajabilidad durante la primera hora se midió mediante el cono convencional (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)), y luego de agregar el superplastificante se evaluó la pérdida del explayamiento en el tiempo mediante el cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)).

Sin embargo, resulta importante destacar que la metodología mencionada conlleva cambios en el control de producción de la empresa, implicando principalmente la disposición de personal en obra para la incorporación y control del aditivo superplastificante. A raíz de esto se propone elaborar la mezcla M4 para analizar y comparar los resultados si se incorporan los tres aditivos al inicio de la mezcla, simulando su incorporación en planta y no en obra.

- M4: Una mezcla con la incorporación del aditivo de sacrificio junto con el agua de amasado, a los 10 minutos se agregaron el inhibidor de hidratación y el superplastificante. La pérdida de trabajabilidad se midió cada 15 minutos, luego de agregar el superplastificante, a través del ensayo del cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018))

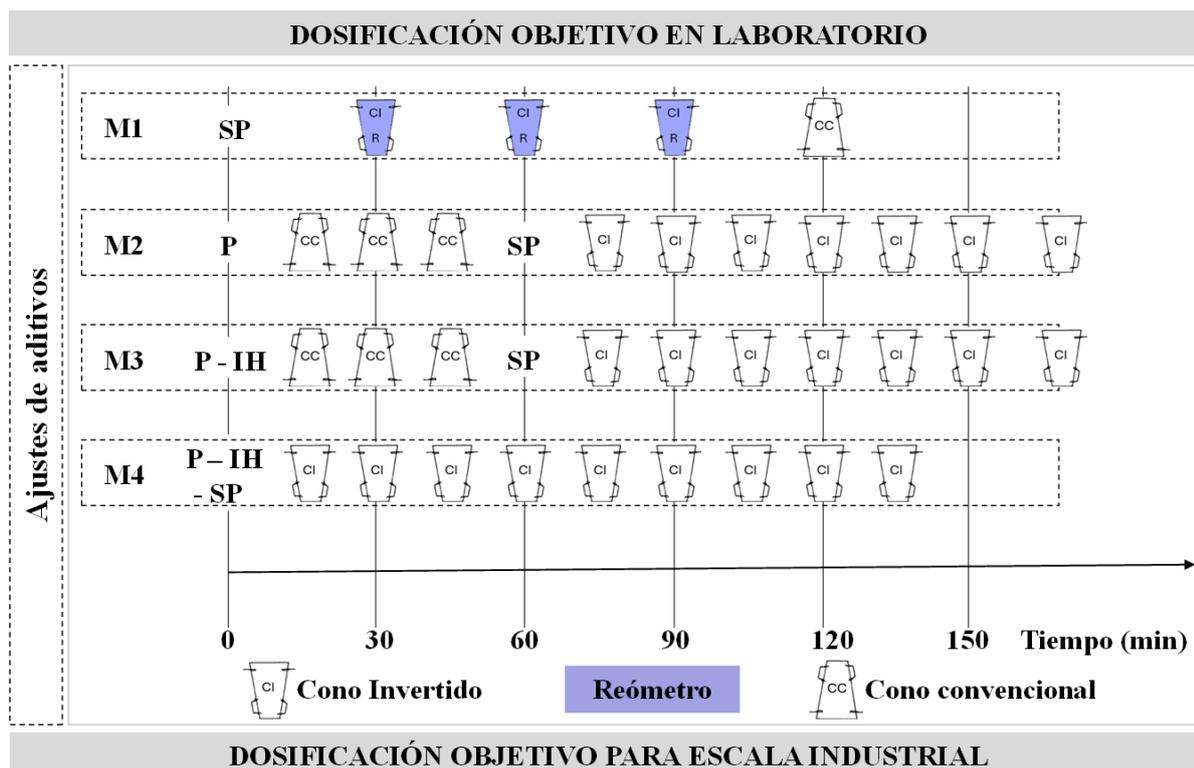


Figura 4.9. Esquema de ajustes de los aditivos en la dosificación objetivo en laboratorio y evaluación de su pérdida de trabajabilidad.

4.3. Presentación y análisis de resultados

4.3.1. Mezcla Objetivo en laboratorio

Para determinar la **mezcla objetivo en laboratorio** se elaboraron un total 12 pastones, donde los primeros contemplaron ajustes en la dosificación de aditivos y agua hasta obtener una mezcla con una fluidez adecuada y los pastones adicionales contemplaron los ajustes experimentales de la dosificación buscando las propiedades requeridas. Se presentan en esta sección los resultados más relevantes.

A. Mezcla inicial

La determinación de la mezcla inicial se realizó siguiendo la metodología planteada en el esquema de la Figura 4.5, comenzando por las recomendaciones de Mehta Aitcin e iterando la curva de A&A para obtener la mezcla de mayor compacidad. Inicialmente se propuso utilizar una dosis de aditivo en el entorno de 1% y 145 litros de agua, implicando una relación a/c de 0,28. La Tabla 4.7 muestra la dosificación inicial determinada (P01) y la Figura 4.10 presenta la curva de mayor compacidad, para un coeficiente de distribución (0,25), cuyo valor de IDE fue de 0,41.

Tabla 4.7. Dosificación inicial teórica (P01)

Proporción (%)		Componente	Q* (%)	Dosificación (litros/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Dosificación (kg/m ³)	
Pasta	35	48,9	Cemento	17,1	171	3,14	536,9
		2,6	PEF	0,9	9	2,74	24,7
		41,4	Agua	14,5	145	1,00	145,1
		1,4	Aditivo	0,5	5	1,10	5,36
		5,7	Aire	2,0	20	1,00	20,0
Esqueleto Granular	65	25	AF	16,0	163	2,55	427,4
		35	AG	23,0	228	2,61	589,2
		40	PP 5-14	26,0	260	2,60	678,6

*Porcentaje volumétrico correspondiente en 1 m³.

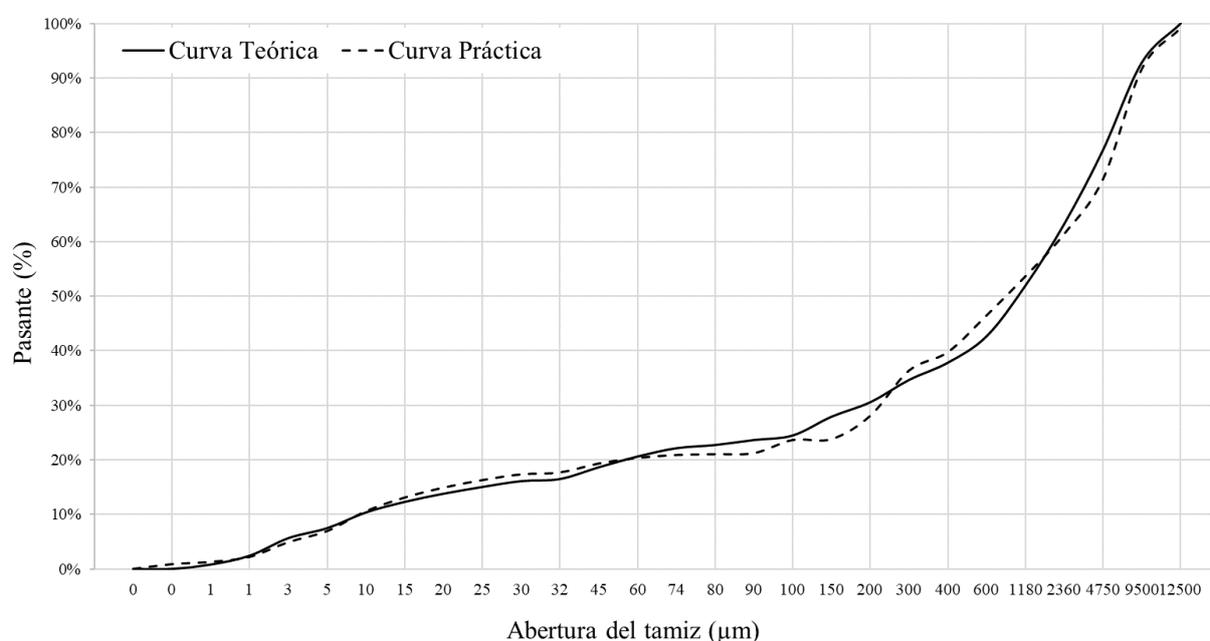


Figura 4.10 Curva de mayor compacidad obtenida para la dosificación inicial teórica

Una vez determinada la **dosificación inicial teórica** se ajusta experimentalmente la cantidad de agua y la dosis de aditivo necesarias hasta obtener las propiedades frescas buscadas en el hormigón, particularmente una adecuada fluidez. Si bien se adoptó una dosis elevada de aditivo superplastificante SP del 1%, fue necesario aumentar la cantidad de agua para obtener un hormigón trabajable, que tuviera una mayor fluidez y una menor viscosidad, lo que implicó una relación a/c de 0,32. La Tabla 4.8 muestra la dosificación inicial ajustada (P02).

Tabla 4.8. Dosificación inicial AJUSTADA (P02)

Proporción (%)		Componente	Q* (%)	Dosificación (litros/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Dosificación (kg/m ³)	
Pasta	36,7	45,8	Cemento	16,8	168,4	3,14	522,1
		2,5	PEF	0,9	8,8	2,74	24,0
		44,6	Agua	16,5	165,3	1,00	165,3
		1,4	Aditivo	0,5	4,7	1,10	5,2
		5,5	Aire	2,0	20	1,00	20
Esqueleto Granular	63,3	25	AF	15,8	158,0	2,55	415,6
		35	AG	22,1	221,2	2,61	573,0
		40	PP 5-14	25,3	252,8	2,60	659,9

*Q: proporción en % del componente en el 1 m³ de hormigón.

La resistencia a los 28 días obtenida mediante la dosificación inicial ajustada no solo brindó resultados por debajo de los 70 MPa sino que además, en base a la experiencia técnica de la empresa se consideró que la viscosidad plástica del hormigón no permitiría su bombeado, siendo necesario modificar la dosificación inicial. Para ello se ajustaron algunos parámetros de dosificación que no sólo afectan la trabajabilidad del hormigón, sino también su resistencia.

B. Ajustes de parámetros de la dosificación inicial

Se procedió a realizar algunos **ajustes de los parámetros de dosificación** para alcanzar el desempeño requerido. Buscando mejorar la trabajabilidad y resistencia del hormigón, se modifican las siguientes variables:

- 1) PEF
- 2) Volumen de agregado grueso
- 3) Volumen de agua
- 4) Relación a/c
- 5) Tipo de cemento

1) Análisis de la influencia del PEF

Se analizó la influencia del PEF en la trabajabilidad de la mezcla de hormigón. Se partió del pastón de la dosificación ajustada, que contiene PEF (P02), y se elaboró el pastón P03 que no contiene PEF. Las Tablas 4.7 y 4.8 presentan las dosificaciones y principales indicadores de la mezcla y la Figura 4.11 los resultados de resistencia y fluidez.

Tabla 4.9. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del PEF

Dosificación	P03 (S/PEF)	P02 (C/PEF)
Cemento (kg/m ³)	547	522
PEF (kg/m ³)	0	24
Arena Fina (kg/m ³)	418	416
Arena Gruesa (kg/m ³)	576	573
PP 5-14 (kg/m ³)	660	660
Agua (kg/m ³)	164	165
Aditivo Superplasticante (g/m ³) (%)	5,47 (1%)	5,22 (1%)
Datos de laboratorio		
Temperatura (°C)	18,9	23,7
Humedad (%)	70	56

Tabla 4.10. Indicadores pastones análisis de la influencia del PEF

Indicadores/Pastones	P03 (S/PEF)	P02 (C/PEF)
Relación a/c	0,30	0,32
Relación a/finos*	0,30	0,30
Pasta (%)**	37	37
Agregados (%)	63	63
Agregado Fino (%)	38	38
Arena Fina (%)	16	16
Arena Gruesa (%)	22	22
Agregado Grueso (%)	25	25
Cemento kg/m ³	547	522
Costo (\$/m ³)	4.889	4.730

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

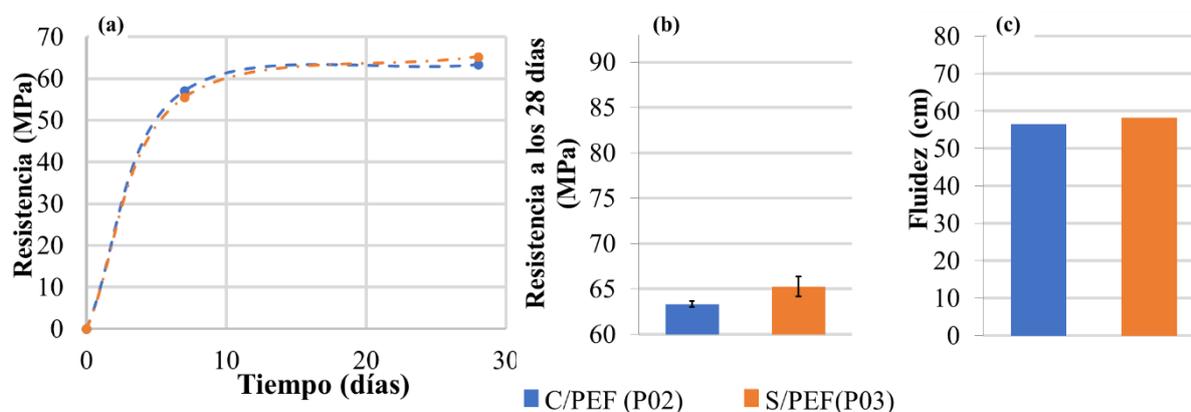


Figura 4.11. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes de PEF

Se observa que en términos de fluidez (Figura 4.11.c) la mezcla sin contenido de PEF mejoró la trabajabilidad, apreciándose, una mejora de la viscosidad en laboratorio. Se decidió en adelante trabajar únicamente con Cemento (P03), sin sustitución de PEF.

2) Análisis de la influencia del volumen de agregado grueso

Se analizó la influencia del volumen del agregado grueso. Los métodos de dosificación propuestos por Aitcin (Aitcin, 1998) y Mehta Aitcin (Mehta y Aitcin, 1990), para el tipo de agregado grueso utilizado, recomiendan un volumen de piedra en el entorno de 1000 kg/m^3 . Se realizaron 2 pastones adicionales (P04 y P05), en los cuales se dejó constante el volumen de cemento y agua, y se disminuyó el volumen de agregado fino, aumentando así el de la piedra. El pastón P03 (de referencia) presenta 660 kg/m^3 , el pastón P04 800 kg/m^3 y el pastón P05 1000 kg/m^3 . Las Tablas 4.9 y 4.10 presentan las dosificaciones y principales indicadores de la mezcla y la Figura 4.12 los resultados de resistencia y fluidez

Tabla 4.11. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del volumen de agregado grueso

Dosificación	P03 (660 kg)	P04 (800 kg)	P05 (1000 kg)
Cemento (kg/m^3)	547	547	547
PEF (kg/m^3)	0	0	0
Arena Fina (kg/m^3)	418	390	398
Arena Gruesa (kg/m^3)	576	466	259
PP 5-14 (kg/m^3)	660	800	1000
Agua (kg/m^3)	164	164	164
Aditivo Superplasticante (g/m^3) (%)	5,47 (1%)	5,47 (1%)	5,47 (1%)
Datos de laboratorio			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	18,9	22,6	17,3
Humedad (%)	70	78	75

Tabla 4.12. Indicadores pastones análisis de la influencia del volumen de agregado grueso

Indicadores/Pastones	P03 (660 kg)	P04 (800 kg)	P05 (1000 kg)
Relación a/c	0,30	0,30	0,30
Relación a/finos*	0,30	0,30	0,30
Pasta (%)**	37	37	37
Agregados (%)	63	63	63
Agregado Fino (%)	38	33	25
Arena Fina (%)	16	15	15
Arena Gruesa (%)	22	18	10
Agregado Grueso (%)	25	31	38
Cemento kg/m^3	547	547	547
Costo ($\$/\text{m}^3$)	4.889	4.985	5.121

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

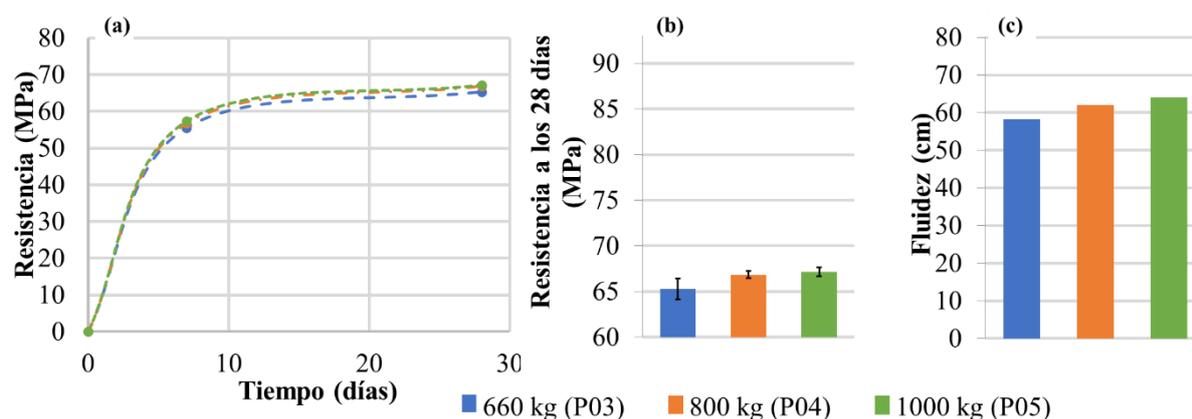


Figura 4.12. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del volumen de agregado grueso

Es posible notar que a medida que aumenta el volumen de piedra se ve tanto una tendencia del aumento de la resistencia y del aumento de la trabajabilidad. Además, fue posible apreciar en laboratorio una disminución de la viscosidad obtenida. Sin embargo, para el pastón con 1000 kg/m³ se observó un aspecto “grueso” del hormigón con tendencia a la segregación, manifestado por una apariencia heterogénea y una marcada visibilidad del agregado grueso. Esto indica una baja cohesión en la mezcla, probablemente debido a una insuficiente cantidad de pasta para recubrir adecuadamente la PP. Finalmente se decide continuar trabajando con la dosificación brindada del pastón P04 (800 kg/m³).

3) Análisis de la influencia del volumen de agua

A partir de la dosificación establecida por el pastón P04 y en busca de la disminución de la viscosidad de la mezcla, se planteó analizar la influencia del volumen de agua para una relación a/c constante. A raíz de esto se realizaron 3 pastones, en todos se dejó el volumen de agregados y la relación a/c (0,30) constantes y se aumentó la cantidad de agua que consecuentemente implicó un aumento del volumen de cemento. El pastón P04 presentó un volumen de agua de 164 litros/m³, el pastón P06 170 litros/m³ y el pastón P07 180 litros/m³. La Tablas 4.11 y 4.12 presentan las dosificaciones y principales indicadores de la mezcla y la Figura 4.13 los resultados de resistencia y fluidez.

Tabla 4.13. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia del volumen de agua

Dosificación	P04 (164 l)	P06 (170 l)	P07 (180 l)
Cemento (kg/m ³)	547	567	600
PEF (kg/m ³)	0	0	0
Arena Fina (kg/m ³)	390	330	275
Arena Gruesa (kg/m ³)	466	492	492
PP 5-14 (kg/m ³)	800	800	800
Agua (kg/m ³)	164	170	180
Aditivo Superplasticante (g/m ³) (%)	5,47 (1%)	5,67 (1%)	6,00 (1%)
Datos de laboratorio			
Temperatura (°C)	22,6	24,3	24,3
Humedad (%)	78	69	70

Tabla 4.14. Indicadores pastones análisis de la influencia del volumen de agua

Indicadores/Pastones	P04 (164 l)	P06 (170 l)	P07 (180 l)
Relación a/c	0,30	0,30	0,30
Relación a/finos*	0,30	0,30	0,30
Pasta (%)**	37	38	40
Agregados (%)	63	62	60
Agregado Fino (%)	33	32	29
Arena Fina (%)	15	13	10
Arena Gruesa (%)	18	19	19
Agregado Grueso (%)	31	31	31
Cemento kg/m ³	547	567	600
Costo (\$/m ³)	4.985	5.101	5.294

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

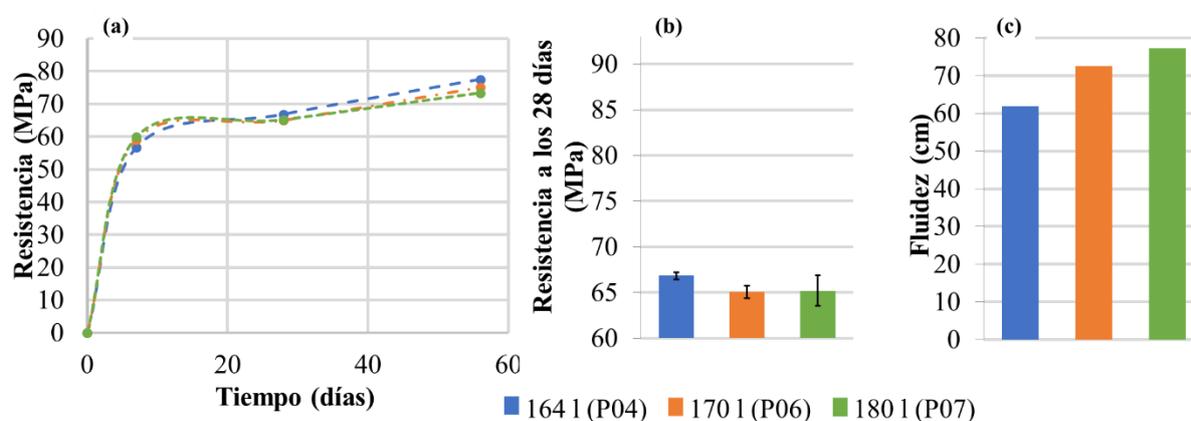


Figura 4.13. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del volumen de agua

Se destaca que a medida que aumenta la cantidad de agua para una relación a/c constante, aumenta también el porcentaje de pasta, implicando una ganancia de resistencia más temprana, es decir se ve un efecto de aumento de resistencia a los primeros días, que luego se estabiliza a los 28 días, brindando resultados muy similares. Sin embargo, a los 56 días se observa un comportamiento opuesto, a medida que aumenta la cantidad de agua la resistencia final a los 56 días disminuye. Analizando la fluidez de los pastones se observa un claro aumento de la trabajabilidad y de la fluidez a medida que aumenta el volumen de agua, sin embargo, también se observó un aumento de la tendencia a la segregación, para una dosis de aditivo A4 de 1%.

Se propone a partir de estos resultados, trabajar con un volumen de agua de 170 litros/m³ (P06), y disminuir la dosis de aditivo a 0,9%.

4) Análisis de la influencia de la rel. a/c

Se analizó la influencia de la rel. a/c en la dosificación adoptada en el estudio anterior (pastón P06 con rel. a/c=0,30). Para ello se realizaron dos variantes a la relación a/c, reduciéndola a valores de 0,26 y 0,24. Las Tablas 4.13 y 4.14 presentan las dosificaciones y principales indicadores de la mezcla y la Figura 4.14 los resultados de resistencia y fluidez.

Tabla 4.15. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis de la influencia de la relación a/c

Dosificación	P06 (0,30)	P08 (0,26)	P09 (0,24)
Cemento (kg/m ³)	567	654	708
PEF (kg/m ³)	0	0	0
Arena Fina (kg/m ³)	330	228	183
Arena Gruesa (kg/m ³)	492	518	518
PP 5-14 (kg/m ³)	800	800	800
Agua (kg/m ³)	170	170	170
Aditivo Superplasticante (g/m ³) (%)	5,67 (1%)	6,54 (1%)	7,08 (1%)
Datos de laboratorio			
Temperatura (°C)	24,3	19,8	19
Humedad (%)	69	72	75

Tabla 4.16. Indicadores pastones análisis de la influencia de la relación a/c

Indicadores/Pastones	P06 (0,30)	P08 (0,26)	P09 (0,24)
Relación a/c	0,30	0,26	0,24
Relación a/finos*	0,30	0,26	0,24
Pasta (%)**	38	41	42
Agregados (%)	62	59	58
Agregado Fino (%)	32	29	27
Arena Fina (%)	13	9	7
Arena Gruesa (%)	19	20	20
Agregado Grueso (%)	31	31	31
Cemento kg/m ³	567	654	708
Costo (\$/m ³)	5.101	5.639	5.803

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

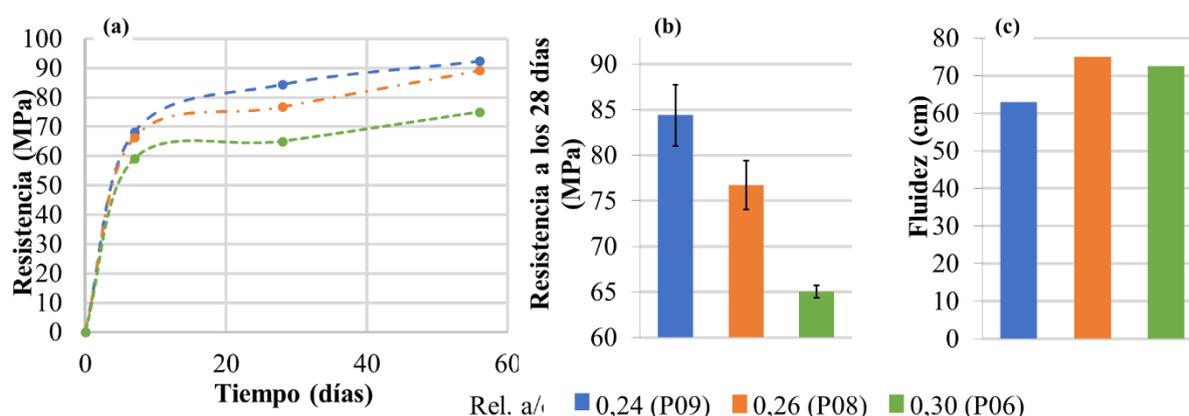


Figura 4.14. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes de relación a/c.

De los resultados presentados en la Figura 4.14 se ve claramente la relación entre el parámetro en estudio y la resistencia a compresión, principalmente cuando se analiza a 28 días, siendo

esperable el comportamiento de los resultados, ya que a medida que aumenta la rel. a/c disminuye la resistencia. En cuanto a la trabajabilidad se nota gran diferencia entre valores de 0,26 y 0,24. Siendo llamativo los resultados obtenidos para la razón de 0,30, esperándose una fluidez mayor en comparación con las obtenidas para las variantes realizadas.

Se define la dosificación con relación a/c 0,26 como dosificación final (P08), cuyos resultados de trabajabilidad y resistencia se consideraron aceptables.

5) Análisis de la influencia del tipo de cemento

Con la finalidad de evaluar posibles mejoras en la resistencia brindada por la dosificación seleccionada se procuró comparar distintos cementos brindados por la empresa. Se utilizaron el CPC40 (cemento con el que se ha trabajado hasta el momento), el cemento CPC50 que se estudió en el Capítulo 2, el cemento CPN50 (ARI) y el ARI con un porcentaje alto de PEF simulando a grandes rasgos la composición del CPC40, motivo por el que se consideró un 83% de CPN50 (ARI) y un 17% de PEF. Si bien se reconoce que el cemento CPN50 (ARI) no fue evaluado ni caracterizado en el Capítulo 2, su inclusión en el análisis tuvo un propósito comparativo, orientado a conocer las prestaciones obtenidas con la dosificación adoptada. Las Tablas 4.15 y 4.16 presentan las dosificaciones y principales indicadores de la mezcla y la Figura 4.15 los resultados de resistencia y fluidez.

Tabla 4.17. Dosificación y datos de laboratorio: pastones análisis del cemento

Dosificación	P08 (CPC40)	P10 (CPC50)	P11 (CPN50 (ARI))	P12 (83 % CPN50 (ARI) + 17 % PEF)
Cemento (kg/m ³)	654	654	654	543
PEF (kg/m ³)	0	0	0	111
Arena Fina (kg/m ³)	231	231	231	225
Arena Gruesa (kg/m ³)	518	518	518	512
PP 5-14 (kg/m ³)	800	800	800	800
Agua (kg/m ³)	170	170	170	170
Aditivo Superplasticante (g/m ³) (%)	5,89 (0,9%)	5,89 (0,9%)	5,89 (0,9%)	5,89 (0,9%)
Datos de laboratorio				
Temperatura (°C)	19,8	18,6	18,1	18,0
Humedad (%)	72	78	78	78

Tabla 4.18. Indicadores pastones análisis de la influencia del cemento

Indicadores/Pastones	P08 (CPC40)	P10 (CPC50)	P11 (CPN50 (ARI))	P12 (83 % CPN50 (ARI) + 17 % PEF)
Relación a/c	0,26	0,26	0,26	0,31
Relación a/finos*	0,26	0,26	0,26	0,26
Pasta (%) **	41	41	41	41
Agregados (%)	59	59	59	59
Agregado Fino (%)	29	29	29	29
Arena Fina (%)	9	9	9	9
Arena Gruesa (%)	20	20	20	20
Agregado Grueso (%)	31	31	31	31
Cemento kg/m ³	654	654	654	543

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

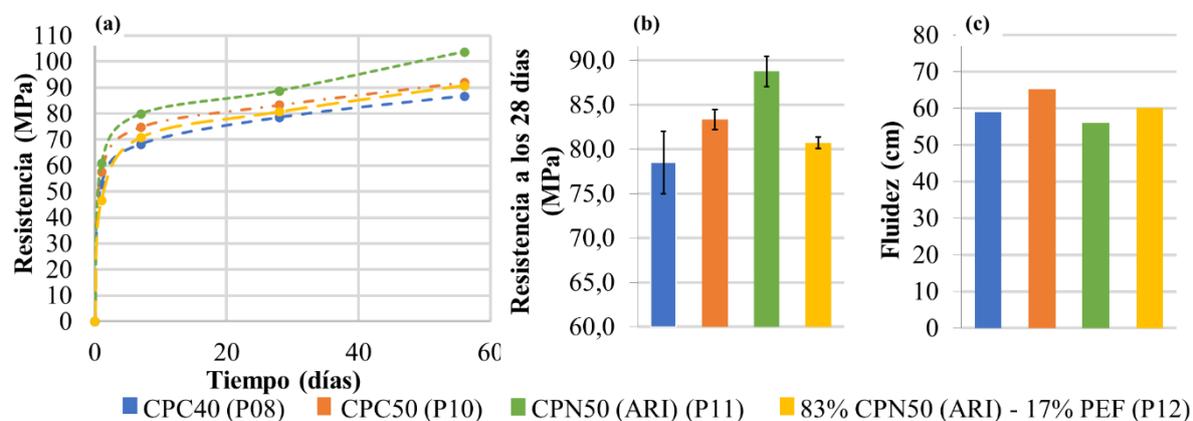


Figura 4.15. Resultados de resistencia y fluidez de los ajustes del tipo de cemento.

A partir de los resultados obtenidos se ve claramente la diferencia tanto en la resistencia como en la trabajabilidad para los distintos cementos, el ARI (P11) fue el que presentó mayor resistencia, llegando a valores en el entorno de 90 MPa a los 28 días y 100 MPa a los 56 días, sin embargo, para una rel. a/c de 0,26 la mezcla obtenida aumentó bastante su viscosidad plástica y cohesión, disminuyendo su trabajabilidad, lo cual se observó en el explayamiento medido mediante el ensayo de cono invertido.

El cemento CPC50 (P10) fue el que le siguió en términos de resistencia, brindando valores en el entorno de 83 MPa a los 28 días, que, si bien fue el que mostró mayor explayamiento en el ensayo de cono invertido, su viscosidad y cohesión también fueron aumentadas, en comparación con el pastón base (P08 - CPC40). Sin embargo, a pesar de sus buenos resultados, la elaboración de un cemento específico excede el alcance de la tesis, implicando grandes cambios e inversiones de la planta cementera, lo cual debería ser acompañado por un estudio de mercado que asegure la posibilidad de retornar económicamente los costos implicados.

La incorporación de PEF al CPN50 (ARI) (P12) en términos de resistencia y trabajabilidad mostró resultados similares a los del CPC40, sin embargo, aumentó la viscosidad de la mezcla.

Comparando los resultados, se destaca que si bien, para las resistencias buscadas, resulta apropiado trabajar con el CPC40 (P08) en la dosificación finalmente obtenida, es posible llegar a valores en el entorno de 90 MPa a los 28 días y 100 MPa a los 56 días cuando se implementa el cemento CPN50 (ARI), siendo necesario buscar una alternativa que disminuya la viscosidad del hormigón, mejorando así su trabajabilidad. Algunos autores (Aïtcin, 1998) recomiendan para ello adicionar una pequeña cantidad de humo de sílice.

6) Comentarios parciales

Se analizó cómo varía la trabajabilidad y la resistencia a compresión del hormigón cuando son modificados distintos parámetros de dosificación. Destacándose finalmente que:

- El uso de PEF como sustitución de cemento, no sólo disminuye la resistencia a compresión sino además, para la dosificación adoptada, aumenta la plasticidad de la mezcla.
- El aumento de agregado grueso mostró mejoras tanto en resistencia como en trabajabilidad del hormigón.
- El aumento de agua para una relación a/c fija de 0,30, disminuyó un poco la resistencia a la compresión, pero aumentó en gran medida la trabajabilidad, disminuyó la viscosidad del hormigón y aumentó la tendencia a la segregación.
- La disminución de la relación a/c aumentó sustancialmente la resistencia a compresión del hormigón, con pequeñas mejoras en la trabajabilidad para un valor de 0,26.
- El uso de cementos alternativos (que no forman parte del proceso habitual de producción de la empresa hormigonera) permitió obtener resistencias mayores a las buscadas, sin embargo, se observó una gran disminución de la trabajabilidad representada principalmente por el aumento de la viscosidad.

A raíz del análisis realizado, se destaca que, para obtener una mezcla de hormigón con una resistencia a la compresión y una trabajabilidad acordes a lo requerido es necesario aumentar las proporciones de agregado grueso y agua a 800 kg/m³ y 170 l/m³ respectivamente, trabajar con una relación a/c de 0,26 y eliminar el uso de PEF como sustitución del cemento CPC40. Sin embargo, se observó que es posible obtener valores en el entorno de 90 MPa a los 28 días y 100 MPa a los 56 días cuando se implementa el cemento CPN50 (ARI), siempre y cuando se procure buscar una alternativa que disminuya la viscosidad del hormigón, mejorando así su trabajabilidad.

C. Caracterización completa de la mezcla objetivo de laboratorio

La caracterización completa del pastón P08 se realizó con la finalidad de estudiar y comprobar el desempeño de la mezcla, no sólo considerando sus propiedades mecánicas, sino también aspectos de durabilidad.

Para ello se hormigonaron dos canchadas de 110 litros cada una (denominadas I y II, Tabla 4.19) y el mezclado se llevó a cabo utilizando una mezcladora SYNTESI-350.

Resulta importante destacar que el aumento de volumen en las mezclas de hormigón, que implicó el uso de una hormigonera de mayor capacidad, aumentó la energía de mezclado influyendo en los resultados obtenidos relacionados a la trabajabilidad del hormigón.

Tabla 4.19. Ensayos realizados con cada canchada de hormigón

Estado del hormigón	Norma de Ensayo	Ensayo	Serie I	Serie II	
Estado Fresco (EF)	UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)	Cono de flujo	x	x	
	UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)	Densidad	x	x	
		Contenido de aire	x	x	
	UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)	HAC	Anillo J	x	
			Caja en L		
			Embudo en V		
			Segregación		
-	-	Reología (Reómetro)		x	
Estado Endurecido (EE)	UNIT-ISO 1920-4:2020 (UNIT, 2020)	Resistencia a la compresión	x	x	
	UNIT-ISO 1920-10:2010 (UNIT, 2010)	Módulo de elasticidad	x		
	Manual DURAR (CYTED, 2002)	Absorción por sumersión		x	

1) Resultados en estado fresco

Las Tablas 4.18 y 4.19 presentan los resultados obtenidos para los ensayos en estado fresco y la Figura 4.16 muestra la reología de la mezcla obtenida a partir del reómetro.

Tabla 4.20. Resultados de ensayos en estado fresco realizados en ambas series de hormigón.

Serie	Cono Invertido		Densidad (kg/m ³)	Contenido de aire (%)
	Explayamiento* (cm)	T ₅₀ (s)		
I	66	7	2417	1,30
II	74	5	2411	1,60
Promedio	70	6	2414	1,45

* Promedio de dos determinaciones perpendiculares

Tabla 4.21. Resultados de ensayos en estado fresco para caracterización de parámetros de HAC

Ensayo	Hora* (min)	Resultados	
Cono Invertido	18	Explayamiento** (cm)	66
		T ₅₀ (s)	7
Anillo J	48	Explayamiento** (cm)	65
		T ₅₀ (s)	14
		Capacidad de paso (mm)	15
Embudo en V	56	T _v (s)	23
Caja en L	29	PL	0,87
Segregación por tamiz	25	Porcentaje pasante (%)	6,3

* Tiempo transcurrido (en minutos) desde el inicio del pastón hasta la realización del ensayo.

** Promedio de dos determinaciones perpendiculares.

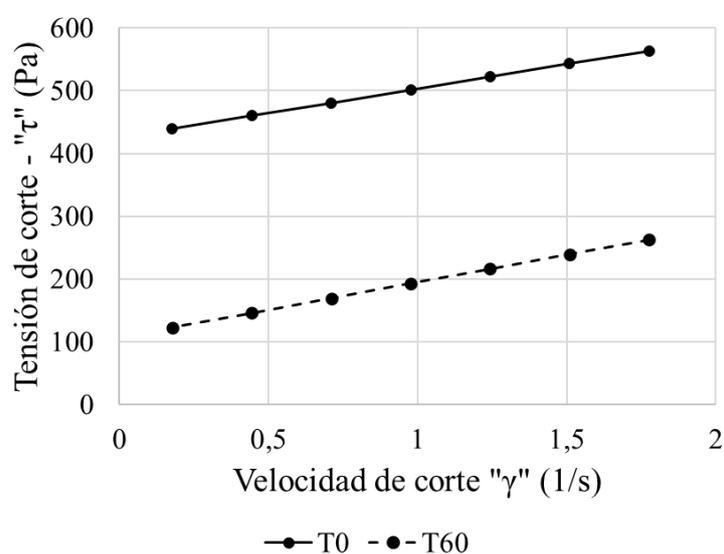


Figura 4.16. Resultados obtenidos por el Reómetro

La Tabla 4.20, muestra una diferencia de 6 centímetros entre los explayamientos obtenidos de ambas mezclas. Es importante destacar que la muestra que mostró mayor fluidez también presentó un mayor contenido de aire y una menor densidad. Esto sugiere que el aumento en la fluidez podría deberse a una mayor presencia de aire en la mezcla, fenómeno influenciado por factores que afectan la trabajabilidad del hormigón como cambios pequeños en la forma o granulometría de los componentes. Esto resalta la alta sensibilidad de este tipo de hormigones a pequeñas variaciones en sus materiales. Ambos resultados, según la clasificación de la Norma UNE-EN 206-9 (UNE, 2013), se encuentran dentro del rango de (660 a 750 mm), clasificándose como clase SF2 (Figura 4.18.a).

Al analizar los datos presentados en la Tabla 4.21 se observa un T₅₀ de 7 segundos, superior al rango recomendado por la bibliografía (AATH, 2004) (2-5 segundos), que según la normativa UNE-EN 206-9 (UNE, 2013) la muestra clasificaría como VS2 (≥ 2 segundos), indicando una alta cohesión. Lo mismo puede afirmarse al examinar los resultados del ensayo del Embudo en V, que según la normativa pertinente la muestra clasificaría como VF2 (rango:

9 a 25 segundos) (Figura 4.18.d). Sin embargo, el comportamiento observado está condicionado por el tiempo de realización del ensayo, que fue a los 56 minutos.

En el ensayo de la Caja en L, se destaca que la capacidad de paso obtenida con 3 barras fue de 0,87, superando el mínimo de 0,80 establecido por la normativa (Figura 4.18.c). En contraste, en el ensayo del anillo J, realizado 48 minutos después de comenzar la mezcla, la capacidad de paso a través de 16 barras fue de 15 mm, excediendo el límite máximo de 10 mm establecido para el hormigón autocompactante (Figura 4.18.b). Sin embargo, este resultado está condicionado por el tiempo de ejecución del ensayo, que se realizó a los 48 minutos.

No obstante, si miramos en mayor detalle los resultados presentados, es posible notar que en la Tabla 4.21 se detalla el horario en que fue realizado cada ensayo, pudiendo destacarse que sí bien se comenzó con una mezcla quizás autocompactante, la pérdida de fluidez en el tiempo generó que al cabo de los 50 minutos la misma ya no se comportara como tal. En donde para este caso, no resulta viable poder clasificar el comportamiento del hormigón ya que los resultados obtenidos dependen del tiempo transcurrido desde el inicio de la mezcla hasta la medición. Reflejando para la dosificación determinada una alta pérdida de la trabajabilidad en el tiempo.

Para el ensayo de segregación, el hormigón cumple con la clasificación SR2 ($\leq 15\%$), destacando que el valor obtenido se encuentra por debajo del mismo, reflejando indirectamente una alta cohesión.

Los ensayos de reología, presentados en la Figura 4.16, mostraron un comportamiento inesperado. La mezcla inicial desarrolló una mayor tensión crítica y viscosidad en comparación con el ensayo realizado a los 60 minutos, un resultado contrario a lo esperado, ya que habitualmente la trabajabilidad disminuye con el tiempo. Sin embargo, observaciones visuales durante los primeros 20 minutos indicaron que el mezclado mejoraba progresivamente la trabajabilidad. Esto sugiere que los resultados podrían deberse a un tiempo de mezclado inicial insuficiente para alcanzar la consistencia óptima de la mezcla.

Las Figuras 4.17 y 4.18 comparan los resultados obtenidos experimentalmente, para los ensayos de caracterización de hormigones autocompactantes y la viscosidad plástica cuando se utiliza un reómetro ICAR RHEOMETER, respectivamente, con valores internacionales obtenidos para hormigones cuyas resistencias a la compresión varían entre los 45 MPa y los 105 MPa, (AATH, 2013) (Dinakar, Reddy y Sharma, 2013), (Dinakar, Reddy y Sharma, 2013), (Sethy, Pasla y Sahoo, 2014), (Faraj et al., 2021), (Gesoglu, Güneyisi y Özbay, 2009), (Beycioğlu y Aruntaş, 2014), (Alyhya, Kulasegaram y Karihaloo, 2017), (Jang et al., 2018) (Yun et al., 2022).

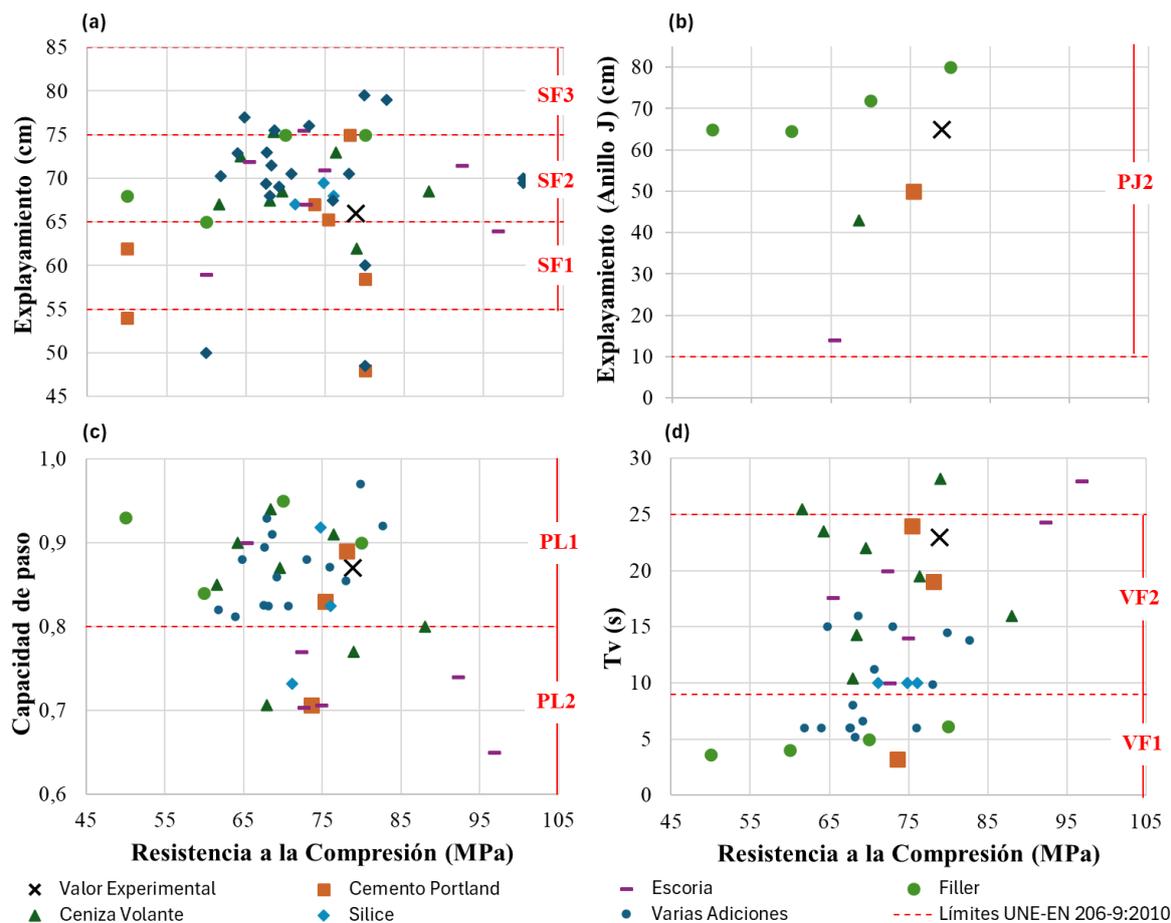


Figura 4.17. Resultados de ensayos en estado fresco vs. resistencia a la compresión para hormigones autocompactantes, comparados con valores internacionales, (a): explayamiento (cm), (b): explayamiento por anillo J, (c): capacidad de paso, (d): Tv (s)

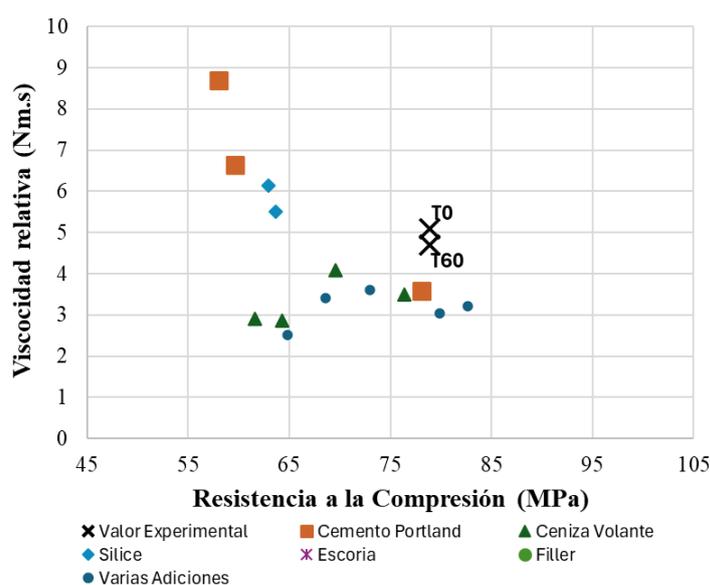


Figura 4.18. Resultados de viscosidad relativa utilizando un reómetro ICAR RHEOMETER, comparado con valores experimentales internacionales

Si bien, a partir de las Figuras 4.17 y 4.18, se observa que los resultados son comparables con investigaciones internacionales y que, por sus valores, el hormigón puede ser catalogado como autocompactante, no fue posible asignar una clase específica de autocompactante debido a la rápida pérdida de trabajabilidad con el tiempo.

2) Resultados en estado endurecido

La caracterización en estado endurecido consistió en el estudio de la resistencia a compresión, el módulo elástico y la absorción de agua por sumersión. Para cada una de las edades planteadas, la resistencia a la compresión se determinó como promedio de tres determinaciones. En la Figura 4.19 se presenta la curva de madurez con los resultados promedios y la desviación estándar obtenida, junto a la curva de maduración brindada por el Eurocódigo 2 (European Standard, 2004) para un hormigón de resistencia característica a la compresión a los 28 días de 70 MPa.

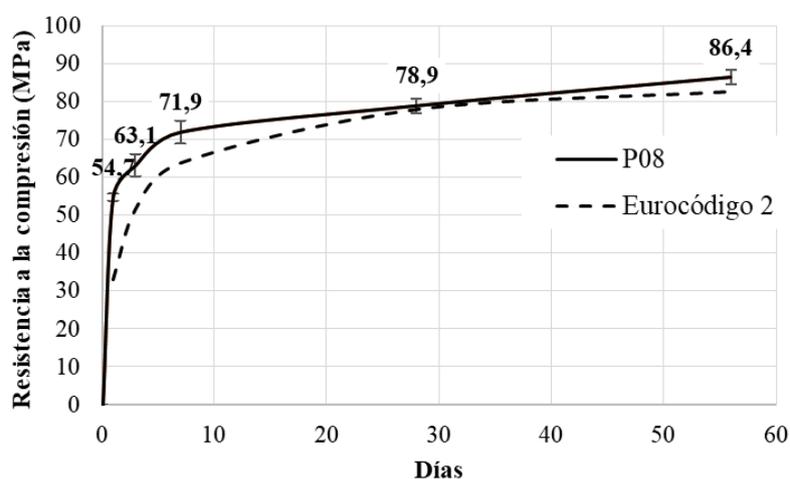


Figura 4.19. Resultados de resistencia a la compresión junto a la curva de maduración de la resistencia a la compresión según el Eurocódigo 2 (European Standard, 2004)

Se observa que los valores obtenidos presentan poca desviación (menor a 3 MPa) y una alta resistencia inicial de 54 MPa a un día. La resistencia a los 7 días fue 72 MPa, lo cual representó una ganancia del 90% del resultado alcanzado a los 28 días (78,9 MPa). La resistencia a los 56 días fue de 86 MPa, donde se obtuvo un incremento de aproximadamente un 10% respecto a los 28 días. Además, en comparación con el Eurocódigo 2, se destaca que para una resistencia a la compresión a los 28 días similar, el hormigón mostró mayor resistencia en las primeras edades y a los 56 días.

En el diseño y evaluación del hormigón de alto desempeño no sólo resulta interesante conocer la resistencia a la compresión, sino también analizar el módulo de elasticidad. Tradicionalmente, se ha entendido que existe una correlación positiva entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad: a medida que aumenta la resistencia del hormigón, se espera que también aumente su rigidez. Sin embargo, esta relación no es lineal ni directa, especialmente en hormigones de alta resistencia. Existen diversos factores que afectan el

módulo de elasticidad, como el tamaño y proporción del agregado grueso, la micro fisuración y los elevados contenidos de pasta que suelen utilizarse (AATH, 2004).

Si bien se conoce que el agregado grueso contribuye significativamente a la rigidez del hormigón. En mezclas de alta resistencia, para obtener una mezcla más homogénea y lograr una mayor resistencia a la compresión, no solo se reduce el tamaño del agregado grueso sino también su dosificación. Esta reducción, generalmente viene acompañada por un aumento del volumen de pasta, pudiendo disminuir la rigidez del hormigón y afectar consecuentemente su módulo de elasticidad. En este tipo de mezclas comienzan a tomar más relevancias otros factores, como la micro fisuración interna del agregado o los materiales complementarios que se utilizan (como aditivos o adiciones) que afectan su microestructura y consecuentemente su rigidez (AATH, 2004).

Si bien existen diversos métodos teóricos que correlacionan el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión, es recomendable para altas resistencias verificar la rigidez del hormigón mediante ensayos directos (Aitcin, 1998).

A raíz de esto, se comparan los resultados obtenidos no sólo con los valores teóricos correspondientes a los modelos establecidos en códigos y normas (UNIT 1050, Eurocódigo 2, Código modelo 2010, EHE-2008 (Pereyra et al., 2019)), sino que también resulta interesante analizar los datos experimentales de otros investigadores.

Para la determinación del módulo elástico se calculó el tercio de la resistencia de rotura a 28 días correspondiente a una probeta de 15x30 cm, aplicándose para ello el factor de corrección estipulado en la norma UNIT 1050 (UNIT, 2005) que correlaciona los resultados entre las probetas de 10x20 cm y las probetas de 15x30 cm (0,97). En la Tabla 4.22 se presenta el valor de módulo elástico correspondiente.

Tabla 4.22. Resultados de módulo elástico

Probeta	E_c (GPa)
P1	37,7
P2	38,9
P3	37,7
P4	40,4
Promedio	38,7
Desviación	1,3
Cv (%)	3,3

A modo de analizar los resultados obtenidos, en la Tabla 4.23 se muestran los valores obtenidos mediante algunos modelos teóricos, en la Figura 4.20 se compara el módulo de elasticidad con datos experimentales de autores locales, mientras que en la Figura 4.21 se presentan los resultados de investigaciones internacionales. Esta comparación permite evaluar la consistencia y variabilidad de los datos, así como identificar posibles diferencias debidas a los materiales y métodos específicos utilizados en distintas regiones.

Tabla 4.23. Valores de módulo elástico calculados teóricamente.

Método	Ecuación	Resultado
UNIT 1050	$E = 19000 \times \sqrt{f_{ck}}$	45,5
Eurocódigo EN 1992	$E = 22 \times (f_{cm}/10)^{0,3}$	40,9
Código Modelo 2010	$E = 21500 \times \alpha_E \times (f_{cm}/10)^{1/3}$	42,8
EHE-2008	$E = 8500 \times (f_{cm})^{1/3}$	40,1

f_{ck} resistencia característica calculada como $f_{cm} = 1,35f_{ck} + 1,5$

f_{cm} resistencia media obtenida.

α_E depende del agregado grueso, para agregados con cuarzo como el granítico es igual a 1.

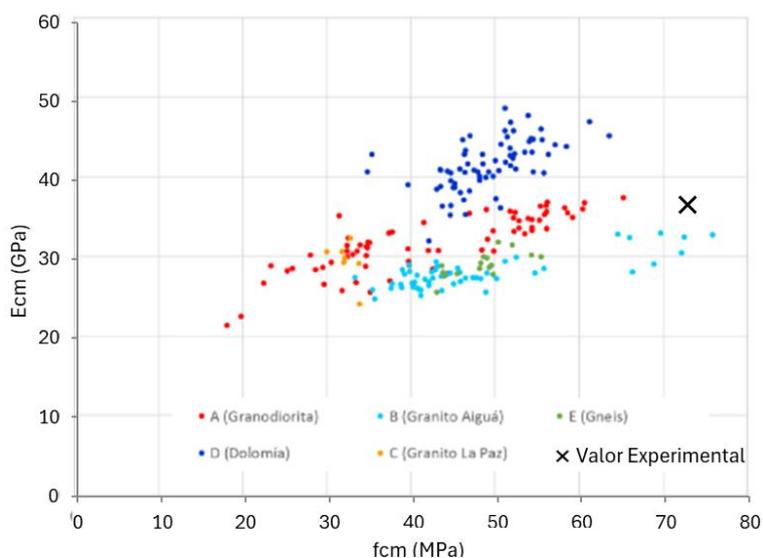


Figura 4.20. Datos experimentales de módulo elástico de investigadores locales (Pereyra et al., 2019)

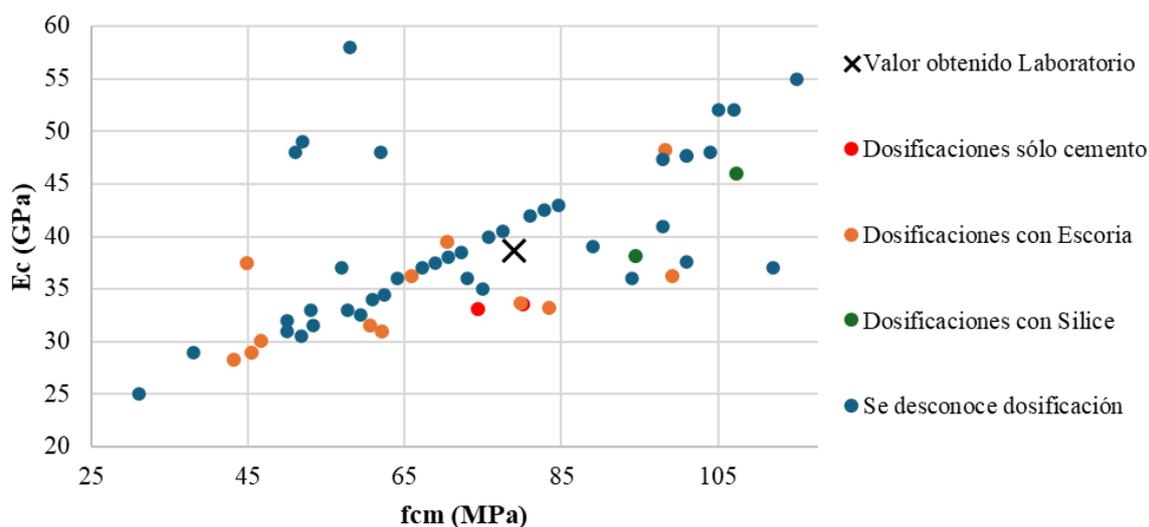


Figura 4.21. Datos experimentales de módulo elástico de investigaciones internaciones (Guerrero Vargas y Navas Carro, 2012), (Wu, 2001), (Amin y Abu el-Hassan, 2015)

De la Tabla 4.23 se destaca que los métodos teóricos determinaron valores superiores al obtenido experimentalmente. Coincidiendo con los investigadores locales (Pereyra et al.,

2019), que observaron que los métodos teóricos presentan buena estimación del módulo de elasticidad para resistencias a compresión dentro del rango de 20 a 40 MPa y sobreestiman los resultados cuando se utilizan mayores resistencias.

Si bien en la mayoría de los datos mostrados, en la Figura 4.20 y en la Figura 4.21, se desconoce la dosificación utilizada, a modo de comparación para las resistencias alcanzadas, es posible observar que el valor obtenido de módulo de elasticidad es acorde tanto a los datos nacionales como a los internacionales, donde se observa un crecimiento del módulo de elasticidad junto con el aumento de la resistencia a la compresión.

La porosidad se determinó como medida indirecta de la absorción, siguiendo el procedimiento mencionado en el manual DURAR (CYTED, 2002). Las probetas se sumergieron en agua hasta alcanzar la absorción potencial (hasta peso constante), se determinó su peso sumergido y luego fueron secadas en horno hasta peso constante. La Tabla 4.22 presenta los resultados obtenidos y en la Figura 4.22 se comparan con valores encontrados en la bibliografía (Fallah y Nematzadeh, 2017).

Tabla 4.24. Resultados de porosidad y absorción de agua

	M1	M2	M3	Promedio
Masa saturada (g)	1562,5	1582,3	1589,9	
Masa sumergida (g)	919,8	931,4	935,9	
Masa seca (g)	1546,4	1567,0	1574,6	
Porosidad (%)	2,5	2,4	2,3	2,4
Absorción (%)	1,04	0,98	0,97	1,0

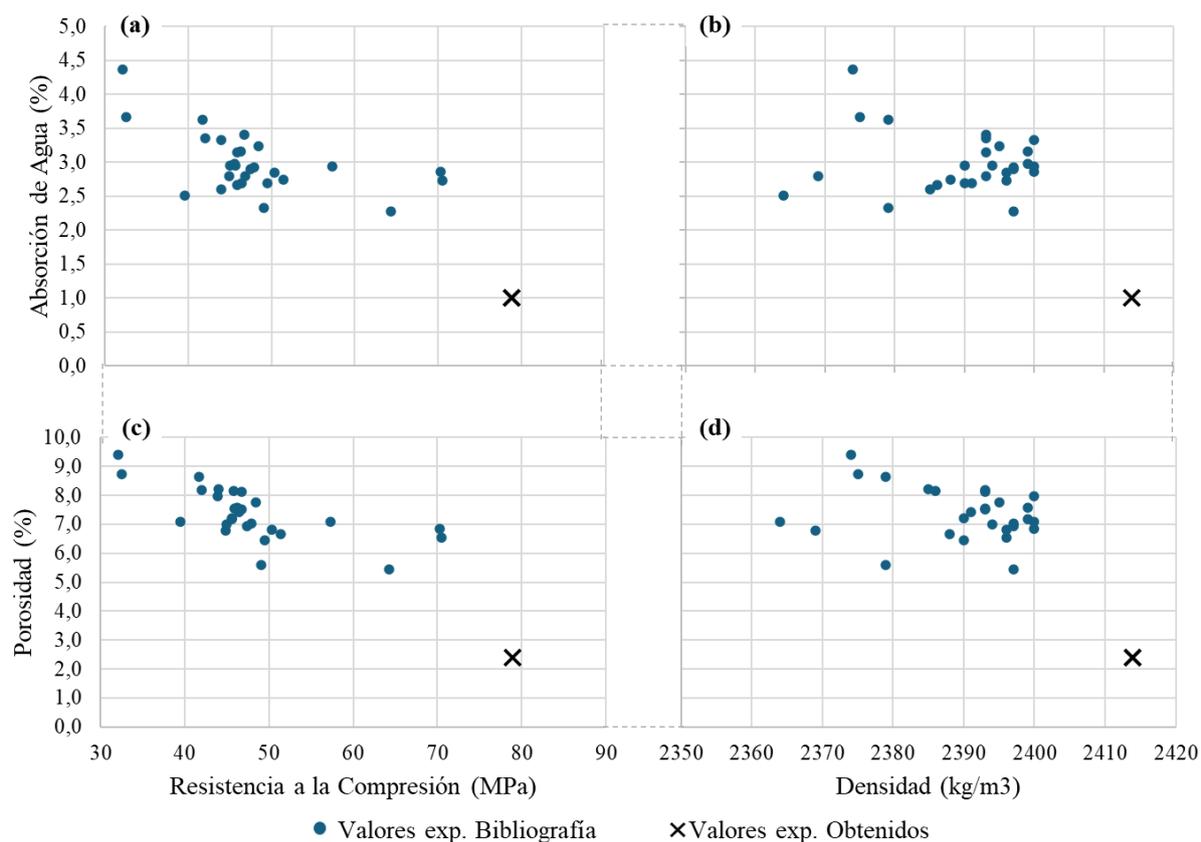


Figura 4.22. Resultados de Absorción y porosidad junto con valores obtenidos experimentalmente (Fallah y Nematzadeh, 2017), (a): Absorción de agua vs. Resistencia a la compresión, (b): Absorción de agua vs. Densidad, (c): Porosidad vs. Resistencia a la compresión, (d): Porosidad vs. Densidad.

A partir de la Figura 4.22 se destaca que se obtuvieron bajos valores de absorción y porosidad, concordantes con la bibliografía consultada (Fallah y Nematzadeh, 2017). Resultado finalmente una mezcla catalogada de alta durabilidad para los autores consultados (Fallah y Nematzadeh, 2017) (Wang et al., 2014).

3) Conclusiones Parciales

Se destaca que fue posible obtener una mezcla de hormigón de alta resistencia mecánica y durabilidad, con una adecuada trabajabilidad, que a simple vista parece bombeable; algunos autores plantean que, si bien en varias ocasiones puede ser difícil definir la capacidad del hormigón para ser bombeado o compactado, es importante atender a los cambios en el aspecto de la mezcla para lograr al menos una evaluación subjetiva (AATH, 2004). Si bien el hormigón en estado fresco presenta características suficientes como para ser autocompactante no se clasifica como tal debido principalmente a la necesidad de compactación para disminuir la porosidad y lograr mayor resistencia a la compresión.

Se comprobó la viabilidad de la mezcla, logrando una alta fluidez sin indicios de segregación. Pero se percató una alta pérdida de trabajabilidad con el transcurso del tiempo. Fenómeno observado por varios autores, cuyo análisis resulta de gran importancia debido a los tiempos

de traslado, colocación y terminación del hormigón. Sin embargo, esta problemática suele ser solucionada mediante el empleo de algunos aditivos químicos (AATH, 2004).

Finalmente, a pesar de que se cumplieron los objetivos planteados para la dosificación objetivo en laboratorio, debido a su rápida pérdida de asentamiento, no se considera una mezcla adecuada para desarrollar a escala industrial. Por lo cual, en la sección 4.3.2 se evaluó la pérdida de fluidez a lo largo del tiempo.

D. Repetitividad de la dosificación objetivo en laboratorio y su Resistencia Característica

Analizar la variabilidad de las propiedades del hormigón es esencial para asegurar la calidad y la consistencia del material entregado en obra. Conocer cómo varía su comportamiento permite identificar posibles errores en su elaboración y abordar los problemas de manera preventiva. En el caso de los hormigones de alto desempeño, cuyas propiedades son muy sensibles a pequeñas variaciones en los materiales, resulta crucial atender los problemas con antelación. Por ejemplo, conocer la variabilidad de la densidad o el contenido de aire del hormigón permite predecir su comportamiento mecánico sin necesidad de esperar los 28 días habituales para las pruebas de resistencia a la compresión (Aïtcin, 1998). De esta manera, se pueden tomar medidas correctivas de inmediato, asegurando así la calidad del material final.

Con el objetivo de evaluar la variabilidad de las propiedades básicas del hormigón se realizó una serie de muestras de la dosificación adoptada (P08) y se analizaron estadísticamente los resultados individuales de resistencia a la compresión, fluidez, densidad y contenido de aire. Los resultados obtenidos se encuentran sujetos a la variación de los materiales disponibles en producción. La Tabla 4.25 presenta los resultados de explayamiento, densidad y contenido de aire y la Tabla 4.26 muestra los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión, siendo:

f_{c_j} la resistencia a la compresión a los j días de edad, expresado en unidades de MPa.

f_{cm_j} la resistencia media a la compresión a los j días de edad, expresado en unidades de MPa.

$\sigma_{sd,j}$ la desviación estándar a los j días de edad, expresado en unidades de MPa.

Cv_j el coeficiente de variación, expresado en %, calculado como el cociente entre la desviación estándar y la resistencia media a la compresión

Tabla 4.25. Variabilidad de fluidez, densidad y contenido de aire de P08

Repeticiones de P08	Explayamiento (cm)	Densidad (kg/m ³)	Contenido de Aire (%)
P08-1	66	2417	1,3
P08-2	74	2411	1,6
P08-3	73	2444	1,0
Promedio	71	2424	1,3
σ_{sd}	4,4	17,6	0,3
Cv (%)	6,2	0,7	23,1

Tabla 4.26. Variabilidad de la Resistencia a Compresión de P08

Repeticiones de P08	f_{c1}	f_{c7}	f_{c28}	f_{c56}	
P08-1	55,6	74,6	80,9	88,6	
	53,7	68,7	78,5	86,1	
	54,9	72,5	77,2	84,6	
	-	-	81,1	-	
	-	-	75,3	-	
	-	-	74,6	-	
	-	-	79,0	-	
	-	-	78,8	-	
f_{cm_j}	54,7	71,9	78,0	86,4	
$\sigma_{sd,j}$	1,0	3,0	2,3	2,0	
Cv_j	1,8	4,2	2,9	2,3	
P08-2	51,7	71,1	82,3	86,6	
	52,8	67,9	82,6	84,8	
	52,5	69,8	85,4	84,5	
	-	-	82,9	-	
	-	-	81,0	-	
	-	-	81,7	-	
	f_{cm_j}	52,3	69,6	82,7	85,3
	$\sigma_{sd,j}$	0,6	1,6	1,5	1,1
Cv_j	1,1	2,3	1,8	1,3	
P08-3	-	66,5	73,8	-	
	-	67,0	74,4	-	
	-	64,7	74,4	-	
	-	-	74,2	-	
	f_{cm_j}	-	64,3	74,2	-
	$\sigma_{sd,j}$	-	1,1	0,3	-
	Cv_j	-	1,7	0,4	-

Como se mencionó en la Sección 4.1.2, algunas normas (UNIT, 2005; IRAM, 2020; UNE, 2018) contemplan ensayos de control del hormigón con el fin de verificar que la resistencia característica obtenida en obra sea igual o superior a la especificada en el proyecto. Sin embargo, estas normas no incluyen métodos específicos para estimar dicha resistencia a partir de resultados de laboratorio.

Dado que esta tesis aborda el desarrollo de un producto que aún no ha sido comercializado, y por tanto carece de resultados en obra que permitan una estimación estadística directa de la resistencia característica, evaluar si la resistencia característica estimada a partir de los ensayos de laboratorio es superior a la resistencia característica prevista siguiendo las recomendaciones planteadas en las normas: UNIT 1050:2005, IRAM 1666:2020 y UNE-EN 206:2013+A1:2018.

- **UNIT 1050:2005:**

Para el cálculo de la resistencia estimada mediante la norma UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005) se consideró un grado de control a nivel normal y se tomaron los valores individuales presentados en la Tabla 4.26, se realizó el ajuste de resistencia por tamaño de probeta (0,97), se ordenaron los datos y se aplicaron las Ecuaciones 4.4 y 4.5. La Tabla 4.27 muestra el estudio estadístico realizado.

Tabla 4.27. Estimación de la Resistencia Característica según la norma UNIT 1050:2005

f_{c28} (10x20)	f_{c28} (15x30)	N	K_N	m	X_m (MPa)	f_{est} (MPa)
74,2	72,0	3	0,93	1	74,2	66,9
78,0	75,7					
82,7	80,2					

De la Tabla 4.27 se observa que es necesario aumentar el volumen de la población de resultados para que, desde el punto de vista estadístico, la resistencia característica estimada supere la resistencia característica objetivo (70 MPa).

- **IRAM 1666:2020:**

Para el cálculo de la resistencia estimada según la norma IRAM 1666:2020 (IRAM, 2020), y dado el número de datos individuales presentados en la Tabla 4.26, se aplicó el control inicial correspondiente a los primeros 15 resultados de ensayo mediante la Ecuación 4.6. La Tabla 4.28 muestra los resultados obtenidos.

Además, se destaca que para las tres amasadas consideradas, en ningún caso el rango entre los valores extremos de resistencia supera el 15 % del valor medio, por lo que no fue necesario descartar ningún resultado individual de probeta.

Tabla 4.28. Estimación de la Resistencia Característica según la norma IRAM 1666:2020

f_{c28} (10x20)	f_{c28} (15x30)	f'_{cm^3}	r_m	$f'_{cm^3} - r_m$
74,2	72,0	75,9	8,2	67,7
78,0	75,7			
82,7	80,2			

De la Tabla 4.28 se observa nuevamente que es necesario aumentar el volumen de la población de resultados para que, desde el punto de vista estadístico, la resistencia característica estimada supere la resistencia característica objetivo (70 MPa).

- **UNE-EN 206:2013+A1:**

Para el cálculo de la resistencia estimada mediante la norma UNE-EN 206:2013+A1 (UNE, 2018) se realizaron tres verificaciones: dispersión de resultados de probetas, valores individuales de amasadas y control inicial “condición para producción inicial”.

- I. Dispersión de resultados de probetas: Se verificó que para las tres amasadas, en ningún caso el rango entre los valores extremos de resistencia superara el 15 % del valor medio, por lo que no fue necesario descartar ningún resultado individual de probeta.
- II. Control de valores individuales: La norma UNE-EN 206:2013+A1 (UNE, 2018) establece que todos los resultados individuales de resistencia a la compresión de amasadas deben cumplir con la Ecuación 4.8. Esto implica que, para una resistencia característica de 70 MPa, los valores obtenidos deben ser superiores a 66 MPa.
- III. Control inicial: para realizar el control inicial se aplicó la Ecuación 4.9 y los resultados son presentados por la Tabla 4.29.

Tabla 4.29. Estimación de la Resistencia Característica según la norma UNE-EN 206:2013+A1

f_{c28} (10x20)	f_{c28} (15x30)	f_{cm}	$f_{cm} - 4$
74,2	72,0		
78,0	75,7	75,9	71,9
82,7	80,2		

De los resultados obtenidos se destaca que se cumple con la condición individual, ya que todas las amasadas presentaron valores superiores a 66 MPa. Además, se obtuvo una resistencia característica estimada superior a 70 MPa.

- **Comentarios Parciales:**

A partir de los ensayos de laboratorio y la aplicación de los métodos estadísticos contemplados en las normas UNIT 1050:2005, IRAM 1666:2020 y UNE-EN 206:2013+A1:2018, se obtuvo una estimación consistente de la resistencia característica a compresión del hormigón desarrollado.

Según UNIT 1050:2005 e IRAM 1666:2020, la resistencia característica estimada se ubicó en torno a 67 MPa, lo que indica que sería necesario ampliar el tamaño de la muestra para que, desde el punto de vista estadístico, el valor calculado supere los 70 MPa.

Por su parte, la verificación conforme a UNE-EN 206:2013+A1:2018 mostró que se cumplió con la condición individual (las tres amasadas presentaron valores superiores a 66 MPa), y el control inicial arrojó una resistencia característica de 72 MPa.

Estos resultados permiten concluir que, aunque se trata de un hormigón que aún no se produce a escala industrial, las propiedades medidas en laboratorio cumplen con los requisitos normativos, evidenciando además baja dispersión de resultados y una resistencia media adecuada. No obstante, convendría incrementar la cantidad de ensayos para reforzar estadísticamente la estimación de la resistencia característica.

4.3.2. Mezcla objetivo para escala industrial

Durante el estudio de la caracterización completa, (Sección 4.3.1 - C), la mezcla mostró una elevada pérdida de la trabajabilidad en el tiempo. Para corroborar el comportamiento observado en el pastón P08, se procuró volver a estudiar el comportamiento reológico. Para ello se realizó

otro pastón de 77 litros (P15), se midió cada 30 minutos la viscosidad mediante el reómetro y el explayamiento con el ensayo de cono invertido. La Tabla 4.30 presenta la dosificación e indicadores de dosificación del pastón y la Figura 4.23 muestra los resultados del comportamiento reológico.

Tabla 4.30. Dosificación e indicadores pastón P15

Dosificación (kg/m ³)	P15 ≈ P08	Indicadores/Pastón	P15
Cemento	654	Relación a/c	0,26
PEF	0	Relación a/finos	0,26
Arena Fina	231	Pasta (%) *	41
Arena Gruesa	518	Agregados (%)	59
PP 5-14	800	Agregado Fino (%)	29
Agua	170	Arena Fina (%)	9
Aditivo	5,88	Arena Gruesa (%)	20
Superplastificante	(0,9%)	Agregado Grueso (%)	31
		Cemento kg/m³	654

*Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

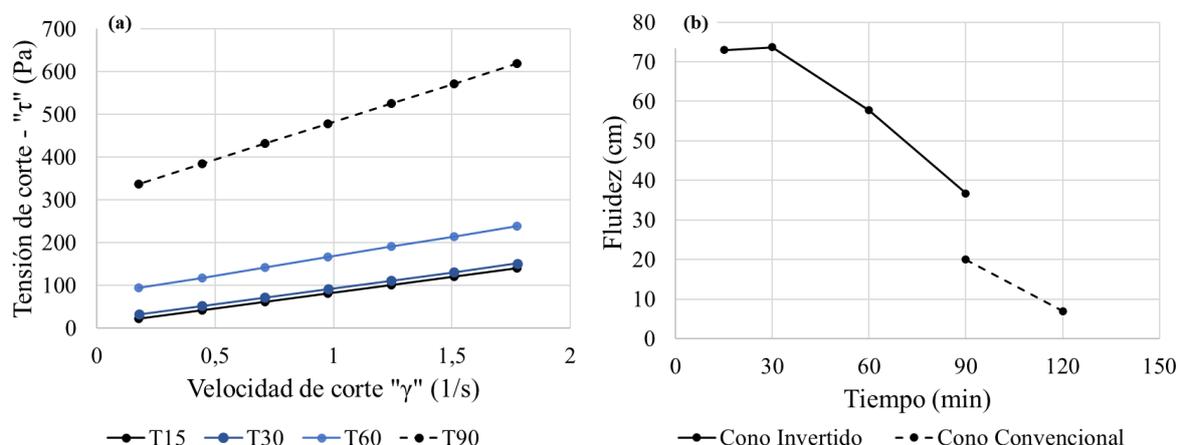


Figura 4.23. Resultados del comportamiento reológico del pastón P15, (a): resultados de reometría, (b): resultados de fluidez

La Figura 4.23.a presenta los resultados de las mediciones realizadas con el reómetro y la Figura 4.23.b muestra los resultados de fluidez (explayamientos y asentamientos) obtenidos mediante el ensayo de cono.

En ambas figuras, se observa que la mezcla presenta un comportamiento similar durante los primeros 30 minutos (T15 y T30), representado no sólo por los resultados del reómetro sino también por los explayamientos obtenidos. Si bien la mezcla, a los 60 minutos aún presentó una viscosidad plástica similar (pendiente de la recta T60), aumentó la tensión crítica (representado por el corte con el eje de las ordenadas en la recta T60). Se destaca

que a los 90 minutos la viscosidad plástica (pendiente de la recta T90) y la tensión crítica (corte con el eje de las ordenadas en la recta T90) aumentan notoriamente. Este comportamiento también fue observado en el ensayo de fluidez, que a los 90 minutos fue necesario realizar el cono convencional. A los 120 minutos la trabajabilidad no permitió realizar las mediciones con el reómetro. Resultando una mezcla trabajable (posiblemente bombeable) únicamente entre 30 y 60 minutos.

Para aumentar el rango de trabajabilidad del hormigón, se incorporó otro aditivo a la mezcla. El aditivo P (A1 en el Capítulo 2) se utilizó como aditivo de sacrificio y el SP (A4 en el Capítulo 2) como aditivo superplastificante.

Buscando obtener un asentamiento en el entorno de 10 cm previo a colocar el superplastificante, considerando la experiencia de los técnicos de la empresa en el desempeño de ambos aditivos, se comenzó con una dosis de P de 0,7%, reduciendo el aditivo SP de 0,9% a 0,62%. Para ello se realizó un pastón de 70 litros (P16), en el cual se midió asentamiento cada 15 minutos durante 3 horas. El aditivo P fue colocado al inicio de la mezcla, procurando obtener un asentamiento adecuado para el mezclado y traslado del hormigón. El aditivo SP fue colocado a los 60 minutos, procurando medir su efectividad durante el tiempo de colocación del hormigón. La Tabla 4.31 muestra la dosificación e indicadores de la mezcla, la Figura 4.24.a representa la pérdida de trabajabilidad (asentamiento/explayamiento) y la Figura 4.24.b la ganancia de resistencia a la compresión.

Tabla 4.31. Dosificación e indicadores pastón P16

Dosificación	P16	Indicadores/Paston	P16
Cemento (kg/m³)	654	Relación a/c	0,26
PEF (kg/m³)	0	Relación a/finos	0,26
Arena Fina (kg/m³)	231	Pasta (%)*	41
Arena Gruesa (kg/m³)	518	Agregados (%)	59
PP 5-14 (kg/m³)	800	Agregado Fino (%)	29
Agua (kg/m³)	170	Arena Fina (%)	9
Aditivo P (g/m³)	4,58 (0,7%)	Arena Gruesa (%)	20
TC** (minutos)	0	Agregado Grueso (%)	31
Aditivo SP (g/m³)	4,54 (0,62%)	Cemento kg/m³	654
TC** (minutos)	60		

*Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

**TC: Tiempo de colocación del aditivo.

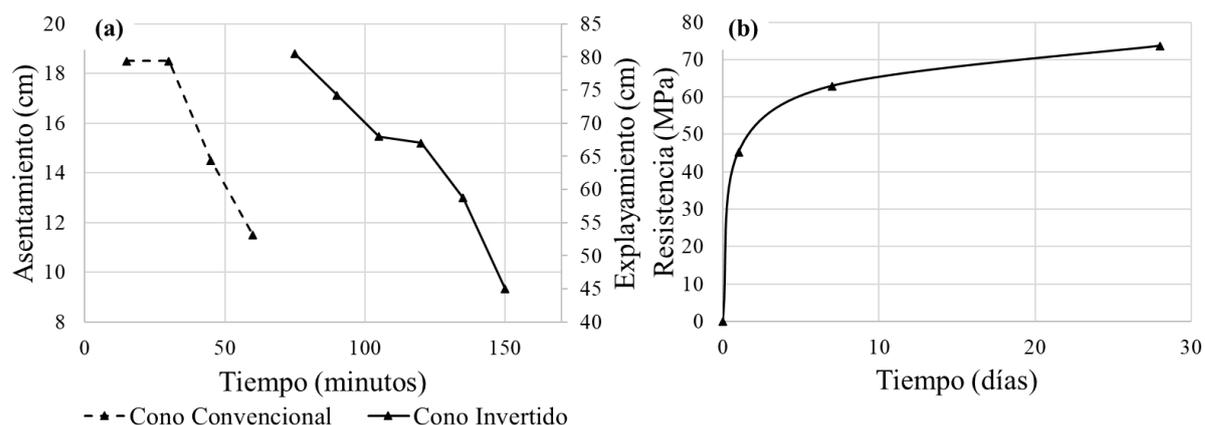


Figura 4.24. Resultados de (a): asentamiento/explayamiento (b): resistencia media a la compresión del Pastón P16 (Primer pastón con aditivos P y SP)

Se destaca que, si bien los resultados obtenidos tanto en fluidez como en resistencia (Figura 4.24) fueron aceptables, se observó (inicialmente) segregación en el hormigón, que se estabilizó luego de 30 minutos. Considerándose apropiado disminuir la dosis de aditivo SP de 0,62% a 0,55%. Se observa, además, que a medida que transcurre el tiempo aumenta la viscosidad de la mezcla, implicando la necesidad de incorporar inicialmente un aditivo adicional (estabilizador de hidratación IH) en una dosis de 0,3% (por recomendación del fabricante y experiencia de la empresa); para mejorar la viscosidad y aumentar la ventana de trabajo de la mezcla (AATH, 2004).

Se realizaron 2 pastones (P17 Y P18). El pastón P17, se ejecutó siguiendo la metodología mencionada anteriormente; el aditivo P se coloca al inicio de la mezcla, el IH aproximadamente a los 10 minutos y el aditivo SP a los 60 minutos, representando una secuencia tal que, los primeros dos aditivos serían colocados en planta y el superplastificante se colocaría en obra. El pastón P18 contempla la colocación de los tres aditivos en planta. La Tabla 4.32 presenta la dosificación y la Figura 4.25 muestra los resultados obtenidos para ambos pastones, junto al pastón P16, donde la Figura 4.25.a. muestra los resultados de fluidez en línea punteada con el cono convencional y en línea continua con el cono invertido.

Tabla 4.32. Dosificaciones pastones para el estudio de la reología

Dosificación (kg/m ³)	P16	P17	P18
Cemento	654	654	654
Filler	0	0	0
Arena Fina	231	231	231
Arena Gruesa	518	518	518
PP 5-14	800	800	800
Agua	170	170	170
Aditivo Plasificante	4,58 (0,7%)	4,58 (0,7%)	4,58 (0,7%)
TC (minutos)	0	0	0
Aditivo inhibidor de hidratación	-	1,96 (0,3%)	1,96 (0,3%)
TC (minutos)	-	10	10
Aditivo Superplasificante	4,54 (0,62%)	3,60 (0,55%)	3,60 (0,55%)
TC (minutos)	60	60	10

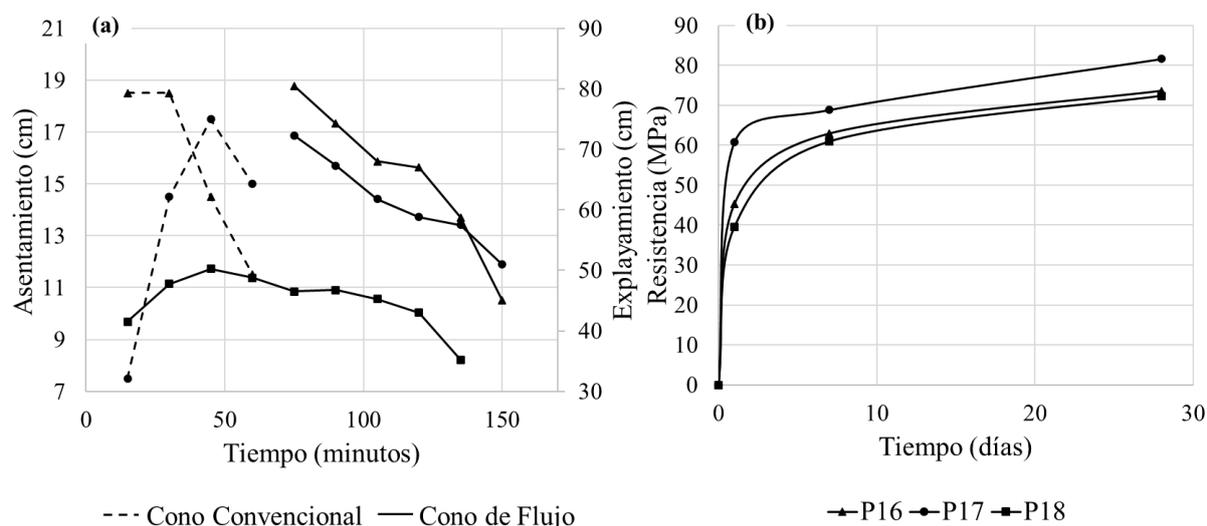


Figura 4.25. Resultados de (a): asentamiento/explayamiento y (b): resistencia a la compresión de los pastones P16, P17 y P18.

De las observaciones realizadas en laboratorio y los resultados presentados en la Figura 4.25 se resaltan las siguientes aclaraciones:

- Cuando se incorpora el aditivo de sacrificio, es necesario mezclar durante 8-10 minutos para lograr la formación de una mezcla homogénea.
- Una vez lograda la consistencia inicial de la mezcla con el aditivo de sacrificio, el efecto al colocar del aditivo superplastificante es instantáneo, esto se observó en los pastones P16 y P17.
- La colocación de los tres aditivos al inicio de la mezcla disminuye la trabajabilidad del hormigón al aumentar su viscosidad plástica (P18).

- Para el pastón P17 se obtuvo un asentamiento inicial menor al pastón P16, lo cual implicó explayamientos menores, sin embargo, la mezcla obtenida mostró una buena estabilidad, sin presencia de segregación.
- La incorporación del aditivo IH inhibió la hidratación inicial del hormigón y mejoró la trabajabilidad y viscosidad plástica de la mezcla, permitiendo una ventana de trabajo de 60 minutos después de la adición del aditivo SP (P17).

Considerando los tiempos de traslado y colocación del hormigón cuando se produce a escala industrial se propone realizar la primera prueba a gran escala utilizando la dosificación determinada por la mezcla P17 (

Tabla 4.32) con la secuencia de colocación de aditivos que muestra el esquema de la Figura 4.26.

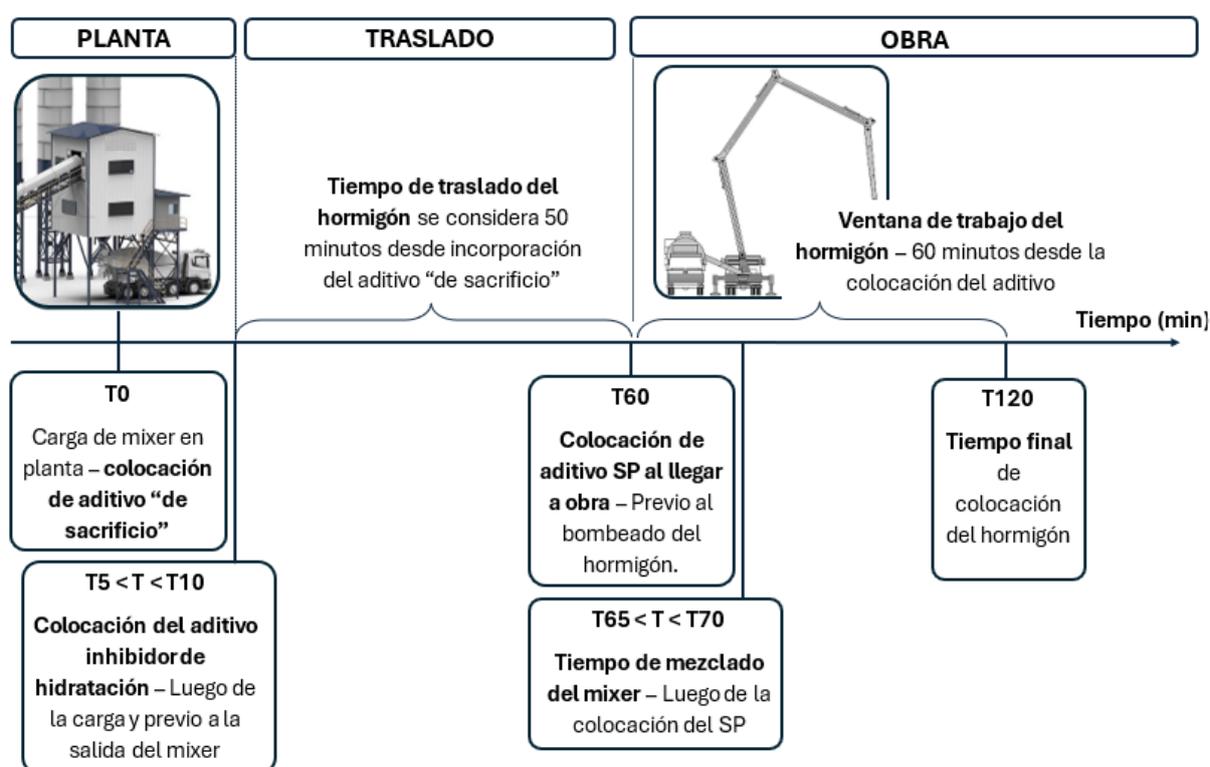


Figura 4.26. Secuencia de colocación de aditivos y ventana de trabajo del hormigón, línea de tiempo sin escala

4.4. Conclusiones parciales

Se obtuvo una mezcla que, a simple vista, se considera viable para su implementación a escala industrial, proporcionando una resistencia media superior a 70 MPa en laboratorio y una fluidez que se asume adecuada para su bombeo.

Aunque la metodología de dosificación basada en la combinación de varios métodos implicó la elaboración de una mayor cantidad de pastones de prueba de los inicialmente previstos, las proporciones recomendadas resultaron ser adecuadas como punto de partida. Sin embargo, no

fue posible alcanzar las propiedades requeridas con los materiales disponibles. Se comprobó la influencia de la forma y el tamaño de las partículas, lo que incrementó el contenido de pasta por encima de las proporciones recomendadas por la bibliografía.

Fue necesario realizar varios ajustes experimentales a la mezcla teórica inicial. Lograr una dosificación con una trabajabilidad adecuada requirió, principalmente, un aumento en el contenido de pasta. Para alcanzar la resistencia requerida, fue necesario implementar una relación agua/cemento muy baja, con un valor de 0,26.

La caracterización completa de la mezcla mostró los resultados buscados. Si bien el hormigón en estado fresco presenta características suficientes como para ser autocompactante, para los objetivos buscados en el proyecto, se observó que compactando la mezcla se lograban resultados de resistencia a la compresión aún mejores que si no se realizara el compactado. En términos de propiedades endurecidas, se obtuvo una resistencia característica de 72,7 MPa y un módulo elástico experimental de 38 GPa, que acompaña los resultados obtenidos tanto en investigaciones nacionales como internacionales. Se observó que, para las resistencias alcanzadas, las fórmulas teóricas que determinan el módulo elástico, en normas y códigos, sobreestiman su valor, con resultados en el entorno de 41 GPa.

A pesar de lograr una trabajabilidad considerada viable a implementar a escala industrial, se observó un aumento relativamente rápido de la viscosidad con el tiempo, lo que implicó la necesidad de implementar otros aditivos que no solo permitan el traslado del hormigón a la obra, sino también una ventana de tiempo de trabajo que permita su colocación. A raíz de recomendaciones de otros investigadores (Aïtcin, 1998), (AATH, 2004), se utilizaron tres aditivos: P (Plastificante), que es incorporado por la planta y actúa como aditivo de sacrificio, permitiendo el mezclado durante el traslado del hormigón; IH (Inhibidor de hidratación) que se añade luego de la carga a pie de camión; y SP (superplastificante), que se aplica en obra antes de la colocación del hormigón, proporcionando una ventana de trabajo de 60 minutos.

Aunque la metodología planteada incorpora cambios en el proceso de control habitual de la empresa hormigonera, con la necesidad principal de disponer de personal apropiado en obra para la incorporación y control del aditivo superplastificante, no se recomienda la incorporación del aditivo SP en planta.

Tratándose de un hormigón especial, con condiciones de prestaciones muy altas y sensibles a pequeñas variaciones de los materiales, es importante maximizar los controles en todas las etapas.

Capítulo 5 - Escala Industrial

En el capítulo 4 se obtuvo la “Mezcla objetivo de laboratorio” (P17), la cual alcanzó los objetivos buscados en cuanto a fluidez para su bombeo y una resistencia característica a compresión a los 28 días $f_{ck}=72$ MPa. Posteriormente, se analizó la pérdida de trabajabilidad en el tiempo, lo cual llevó a ajustar la combinación de aditivos usados y a optimizar la secuencia de incorporación de estos para lograr una ventana de trabajo de al menor una hora, de esta forma se obtuvo (en condiciones de laboratorio) la “mezcla objetivo para escala industrial” (P17).

En este capítulo se verifica su viabilidad de ser producida a escala industrial, se realiza una prueba de bombeo, y finalmente, se caracteriza la mezcla en estado fresco y endurecido. En base a los resultados obtenidos, posteriormente se ajusta en laboratorio la dosis del aditivo IH utilizado, se caracteriza completamente la mezcla seleccionada y se determina la temperatura máxima alcanzada por el hormigón.

5.1. Introducción

El Capítulo 4 presentó los fundamentos teóricos necesarios para comprender la metodología de dosificación y la caracterización completa abarcada de la mezcla de hormigón. Esta sección detalla la importancia de estudiar la evolución de temperatura de hidratación del hormigón, sus consecuencias y el método implementado para su determinación.

5.1.1. Temperatura del hormigón

Como se mencionó en el Capítulo 2, las reacciones de hidratación del cemento portland son exotérmicas. A medida que progresa la hidratación del cemento, aumenta el calor generado. En hormigones convencionales, cuando el contenido de cemento hidratado no es muy elevado y el elemento no es masivo, el control de temperatura puede limitarse a épocas calurosas. Sin embargo, en hormigones masivos o de alto desempeño, donde se incrementan los contenidos de cemento hidratado, es fundamental estudiar las altas temperaturas internas y el gradiente térmico que se genera, dado que pueden producir tensiones internas y favorecer la formación de etringita diferida (DEF), comprometiendo así la durabilidad estructural.

Cuando la temperatura interna del hormigón excede los 60–70 °C, en condiciones con suficiente cantidad de sulfatos y humedad sostenida, puede producirse la formación de etringita diferida (DEF). Como se explicó en el Capítulo 2, el sulfato de aluminato tricálcico hidratado (etringita) se forma inicialmente en la reacción entre C_3A y sulfato de calcio (yeso) durante las primeras horas de hidratación. Posteriormente, el C_3A reacciona con la etringita generando monosulfato de calcio, lo que contribuye favorablemente a las propiedades del hormigón. No obstante, si la formación de etringita se produce de manera incontrolada durante el endurecimiento del hormigón, genera expansiones internas que pueden causar fisuración y grietas, reduciendo la durabilidad y la resistencia mecánica.

Algunos investigadores han registrado temperaturas máximas en el entorno de 60°C y 70°C en elementos estructurales masivos elaborados en HAD (Aïtcin, 1998), con un gradiente térmico

de hasta 40°C - 50°C. Cuando se trabaja con estos niveles de temperaturas resulta importante considerar qué:

- La hidratación se ve afectada por el volumen de la muestra, y los valores de temperatura pueden aumentar en elementos estructurales en comparación con muestras de laboratorio (Aïtcin, 1998).
- La temperatura no es uniforme en toda la pieza, lo que genera partes con distintos grados de endurecimiento. Además, estos gradientes de temperatura pueden producir esfuerzos de tracción que, si el hormigón aún no ha adquirido la resistencia suficiente, provocarán fisuras internas, afectando negativamente la integridad y durabilidad de la estructura (Aïtcin, 1998), (Ng, Ng y Kwan, 2008).

Diversos factores influyen en el aumento de temperatura del HAD, incluyendo el calor máximo de hidratación, la velocidad de generación de calor, la composición química y la finura del cemento, la interacción con aditivos y la temperatura inicial de la mezcla. También son relevantes los factores geométricos, termodinámicos, la temperatura ambiente y la capacidad del elemento para disipar calor. En HAD, debido al uso de superplastificantes para mejorar la trabajabilidad, la hidratación y el fraguado pueden retrasarse de 12 a 18 horas. Este retardo implica que, al iniciar la hidratación, el aumento de temperatura es acelerado, alcanzando un pico en cuestión de horas y reduciéndose lentamente en días, dependiendo de las condiciones ambientales y del elemento estructural (Aïtcin, 1998).

Por lo cual, es importante estudiar la evolución del calor de hidratación para HAR/HAD y obras masivas de hormigón convencional. Si bien se analiza la temperatura alcanzada por el hormigón, dado que el objetivo de la tesis fue elaborar un HAD con aplicación en pilares estructurales, donde, debido a sus condiciones geométricas, debería ocurrir una elevada disipación de calor, no se espera que se generen las condiciones para el desarrollo de etringita diferida, como podría suceder en elementos masivos de grandes dimensiones.

5.1.1.1. Métodos para determinar la Temperatura Máxima en el Hormigón.

Para minimizar el riesgo de fisuración por temperatura, es recomendable conocer la evolución de temperatura durante la hidratación del hormigón. Con el aumento de la tecnología de los últimos años se han desarrollado diversas técnicas de calorimetría, que permiten medir la variación de calor en las mezclas de pasta, mortero u hormigón; pudiendo ser clasificadas como:

- Isotérmicas: permiten obtener la temperatura máxima en condiciones teóricamente “ideales” en la que la temperatura de la muestra se mantiene constante y la evolución habitual de la temperatura de la muestra no altera la cinética de las reacciones, técnica ya desarrollada e implementada para el análisis de las pastas de cemento en el Capítulo 2. Sin embargo, esta técnica no refleja las condiciones reales de las estructuras ni su intercambio continuo de calor.
- Adiabáticas: permiten determinar el calor máximo generado sin intercambio de calor con el ambiente. Si bien esta técnica también representa condiciones ideales, permite que la muestra aumente de temperatura con las reacciones exotérmicas. Esta técnica representa las condiciones en el centro de un gran bloque de hormigón.

- Semi-adiabáticas: permiten un limitado intercambio de calor con el ambiente. La disipación de calor admitida convierte a esta técnica en la calorimetría más representativa de lo que sucede en campo.

Sin embargo, ninguna de las tres técnicas refleja la situación real de la estructura, donde la velocidad de pérdida de calor se encuentra en continuo cambio, resultando imposible reproducir ese fenómeno en laboratorio (RILEM, 1998). A efectos de la experiencia presentada en este capítulo, abordaremos únicamente el estudio de la temperatura mediante métodos semi-adiabáticos.

En los calorímetros semi-adiabáticos la velocidad de pérdida de calor se controla únicamente mediante algún tipo de aislación, evitando la implementación de fuentes de calor externa que mejoren la eficiencia del equipo implementado (como sí lo hacen los calorímetros adiabáticos). Los calorímetros Semi-adiabáticos pueden ser clasificados en aquellos cuya aislación se genera mediante un termo y aquellos en los que la muestra se rodea mediante una capa de material aislante, como el caso del poliestireno. Los calorímetros cuya aislación se genera por una capa de material aislante suelen diferenciarse únicamente por el tamaño y la forma de la muestra y por el tipo y grosor del material aislante utilizado. En función de estas características y dependiendo de la tecnología y posibilidad de distintos laboratorios es posible encontrar diversos métodos de prueba. A efectos de este trabajo se detallará el método implementado por algunos autores (Ng, Ng y Kwan, 2008), seleccionado y aplicado en base a las posibilidades tecnológicas disponibles por la empresa.

El método propone determinar la evolución de temperatura mediante la implementación de un equipo semi-adiabático, y por medio de formulaciones numéricas compensar la disipación de calor, y determinar la temperatura máxima y el gradiente generado en condiciones adiabáticas. Según los autores, cuando se utilizan muestras de hormigón menores a 1 m³ o una aislación inadecuada, el aumento de temperatura medido semi-adiabáticamente podría contener un error de más de 12°C. No obstante, la aplicación del método permite predecir la temperatura máxima adiabática, a partir de la semi-adiabática reduciendo el error a valores menores que 1,3°C (Ng, Ng y Kwan, 2008). Su aplicación se encuentra recomendada para un rango de temperaturas máximas comprendidas entre 70°C y 80°C, y un gradiente entre 20°C y 30°C.

El método se aplica principalmente en dos pasos, el primero es verificar si el equipo utilizado se comporta como un calorímetro semi-adiabático. La verificación se realiza mediante el cálculo de la característica de pérdida de calor (λ), cuyo valor debería encontrarse por debajo de $2,18 \times 10^{-6}$ 1/s. Una vez corroborada la característica de pérdida de calor (λ), se calcula el calor de hidratación del hormigón mediante el producto de la temperatura adiabática calculada, la capacidad calorífica del hormigón dividido su contenido máximo de cemento (Ecuación 5.1) (Ng, Ng y Kwan, 2009).

$$H = \frac{\Delta T \times \psi}{C} \quad 5.1$$

Donde:

H es el calor de hidratación, expresado en kJ/kg

ΔT es la variación de temperatura adiabática, expresado en °C

ψ es la capacidad calorífica del hormigón, expresado en $\text{kJ/m}^3/^\circ\text{C}$

C es la dosificación de aglomerantes, expresado en kg/m^3

De Larrand (De Larrard, 1999), sugiere calcular la capacidad calorífica del hormigón como la suma de la de sus componentes (Ecuación 5.2), asumiendo para ello valores teóricos específicos de $4,19 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$ para el agua, $0,86 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$ para el cemento y $0,82 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$ para los agregados.

$$\psi = 4,19 \times W + 0,86 \times C + 0,82 \times A \quad 5.2$$

Donde:

ψ es la capacidad calorífica del hormigón, expresado en $\text{kJ/m}^3/^\circ\text{C}$

W es la dosificación de agua, expresado en kg/m^3

C es la dosificación de aglomerantes, expresado en kg/m^3

A es la dosificación de agregados, expresado en kg/m^3

A partir de una campaña experimental, los autores (Ng, Ng y Kwan, 2008) determinaron un método que permite verificar si el equipo implementado como calorímetro semi-adiabático es adecuado, pudiendo a partir de sus resultados compensar la pérdida de calor y estimar la temperatura adiabática de una muestra de hormigón. El método de verificación del calorímetro semi-adiabático consiste en determinar la característica de pérdida de calor del equipo de prueba (λ), si el valor obtenido es menor al estipulado por los autores, el equipo puede ser aplicado, en caso contrario es recomendable mejorar la aislación.

Dado una muestra de hormigón de volumen (V), se considera que el aumento de temperatura medido en el hormigón ($T_V - T_P$) es menor a la temperatura real del hormigón (en condiciones adiabáticas (T_G)) debido a la disipación de calor, cuya relación se encuentra presente en la Ecuación 5.3.

$$(T_V - T_P) = T_G - \frac{H_L}{V\rho c} \quad 5.3$$

Donde:

T_V : la temperatura media medida en el hormigón mediante el equipo “semi – adiabático”, expresada en $^\circ\text{C}$

T_P : la temperatura del hormigón al colocarlo, expresada en $^\circ\text{C}$

T_G : la temperatura real del hormigón si se midiera mediante un equipo adiabático, expresada en $^\circ\text{C}$

H_L : cantidad proporcional a la pérdida de calor, expresada en $\text{kJ/}^\circ\text{C}$

V : el volumen de la muestra, expresado en m^3

ρ : la densidad del hormigón colocado, expresada en kg/m^3

c : el calor específico, expresado en $kJ/kg/^\circ C$

Entonces, a partir de la Ecuación 5.3 se despeja y se calcula la temperatura real del hormigón (temperatura objetivo a determinar), como se muestra en la Ecuación 5.4.

$$T_G = (T_V - T_P) + \frac{H_L}{V\rho c} \quad 5.4$$

Aplicando la ecuación de Fourier a la conducción de calor a través de los materiales aislantes, se puede determinar la tasa de pérdida de calor a partir de la Ecuación 5.5.

$$\frac{\partial H_L}{\partial t} = k \times (t_S - t_A) \quad 5.5$$

Donde:

H_L : cantidad proporcional a la pérdida de calor, expresada en $kJ/^\circ C$

t : el tiempo de medida, expresado en horas

t_S : la temperatura media medida en la superficie del hormigón, expresada en $^\circ C$

t_A : la temperatura del medio, en el equipo utilizado será la temperatura ambiente, expresada en $^\circ C$

k : la conductividad térmica total de los materiales aislantes, expresada en $W(cm^{-1})(^\circ C^{-1})$

Entonces, integrando la Ecuación 5.5, es posible redefinir el valor de la temperatura real del hormigón (T_G) según la Ecuación 5.6.

$$T_G = (T_V - T_P) + \frac{k}{V\rho c} \int_0^t (T_S - T_A) dt \quad 5.6$$

Donde el coeficiente que multiplica la integral en la Ecuación 5.6 es lo que los autores definen como característica de pérdida de calor del equipo de prueba ($\lambda = \frac{k}{V\rho c}$).

En base a resultados de otras investigaciones, (RILEM, 1998) los autores del método consideran adecuado asumir que la diferencia de temperatura entre el hormigón y el medio se

mantiene constante, lo que implica que T_p sea constante, por lo que se anula su derivada en función del tiempo.

Entonces la variación de la temperatura del hormigón en el tiempo estará gobernada por la Ecuación 5.7.

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial T_V}{\partial t} + \lambda (T_S - T_A) \quad 5.7$$

Observar que para un tiempo suficientemente largo el aumento de temperatura del hormigón se vuelve insignificante, que basado en la experiencia de hidratación del hormigón resulta apropiado considerar un tiempo suficiente de 120 horas ($T_G \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow 120$ hs) (Ng, Ng y Kwan, 2008).

Entonces para tiempos mayores a 120 horas, la característica de pérdida de calor en tiempo puede definirse según la Ecuación 5.8.

$$\lambda = - \frac{\partial T_V / \partial t}{(T_S - T_A)} \quad 5.8$$

En la práctica es recomendable considerar tiempos de medición mayores a 144 horas (6 días) y realizar la verificación de λ para tres tiempos distintos entre 120 y 144 hs.

Conociendo la distribución de temperatura dentro de la muestra de hormigón, las temperaturas T_V y T_S pueden ser calculadas mediante las Ecuaciones 5.9 y 5.10.

$$T_V = \frac{1}{V} \int_V T(x, y, z) dV \quad 5.9$$

$$T_S = \frac{1}{A} \int_A T(x, y, z) dA \quad 5.10$$

Donde:

$T(x, y, z)$: es la temperatura en el punto (x, y, z) , expresada en °C

$\frac{1}{V} \int_V T(x, y, z) dV$: es la integral de la temperatura en el volumen de la muestra de hormigón, expresada en °C

$\frac{1}{A} \int_A T(x, y, z) dA$: es la integral de la temperatura en la superficie de la muestra de hormigón, expresada en °C

Si bien es posible realizar la experiencia mediante la medición de temperatura en uno o dos puntos de la muestra de hormigón, es importante considerar que a medida que disminuye la cantidad de puntos de medición, en algunas muestras aumenta el error obtenido, consecuencia

de la distribución de calor dentro del hormigón que no presenta un comportamiento uniforme. Lo recomendable es utilizar cuatro puntos de medición de temperatura y muestras cúbicas de hormigón que permitan considerar que el mismo se comportará similar a lo largo de los tres ejes, que partiendo de su geometría permite disminuir la cantidad considerada de puntos de medición.

Los cuatro puntos de medición estarían definidos en: el centro del cubo de hormigón, el centro de una de las caras, en el centro de una de las aristas de la cara ya seleccionada y en un vértice, para mejor comprensión en la Figura 5.1 se esquematizan los puntos mencionados, con sus temperaturas correspondientes T_m , T_f , T_e y T_c .

Donde:

T_m corresponde a la temperatura en el centro del cubo, con coordenadas (0,0,0)

T_f corresponde a la temperatura en el centro de la cara del cubo, con coordenadas (0,1,0)

T_e corresponde a la temperatura en el centro de la arista, con coordenadas (1,1,0)

T_c corresponde a la temperatura en el vértice, con coordenadas (1,1,1)

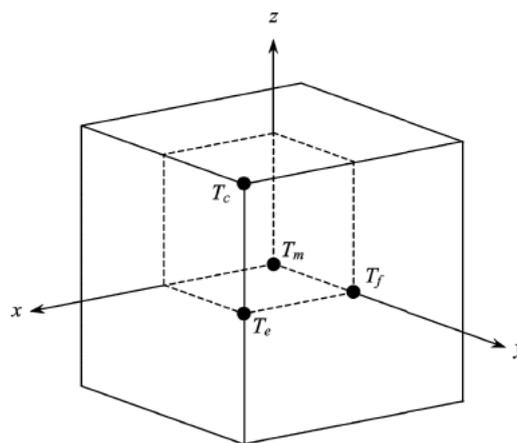


Figura 5.1. Cubo de muestra de hormigón, con ejes y ubicación de los sensores medidores de la temperatura.

Volviendo a la formulación de T_G , para determinar el valor de la temperatura real del hormigón resulta posible calcular la integral mediante su discretización en intervalos de tiempo, Ecuación 5.11.

$$T_G = (T_V - T_P) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n (T_S - T_A)_i \Delta t_i \right) \quad 5.11$$

Donde:

$(T_S - T_A)_i$ es la diferencia de temperatura para un paso de tiempo,

Δt_i es un intervalo de tiempo, expresado en horas.

n es el n° de pasos de tiempo

En la práctica, como la temperatura varía lentamente en el tiempo, un intervalo de 5 minutos se considera lo suficientemente pequeño como para asumir que los resultados obtenidos son valores bastante precisos.

Finalmente, $T(x, y, z)$ puede ser determinada mediante el ajuste de la curva por una función polinómica de sus coordenadas espaciales. Calculándose, T_V y T_S como funciones lineales de T_m, T_f, T_e y T_c .

Mediante el programa experimental realizado por los autores, partiendo de la normalización de las diferencias entre las temperaturas de:

- 1- El centro del cubo y el centro de la cara
- 2- El centro de la cara y el centro de la arista
- 3- El centro de la arista y el vértice

Para distintos tiempos, encontraron que los perfiles de temperatura podían aproximarse por funciones polinómicas de grado 4 con $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ y ω_4 coeficientes a determinar.

Entonces: $T(x, y, z) = \omega_1 + \omega_2 \cdot (x^4 + y^4 + z^4) + \omega_3 \cdot (x^4 y^4 + y^4 z^4 + x^4 z^4) + \omega_4 (x^4 y^4 z^4)$, considerando los 4 puntos de medición, a partir de sus coordenadas y sus temperaturas, se definen los coeficientes como:

$$T_m = T(0,0,0) = \omega_1 + \omega_2 \cdot (0) + \omega_3 \cdot (0) + \omega_4(0) \rightarrow \omega_1 = T_m$$

$$T_f = T(0,1,0) = \omega_1 + \omega_2 \cdot (1) + \omega_3 \cdot (0) + \omega_4(0) = T_m + \omega_2 \rightarrow \omega_2 = T_f - T_m$$

$$\begin{aligned} T_e = T(1,1,0) &= \omega_1 + \omega_2 \cdot (2) + \omega_3 \cdot (1) + \omega_4(0) = T_m + 2T_f - 2T_m + 2\omega_3 \rightarrow \omega_3 \\ &= T_e - 2T_f + T_m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_c = T(1,1,1) &= \omega_1 + \omega_2 \cdot (3) + \omega_3 \cdot (3) + \omega_4(1) = T_m + 3T_f - 3T_m + 3T_e - 6T_f + 3T_m \\ &\rightarrow \omega_4 = T_c - 3T_f + T_m + 3T_e \end{aligned}$$

Resultando:

$$\begin{aligned} T(x, y, z) &= T_m + (T_f - T_m) (x^4 + y^4 + z^4) + (T_e - 2T_f + T_m)(x^4 y^4 + y^4 z^4 + x^4 z^4) \\ &\quad + (T_c - 3T_f + T_m + 3T_e)(x^4 y^4 z^4) \end{aligned}$$

Sustituyendo la expresión final de $T(x, y, z)$ en las Ecuaciones 5.9 y 5.10 y resolviendo las integrales, para el método de los 4 puntos, se definen la temperatura media en el volumen de hormigón y en su cara como:

$$T_V = \left(\frac{64}{125}\right) \cdot T_m + \left(\frac{48}{125}\right) \cdot T_f + \left(\frac{12}{125}\right) \cdot T_e + \left(\frac{1}{125}\right) \cdot T_c$$

$$T_S = \left(\frac{16}{25}\right) \cdot T_f + \left(\frac{8}{25}\right) \cdot T_e + \left(\frac{1}{25}\right) \cdot T_c$$

Finalmente, tras la experiencia en donde evalúan el método para distintas mezclas, distintos tipos de aislación y distintos tamaños de las muestras de hormigón, los autores determinan que la compensación de pérdida de calor cuando se utilizan 4 puntos de medición de temperatura presenta errores mínimos, independientemente al tamaño de la muestra.

Cuanto menor sea el valor de λ obtenido, menor es la tasa de pérdida de calor y mayor la precisión de la temperatura estimada. Volviéndose crucial diseñar el equipo y método de prueba para un valor de λ menor a $2,18 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Observar que las temperaturas T_m , T_f , T_e y T_c son mediciones que se hacen en intervalos de 5 minutos, lo que significa que los valores T_V y T_S son funciones que varían en el tiempo. No olvidemos que, según la Ecuación 5.8, λ está definido como: $\lambda = -\frac{\partial T_V / \partial t}{(T_S - T_A)}$, en donde para su cálculo será necesario determinar su derivada. En este caso, se considera que la derivada de una suma es la suma de sus derivadas, en donde cada término de T_V puede aproximarse por una recta, por lo que el cálculo se reduce, simplemente, a la suma de derivadas de funciones lineales, cuyo resultado será la pendiente que gobierne la función para cada uno de los 4 puntos de medición. Entonces, una vez diseñado el equipo y evaluado el valor de λ , la temperatura real del hormigón puede calcularse mediante la Ecuación 5.11.

5.2. Metodología

Esta sección presenta las metodologías implementadas en la prueba a escala industrial y en los ajustes posteriores realizados en laboratorio.

5.2.1. Prueba a escala industrial

La prueba a escala industrial consistió en corroborar la viabilidad de la dosificación P17, determinada en el capítulo 4, para ser producida industrialmente. Previo a la carga del camión se corroboró que el mixer no contuviera agua dentro del trompo. Se determinaron las humedades de los agregados y se realizó un muestreo para posteriormente tener un registro de las granulometrías de los materiales utilizados.

Considerando que durante el lavado del trompo (luego de la carga) los choferes suelen adicionar agua a la mezcla, para evitar un exceso de agua que pudiera alterar las propiedades del hormigón, se ajustó el agua de amasado de la fórmula original al cargar la dosificación al sistema. La Tabla 5.1 muestra la dosificación obtenida en el Capítulo 4 (P17) junto a la dosificación cargada en el sistema de la **planta mezcladora** y las incorporaciones que se realizaron manualmente a pie de camión.

Tabla 5.1. Dosificación cargada en el sistema de la planta.

Dosificación	Dosificación adoptada en laboratorio (P17)	Dosificación cargada al sistema de la planta	Dosificación cargada a pie de camión
Cemento (kg/m ³)	654	654	-
AF (kg/m ³)	231	231	-
AG (kg/m ³)	518	518	-
PP 5-14 (kg/m ³)	800	800	-
Agua (kg/m ³)	170	155	15
Aditivo Plasificante (P)	4,58 (0,7%)	4,58 (0,7%)	-
Tiempo de colocación (minutos)	0	0	-
Aditivo inhibidor de hidratación (IH)	1,96 (0,3%)	-	1,96 (0,3%)
Tiempo de colocación (minutos)	10	-	10
Aditivo Superplasificante (SP)	3,60 (0,55%)	-	3,60 (0,55%)
Tiempo de colocación (minutos)	50	-	50

Se cargaron 3 m³ de hormigón, en 3 ciclos de 1 m³ cada uno, de la dosificación que presenta la Tabla 5.1. La carga se realizó mediante la planta mezcladora, es decir, la planta se encarga de realizar la mezcla de hormigón y luego lo vierte dentro del mixer. La hora de finalización de la carga fue considerada como hora inicial de la prueba (Tiempo cero). Del agua de amasado de la fórmula original se reservaron 15 l/m³ (45 en total), de los cuales 35 litros se utilizaron para el lavado del trompo y 10 litros para la incorporación de los aditivos a pie de camión.

Los aditivos mencionados en la dosificación de la Tabla 5.1 siguieron la secuencia de colocación indicada en el Capítulo 4, el P fue incorporado por la planta durante la carga, el IH se incorporó a pie de camión luego de finalizada la carga (aproximadamente a los 10 minutos del inicio) y el SP se colocó a los 50 minutos. La Tabla 5.2 presenta los tiempos de incorporación de los aditivos, del mezclado y del comienzo de los ensayos.

Tabla 5.2. Tiempos de incorporación de los aditivos, mezclados y comienzo de ensayos

Tarea	Tiempo desde la carga (min)	Tiempo de la tarea (min)
Final de carga del camión	0	-
Agregado de IH y agua de enjuague	10	5
Mezclado rápido	15	10
Agregado de SP y enjuague	50	5
Mezclado	55	5
Inicio de ensayos	60	

La incorporación de los aditivos a pie de camión, IH y SP, se realizó manualmente con ayuda de un caño de pvc para asegurar que el mismo sea introducido dentro de la masa de hormigón. Una vez incorporado el aditivo IH, se realizó un mezclado rápido durante 10 minutos y luego se disminuyó la velocidad de mezclado del mixer (similar a la velocidad del mezclado del mixer cuando se transporta) y se mantuvo hasta los 50 minutos, esto se hizo para simular el tiempo de transporte del hormigón a la obra. A los 50 minutos se incorporó el aditivo SP, se realizó un mezclado rápido hasta los 60 minutos, y se comenzó con las pruebas de caracterización y bombeado, cuya frecuencia se presenta en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Cronograma de pruebas – Escala Industrial

Tiempo → Ensayo ↓	Desde la carga (min) *	1h			2h		
		60	80	100	120	140	160
		T0	T20	T40	T60	T80	T100
Cono de flujo		x	x	x	x	x	x
Reología		x	x	x	x	x	x
Densidad y Contenido de aire		x				x	
Prueba de Bombeo			x		x		x
Moldeado completo					x		

* Nomenclatura considerada en la presentación de resultados

Se caracterizaron las propiedades en estado fresco del hormigón, analizando la trabajabilidad y la reología mediante los siguientes ensayos: cono de flujo (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)), densidad y contenido de aire (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)). Para evaluar directamente la viscosidad del hormigón se utilizó un reómetro (ICAR Rheometer).

En estado endurecido se caracterizaron la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la absorción por sumersión. La resistencia a la compresión se determinó como promedio de 3 probetas cilíndricas de 10x20 cm ensayadas a los 1, 3, 7, 28 y 56 días (UNIT-ISO 1920-4:2020 (UNIT, 2020)), realizadas en moldes metálicos. El módulo elástico se obtuvo a los 28 días de edad en probetas cilíndricas de 15x30 cm (UNIT-ISO 1920-10:2010 (UNIT, 2010)). La absorción por sumersión se determinó mediante el procedimiento establecido en el manual DURAR (CYTED, 2002) como promedio de 3 probetas cilíndricas de 7,5 x 15 cm. El moldeado y compactación de las probetas se realizó siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-3:2019 (UNIT, 2019).

5.2.2. Ajustes posteriores – Mezcla final

A raíz de los resultados obtenidos durante la escala industrial, se ajusta la dosis del aditivo IH (inhibidor de hidratación), se realiza la caracterización completa de la mezcla y se evalúa la temperatura máxima alcanzada por el hormigón en condiciones semi-adiabáticas.

La Figura 5.2 muestra el calorímetro utilizado, en el cual se coloca una muestra cúbica de hormigón de 40 cm dentro de un cubo fenólico, aislado térmicamente mediante capas de espuma de poliestireno expandido de 20 cm de espesor. Para contrarrestar el empuje del hormigón, las paredes fenólicas del cubo se sujetan firmemente con cintas de sujeción o

"catracas". El cubo fenólico está revestido exteriormente con placas adicionales de espuma de poliestireno expandido de 20 cm de espesor y protegido por un recubrimiento de aluminio.

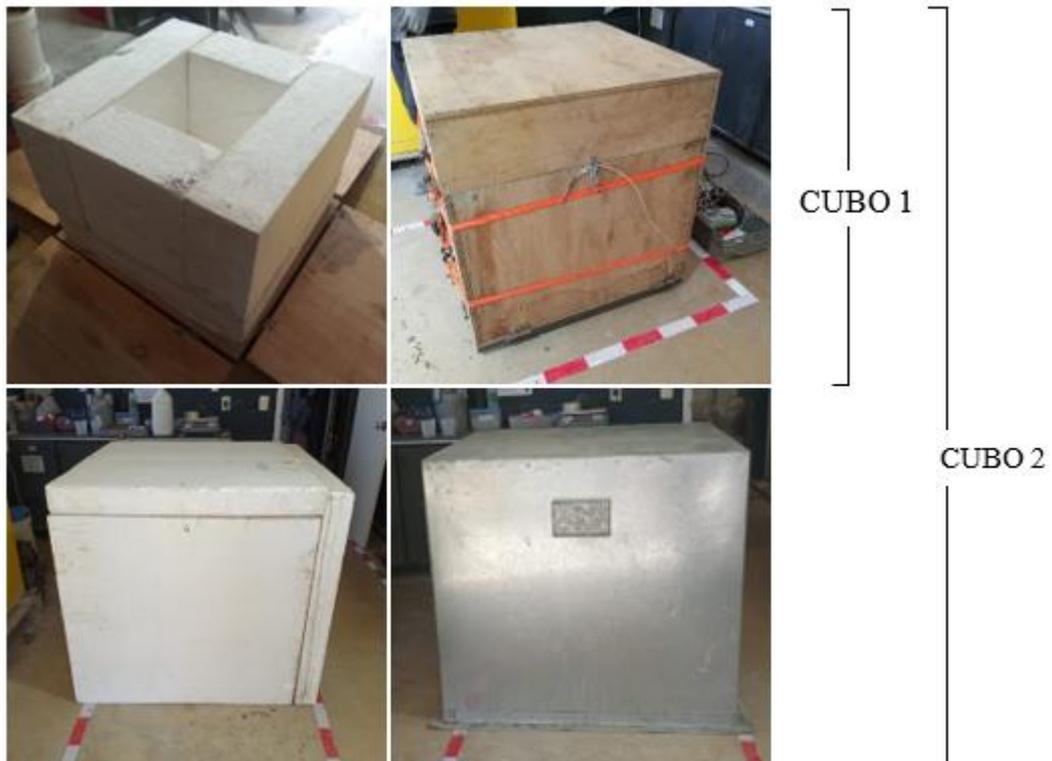
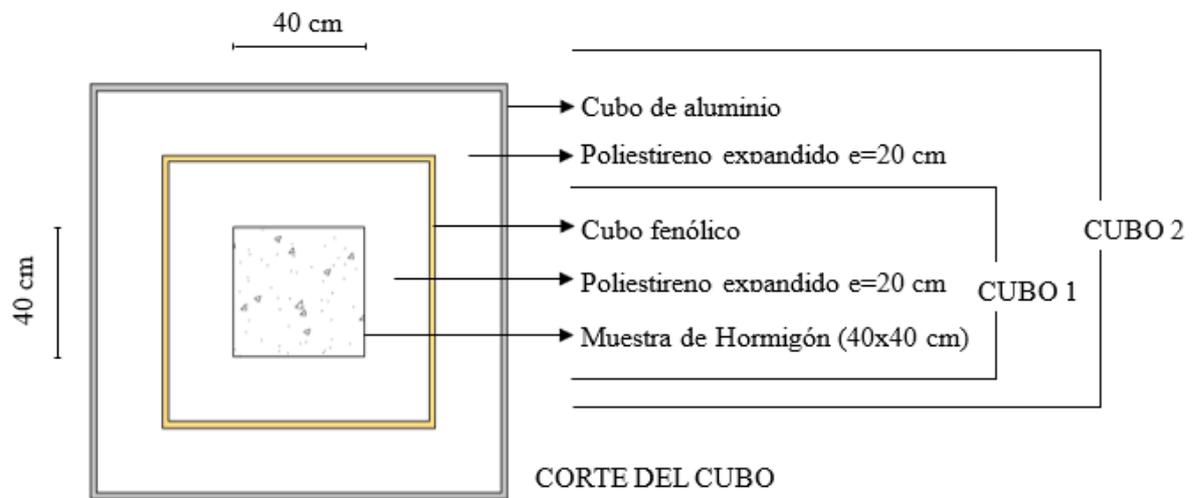


Figura 5.2. Calorímetro utilizado

5.2.2.1. Ajustes de aditivo inhibidor de hidratación

El ajuste de aditivo IH se realizó mediante el análisis de la pérdida de fluidez en el tiempo, la evolución de temperatura de hidratación del hormigón y la resistencia a la compresión (evaluando las condiciones de desmolde). Se elaboraron en laboratorio cuatro mezclas variando la dosis de aditivo IH, 0,0%, 0,1%, 0,2% y 0,3%. Para cada una de ellas, la secuencia de colocación de los aditivos se mantuvo según lo mencionado en los capítulos anteriores. Es

decir, el aditivo P se colocó al inicio de la mezcla, el aditivo IH se colocó a los 10 minutos y el aditivo SP se colocó a los 50 minutos. A los 45 minutos (previo a la colocación del aditivo SP) se midió el asentamiento mediante el cono de Abrams y a partir de los 60 minutos se comenzó a evaluar, cada 30 minutos y durante un rango de tiempo de una hora y media, el explayamiento con el cono de flujo.

La evolución de temperatura del hormigón se evaluó mediante el CUBO 1 del calorímetro presentado en la Figura 5.2. Procurando simplificar el volumen de hormigón y la prueba realizada, se utilizaron dos recipientes cilíndricos de espuma de poliestireno expandido, de 2 litros de capacidad, colocados diagonalmente dentro del calorímetro, separados por espuma de poliestileno expandido y envueltos en lana de roca, como se muestra en la Figura 5.3. Si bien el método utilizado no asegura las condiciones adiabáticas, a modo de comparación entre las mezclas analizadas se consideró suficiente. El moldeo de las probetas para la medición de temperatura se realizó siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-3:2019 y las mismas fueron elaboradas a los 60 minutos de comenzado el pastón (10 minutos desde el agregado del aditivo SP).

Con la finalidad de evaluar el desmolde a un día y posteriormente la evolución de la resistencia a la compresión se moldearon probetas cilíndricas de 10x20 cm, a ensayarse a 1, 7, 28 y 56 días.



Figura 5.3. Recipientes envueltos en lana de roca, separados por espuma de poliestireno y colocados dentro del “calorímetro”

5.2.2.2. Caracterización completa y estudio de temperatura

Se repitió la caracterización completa detallada en el Capítulo 4, con la salvedad de que se agregó un ensayo en estado endurecido (permeabilidad al aire). En estado fresco se evaluó la fluidez mediante el ensayo de cono de flujo (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)), la

densidad (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)), el contenido de aire (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)) y la reología del hormigón con un reómetro (ICAR Rheometer).

La evolución de temperatura de hidratación del hormigón se midió mediante el CUBO 2 del calorímetro presentado en la Figura 5.2 y se aplicó el método semi-adiabático detallado en la sección 5.1.1.1 (Ng, Ng y Kwan, 2008). La muestra de hormigón fue de 64 litros (un cubo de 40 cm de lado). La medición de temperatura se realizó mediante 8 termocuplas conectadas a un datalogger, que registraron medidas cada 5 minutos durante un total de 7 días. De las 8 termocuplas, 4 se colocaron dentro de la muestra de hormigón y 4 en la cámara intermedia (entre el fenólico y la aislación externa). Los puntos seleccionados dentro de la muestra fueron los mencionados por los autores del método (Ng, Ng y Kwan, 2008), “centro del cubo”, “punto medio de una cara”, “punto medio de una arista” y en el “vértice”. De manera de prevenir posibles cortes de electricidad, el sistema fue conectado a una UPS.

En estado endurecido se evaluaron la resistencia a la compresión (UNIT-ISO 1920-4:2020 (UNIT, 2020)), el módulo elástico (UNIT-ISO 1920-10:2010 (UNIT, 2010)) y la absorción de agua por sumersión (procedimiento del manual DURAR (CYTED, 2002)). Adicionalmente se moldearon 3 probetas prismáticas de 12x20 cm para determinar el coeficiente de permeabilidad al aire mediante el método de TORRENT (IRAM 1892 (IRAM, 2022))

El “Método Torrent” es un ensayo no destructivo utilizado para medir la permeabilidad al aire del hormigón, tanto en laboratorio como en condiciones in situ. Este método se emplea principalmente para evaluar la calidad del recubrimiento de las estructuras de hormigón (Ebensperger y Torrent, 2010).

El equipo consta de una celda de doble cámara (una interna y otra externa) y un regulador de presión con membrana, que mantiene las presiones de ambas cámaras iguales durante el ensayo. Para realizar la prueba, se utiliza una bomba que crea vacío dentro de las cámaras. Esto asegura que cualquier exceso de aire que ingrese lateralmente a través de la cámara externa sea evacuado, logrando así un flujo de aire unidireccional. De esta manera, el flujo medido está influido únicamente por la permeabilidad superficial del hormigón, sin interferencias de aire exterior (Ebensperger y Torrent, 2010).

El ensayo finaliza cuando la presión de la cámara interna alcanza los 20 mbar, o, en el caso de hormigones muy impermeables, después de transcurridos 360 segundos. Dependiendo de la calidad del hormigón, la duración del ensayo puede variar entre 2 y 12 minutos. Como resultado, se determina el coeficiente de permeabilidad al aire, un parámetro clave para evaluar la durabilidad del hormigón frente a agentes agresivos (Ebensperger y Torrent, 2010).

5.3. Presentación y análisis de resultados

En esta sección se representan los resultados obtenidos durante la prueba a escala industrial y los ajustes realizados posteriormente.

5.3.1. Prueba a escala industrial

La Tabla 5.4 presenta las humedades de los agregados, junto a su absorción potencial y la Figura 5.4 muestra la curva de compacidad obtenida, correspondiente a un IDE de 0,86.

Tabla 5.4. Humedad de los agregados utilizados en la prueba a escala industrial

Agregado	Absorción (%)	Humedad (%)
Arena Fina	0,70	4.3
Arena Gruesa	0,50	3.6
PP 5-14	0,33	1.7

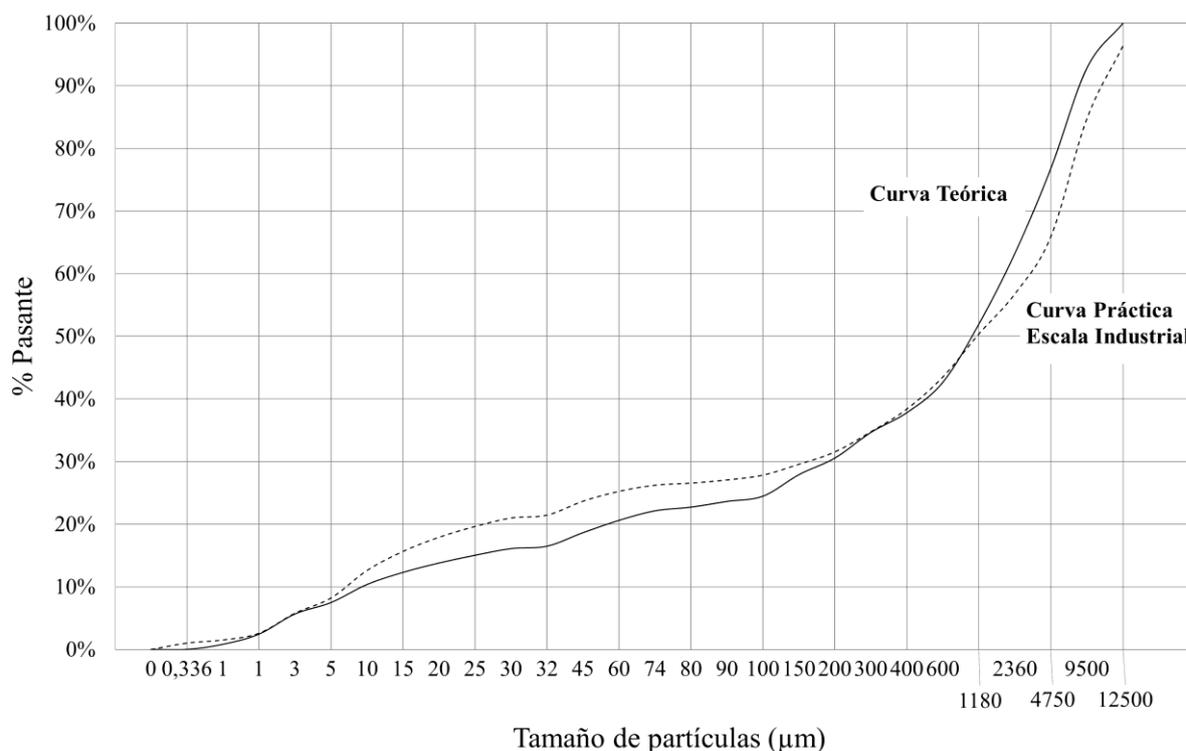


Figura 5.4. Curva de compacidad obtenida de los materiales utilizados en la prueba a escala industrial

Debido al agua reservada para el lavado del camión y la incorporación de aditivos, el agua de amasado no fue suficiente para que la planta alcanzara una mezcla trabajable. Sin embargo, la falta de cohesión terminó facilitando el cargado del mixer, evitando el atascamiento de material en el embudo del camión o la tolva de la planta. La Figura 5.5 detalla la carga real registrada por la planta, donde es posible observar variaciones en la dosificación.

Producto	Descripcion	Objet	Dosif	Real	Varianza
A02	ARENA FINA	690.00 kg	719.00 kg	945.00 kg	226.00 31.43
AD32	VISCOCRET ARTIGA	13.68 kg	13.80 kg	13.84 kg	.04 0.29
AGUA	AGUA	462.60 L	336.00 L	339.00 L	3.00 0.89
B09	PIEDR PARTI 5/14	2388.00 kg	2429.00 kg	2419.00 kg	10.00- -0.41
I35	CEMENTO ARTIGAS	1953.00 kg	1953.00 kg	1943.00 kg	10.00- -0.51
A01	ARENA GRUESA	1548.00 kg	1604.00 kg	1383.00 kg	221.00- -13.78

Figura 5.5. Reporte de carga realizada por la planta mezcladora.

En los 3 m³ la planta cargó 226 kg extras de Arena Fina, 221 kg menos de arena gruesa, 3 litros más de agua, 10 kilos menos de cemento y 10 kilos menos del PP 5/14.

Analizando el agua de partida y en función de las humedades vemos qué:

- Al agregar 226 kg más de AF, se están agregando aproximadamente 8,6 litros adicionales de agua.
- Al agregar 221 kg menos de AG, se están quitando aproximadamente 7,96 litros de agua.
- Al agregar 10 kg menos del PP 5-14, se están quitando aproximadamente 0,17 litros de agua.
- La planta colocó 3 litros más de agua

Se adicionaron un total de 3,47 litros de agua extras correspondientes a 1,16 l/m³. Considerando la sensibilidad de la resistencia y la fluidez en hormigones de alta resistencia, es importante destacar que no se colocaron 1,16 l/m³ extras de agua, sino además 3,3 kg menos de cemento. Lo que implicó una dosificación de 171,16 l/m³ de agua, 647,7 kg/m³ de cemento y una rel a/c (inalterada) de 0,26.

Durante el tiempo de simulación de transporte del hormigón no se percató un movimiento excesivo del camión debido el mezclado, indicando que el hormigón no sólo podía elaborarse a gran escala, sino además transportarse a obra. A los 60 minutos se realizó el primer muestreo de hormigón, en el que se observó que la mezcla presentó mayor fluidez y menor cohesión que la obtenida en el laboratorio, mostrando algo de segregación que se estabilizó luego de 20 minutos.

5.3.1.1. Bombeo

Se realizaron dos pruebas de bombeo, una a los 20 minutos del adición del aditivo superplastificante SP y otra a los 100 minutos (1 hora y 40 minutos). Si bien se planificó una prueba intermedia, a los 60 minutos, por experiencia del personal de la empresa no se consideró necesario. Como muestra la Figura 5.6 la prueba consistió en bombear el hormigón desde el mixer que contenía la mezcla (M1) a un mixer auxiliar (M2).

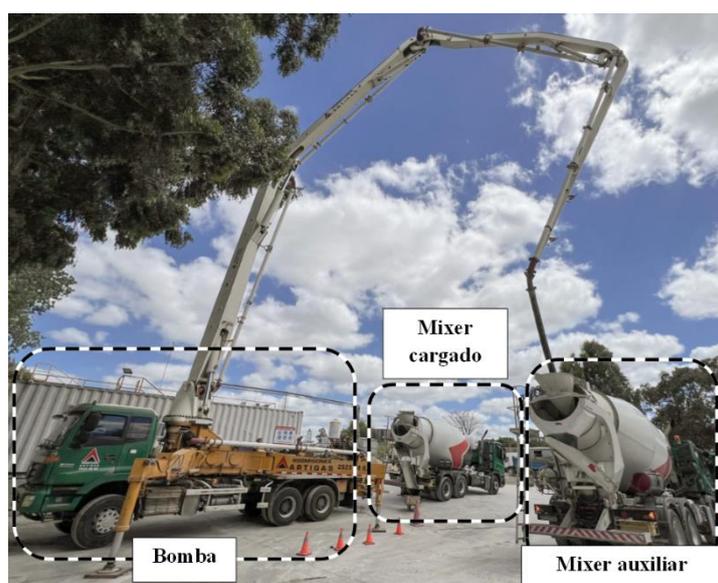


Figura 5.6. Prueba de bombeo

La primera prueba (a los 20 minutos) se realizó con éxito, levantando (la bomba) una presión de 5,5 bar. Sin embargo, el bombista observó el hormigón muy fluido y por experiencia le preocupó que la mezcla comenzara a exudar y segregar, asentándose en el mezclador del equipo. A los 60 minutos del inicio de las pruebas, el bombista y sus auxiliares vieron el hormigón en forma adecuada e informaron que no era necesario realizar la prueba, estando seguro de que la mezcla aún se encontraba “claramente” bombeable. A los 140 minutos el personal informó que el hormigón aún mantenía un aspecto adecuado. A los 160 minutos se realizó otra prueba de bombeo, constatándose una presión de la bomba dentro de valores más habituales de 69 bar (según el personal generalmente la presión se encuentra entre 60 y 120 bar aproximadamente), y observándose una mezcla aún en buen estado para ser bombeada.

La dosificación diseñada no sólo permitió su bombeo, sino que lo mantuvo al cabo de 2 horas y 40 minutos desde su carga, donde la primera hora fue considerada para simular su transporte. Permitiendo finalmente una ventana mínima de trabajo de 1 hora y 40 minutos para su colocación. Sin embargo, no se conoce el tiempo máximo de trabajabilidad del hormigón debido principalmente a que los 3 m³ no fueron suficientes para las pruebas indicadas, implicando su finalización a las 2 horas y 40 minutos desde la carga del mixer.

5.3.1.2. Caracterización Completa

La caracterización completa consistió en el análisis de las propiedades en estado fresco y en estado endurecido del hormigón, buscando a partir de la misma corroborar que a escala industrial se obtenga un hormigón de alto desempeño, con resultados similares a los observados en laboratorio.

A. Estado Fresco

En estado fresco no sólo se procuró estudiar las propiedades sino además su comportamiento en el tiempo. Se analizaron la fluidez, la densidad, el contenido de aire y la viscosidad plástica del hormigón.

1) Fluidez del hormigón

La fluidez del hormigón se determinó mediante el ensayo de cono invertido (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)), la Figura 5.7 muestra algunos de los explayamientos obtenidos y la Figura 5.8 presenta los resultados respecto al ensayo de cono invertido realizado durante la prueba a escala industrial junto a los resultados obtenidos en el laboratorio.



Figura 5.7. Ensayo de cono invertido

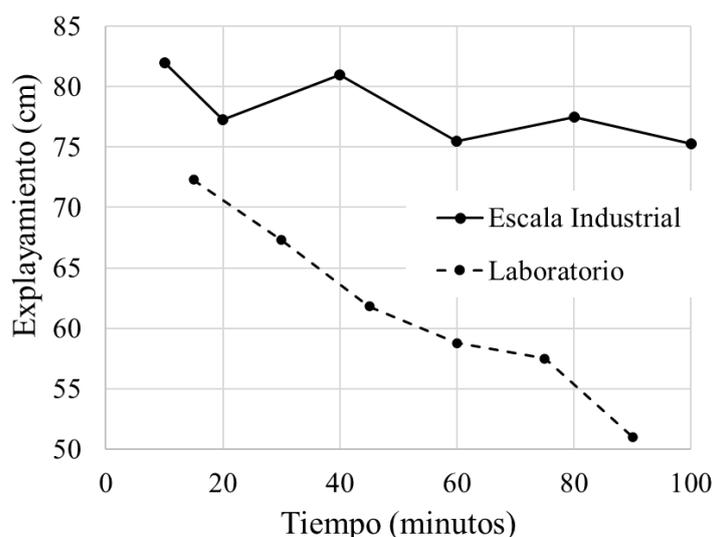


Figura 5.8. Resultados del ensayo de fluidez de la escala industrial y los obtenidos en laboratorio.

La fluidez determinada a escala industrial mostró una desviación máxima de 5.5 cm entre medidas consecutivas, consistente con la desviación calculada durante el estudio de repetibilidad de resultados (Capítulo 4). Se destaca una notable diferencia entre los resultados obtenidos a escala industrial y en laboratorio, en donde la mezcla realizada a escala industrial no solo presentó mayor fluidez, sino también una mayor variabilidad entre las mediciones de explayamiento realizadas, lo que dificultó identificar durante el período de tiempo analizado, una notoria pérdida de trabajabilidad, como sí ocurrió en laboratorio.

2) Densidad y contenido de aire

La densidad y el contenido de aire se midieron siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016). La Figura 5.9 muestra la evolución de la densidad y el contenido de aire obtenidos, junto con los resultados dados en laboratorio.

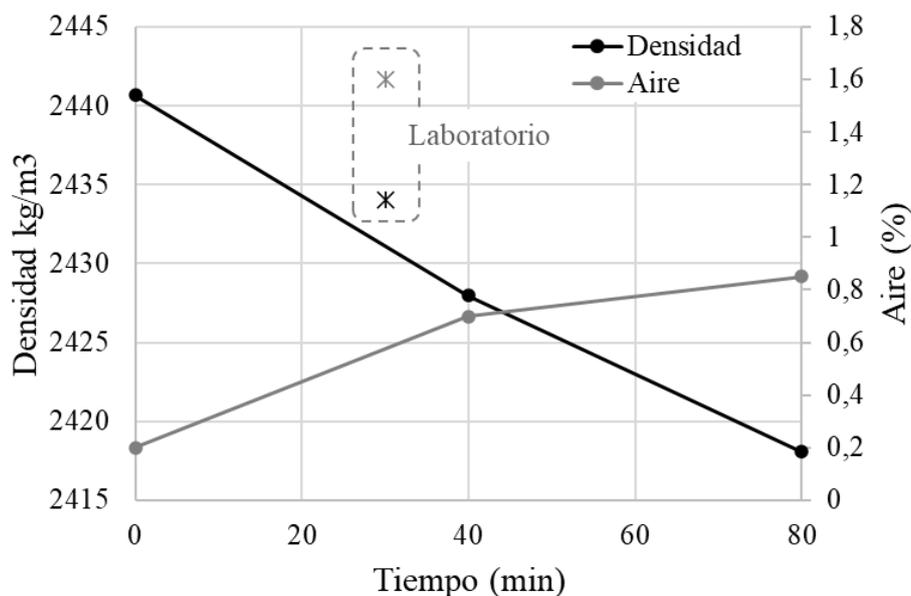


Figura 5.9. Resultados de densidad y aire

Aunque en la Figura 5.9 se observa la relación inversa esperada entre la densidad y el contenido de aire, destacan los bajos resultados en contenido de aire, que se desvían significativamente de los valores obtenidos en laboratorio. Se destaca que la diferencia entre los resultados de la caracterización de estado fresco en laboratorio y a escala industrial es consecuencia, principalmente, del cambio de volumen de hormigón y energía de mezclado debido al cambio de escala.

3) Reología

La Figura 5.10.a presenta las rectas de tensión de corte vs velocidad de corte para los distintos tiempos analizados y la Figura 5.10.b muestra, a modo de comparación, la fluidez del hormigón en el tiempo.

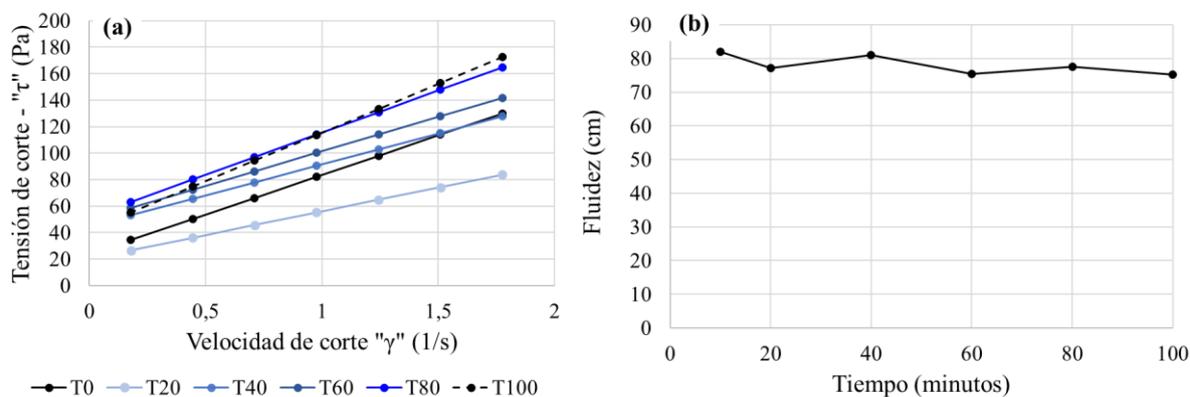


Figura 5.10. Resultados del comportamiento reológico del hormigón a escala industrial

La Figura 5.10 muestra un comportamiento inusual en los resultados de la reología del hormigón, evidenciando una alta viscosidad inicial a pesar de la excesiva fluidez y los indicios de segregación. A los 20 minutos, se observa una disminución en la viscosidad plástica, posiblemente influenciada por la segregación de la mezcla. Posteriormente, los resultados se estabilizan, con viscosidades similares y una tensión crítica que se mantiene casi constante entre los 40 y 100 minutos, lo que refleja una alta fluidez.

B. Estado Endurecido

Mediante la caracterización completa se analizaron la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la absorción de agua por sumersión. Todas las probetas fueron elaboradas como parte de la caracterización completa a los 40 minutos de iniciadas las pruebas de ensayo. El moldeado y compactación de las probetas se realizó siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-3:2019 (UNIT, 2019).

La Figura 5.11 muestra al cabo de 2 días el estado fresco del hormigón al desmoldar las probetas. El endurecimiento del hormigón se observó recién al siguiente día hábil, luego de las 48 horas, resultando ser a los 5 días de edad. Además del retraso del fraguado, una vez endurecido el hormigón, las probetas presentaron oquedades, fisuras, y en algunos casos indicios de segregación, como muestra la Figura 5.12. Sin embargo, no se encontró una correlación clara entre el fenómeno observado y el moldeo de probetas, ya que los defectos se observaron aleatoriamente.



Figura 5.11. Resultado del desmolde de probetas



Figura 5.12. Defectos y patologías observadas en probetas

1) Resistencia a la compresión

La Figura 5.13 muestra los resultados de resistencia media a la compresión, obtenida como promedio de 3 determinaciones, de la mezcla elaborada a escala industrial y los compara con el desempeño observado en laboratorio. Si bien se moldearon probetas para 1 y 3 días se constató que al cabo de dos días el hormigón aún no había comenzado su proceso de endurecimiento. Lo que implicó que la primera rotura se realizara el siguiente día hábil, a los 5 días de edad, obteniéndose valores de 58,4 MPa.

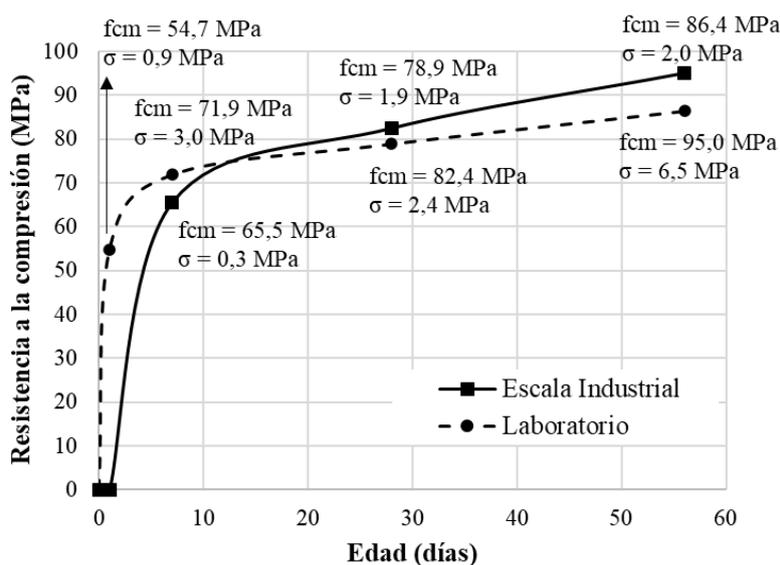


Figura 5.13. Resistencia media a la compresión, escala industrial vs laboratorio, f_{cm} : Promedio de tres determinaciones, σ : desviación estándar

En la Figura 5.13 se observa un comportamiento similar entre los resultados obtenidos en laboratorio y a escala industrial, logrando valores de resistencia a los 28 días de 79 MPa y 83 MPa, respectivamente. A escala industrial se registra una mayor ganancia de resistencia a los 56 días.

2) Módulo Elástico

El módulo elástico se obtuvo a los 28 días de edad en probetas cilíndricas de 15x30 cm, siguiendo los lineamientos de la norma UNIT-ISO 1920-10:2010 (UNIT, 2010). Para determinar la tensión máxima de ensayo se consideró el promedio de todas las probetas ensayadas a los 28 días de edad y se aplicó el factor determinado por la UNIT 1050:2005 (UNIT, 2005) que correlaciona probetas cilíndricas de 10x20 cm con probetas cilíndricas 15x30 cm (0,97). El valor de módulo elástico obtenido, para la escala industrial, fue de 38,7 GPa, similar al obtenido en laboratorio y concordante con los valores de módulo elástico de investigaciones nacionales e internacionales presentados en el Capítulo 4.

3) Absorción por sumersión

La porosidad se determinó como medida indirecta de la absorción, siguiendo el procedimiento mencionado en el manual DURAR (CYTED, 2002). Las probetas se sumergieron en agua hasta alcanzar la absorción potencial (hasta peso constante), se determinó su peso sumergido y luego fueron secadas en horno hasta peso constante. La Tabla 5.5 presenta los resultados obtenidos y la Figura 5.14 los compara con valores encontrados en la bibliografía (Fallah y Nematzadeh, 2017).

Tabla 5.5. Resultados de porosidad y absorción de agua

	M1	M2	M3	Promedio
Masa saturada (g)	1561,5	1551,4	1563,9	
Masa sumergida (g)	919,2	913,2	920,6	
Masa seca (g)	1509,5	1500,5	1513,0	
Porosidad (%)	8,1	8,0	7,9	8,0
Absorción (%)	3,44	3,39	3,36	3,4

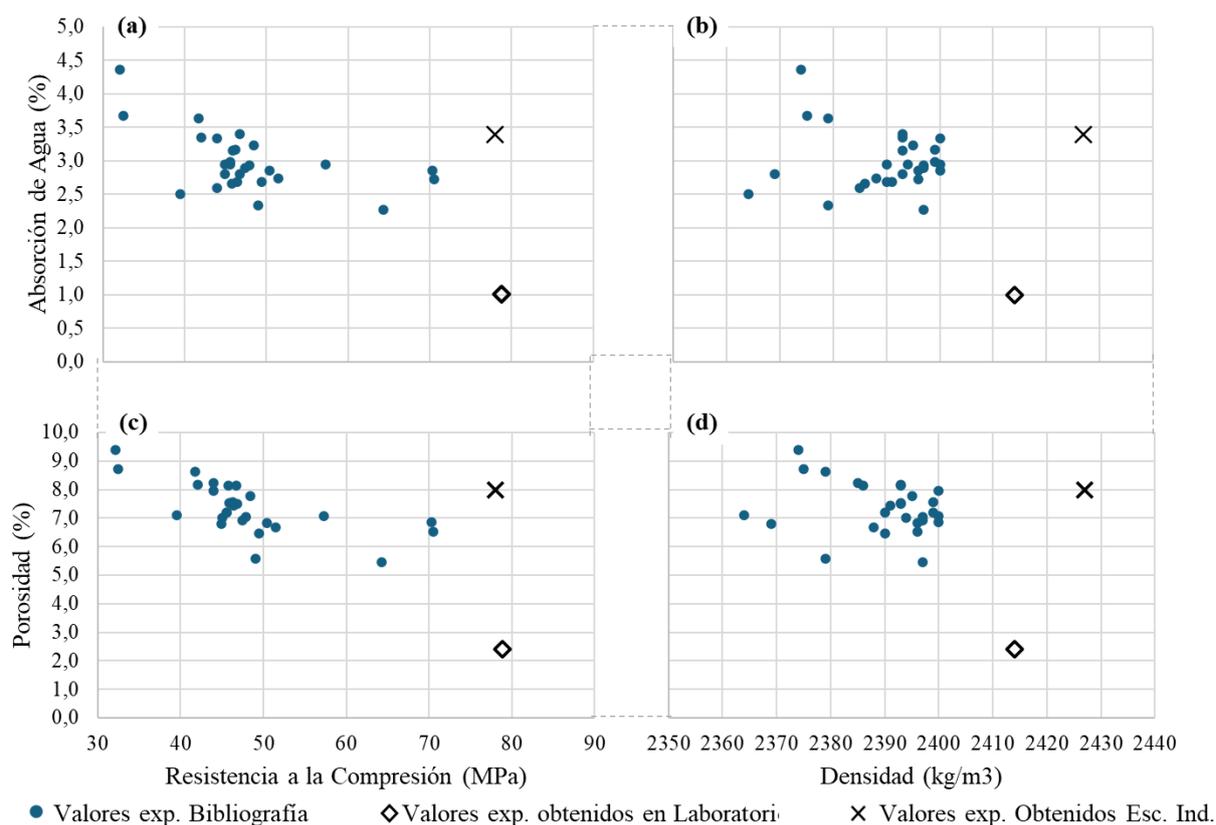


Figura 5.14. Valores experimentales Internacionales de Absorción y Porosidad en comparación con los resultados obtenidos en laboratorio y en Escala Industrial (Fallah y Nematzadeh, 2017), (a): Absorción de agua vs. Resistencia a la compresión, (b): Absorción de agua vs. Densidad, (c): Porosidad vs. Resistencia a la compresión, (d): Porosidad vs. Densidad.

En la Figura 5.14 se aprecia un aumento significativo de la absorción de agua y la porosidad del hormigón, principalmente en comparación con las obtenidas en laboratorio. Los resultados para escala industrial se encuentran dentro de los rangos establecidos por la bibliografía consultada (Fallah y Nematzadeh, 2017), (Wang et al., 2014), para hormigones de menor desempeño.

5.3.2. Ajustes posteriores

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la metodología implementada para ajustar el aditivo IH y la caracterización de la mezcla finalmente seleccionada y elaborada.

5.3.2.1. Ajustes de aditivo inhibidor de hidratación

La dosis de aditivo seleccionada fue aquella que aseguró, en base a la experiencia técnica de la empresa, que la mezcla obtenida en laboratorio es considerada adecuada para implementar a escala industrial, en particular, respecto a ser bombeable. Adicionalmente se verificó el inicio de fraguado previo a las 24 hs mediante el estudio de temperatura, corroborado por el desmolde de las probetas a un día.

Se elaboraron cuatro pastones de 70 litros cada uno, con distintas dosis de aditivo inhibidor de hidratación (IH) (0% (P19) - 0,1% (P20) - 0,2% (P21) y 0,3% (P22)), cuyas dosificaciones e indicadores se presentan en las Tablas 5.6 y 5.7 respectivamente.

Tabla 5.6. Dosificación pastones ajuste de aditivo para dosificación final

Dosificación (kg/m ³)	P19 (0,0%)	P20 (0,1%)	P21 (0,2%)	P22 (0,3%)
Cemento	654	654	654	654
Filler	0	0	0	0
Arena Fina	231	231	231	231
Arena Gruesa	518	518	518	518
PP 5-14	800	800	800	800
Agua	170	170	170	170
Aditivo Plasificante (kg/m³) 0,70%	4,58	4,58	4,58	4,58
Tiempo de colocación (minutos)	0	0	0	0
Aditivo inhibidor de hidratación (kg/m³)	0	0,65	1,23	1,96
Dosis de aditivo (%)	0,0	0,1	0,2	0,3
Tiempo de colocación (minutos)	-	10	10	10
Aditivo Superplasificante (kg/m³) 0,55%	3,60	3,60	3,60	3,60
Tiempo de colocación (minutos)	60	60	60	60

Tabla 5.7. Indicadores pastones ajuste de aditivo para dosificación final

Indicadores/Pastones	P19 (0,0%)	P20 (0,1%)	P21 (0,2%)	P22 (0,3%)
Relación a/c	0,26	0,26	0,26	0,26
Relación a/finos*	0,26	0,26	0,26	0,26
Pasta (%)**	41	41	41	41
Agregados (%)	59	59	59	59
Agregado Fino (%)	29	29	29	29
Arena Fina (%)	9	9	9	9
Arena Gruesa (%)	20	20	20	20
Agregado Grueso (%)	31	31	31	31 </td
Cemento kg/m ³	654	654	654	654

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

La Figura 5.15 muestra la trabajabilidad obtenida en el tiempo, mediante ensayos de fluidez para los cuatro pastones elaborados. A partir de ella, se puede ver la pérdida de fluidez. Debido a la alta viscosidad plástica, no se consideró viable realizar la última medición de explayamiento en el pastón sin incorporación de aditivo IH (P19).

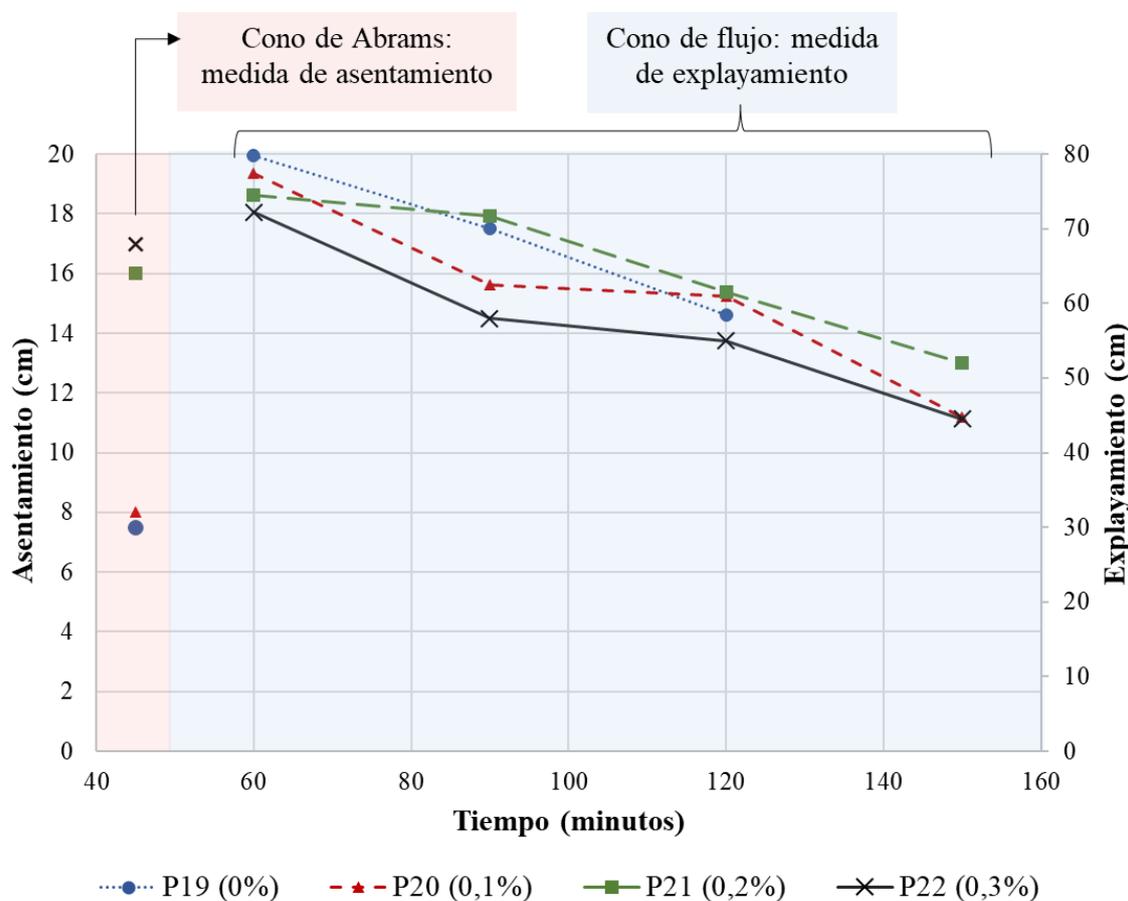


Figura 5.15. Pérdida de fluidez en el tiempo – Ajuste de aditivo inhibidor de hidratación

La Figura 5.15 muestra los resultados de fluidez, donde para los 60 minutos (10 minutos de incorporado el SP) el explayamiento aumentó con el incremento de dosis del IH. Sin embargo, a tiempos posteriores, los resultados no siguen un comportamiento claro. Obtener un asentamiento mayor previo a la incorporación del aditivo SP no aseguró posteriormente un mayor explayamiento. Si bien en términos de fluidez no se observa una tendencia, durante la experiencia se percató que a medida que aumenta la dosis del aditivo IH la mezcla disminuye la viscosidad plástica, logrando una mayor trabajabilidad.

La Figura 5.16 muestra la evolución de temperatura de hidratación de las mezclas elaboradas. Sin embargo, debido a un inconveniente técnico las mediciones del pastón P22 (0,3% de aditivo IH) se desconectaron previamente (a las 41 hs), sin finalizar el plazo de medición, notándose que hasta ese momento la hidratación del cemento no había comenzado.

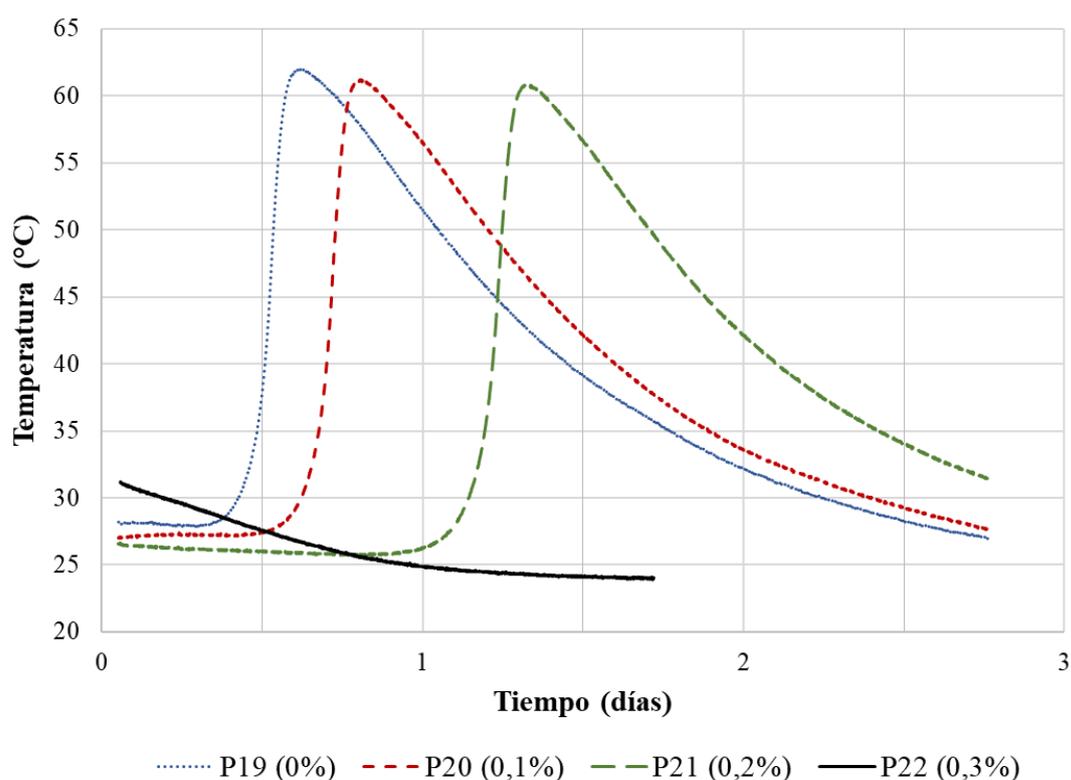


Figura 5.16. Evolución de temperatura con distinto porcentaje de aditivo IH

Adicionalmente, corroborando la evolución de temperatura se procuró realizar el desmolde de probetas a las 24 hs y en caso posible determinar su resistencia a la compresión. La Tabla 5.8 resume los resultados obtenidos para cada pastón y la Figura 5.17 muestra la evolución de la resistencia a la compresión.

Tabla 5.8. Resultados de desmolde a 24 horas con distintos porcentajes de aditivo IH

	P19 (0,0%)	P20 (0,1%)	P21 (0,2%)	P22 (0,3%)
T ₁ * (horas)	9	12	24	-**
Desmolde a 24 hs	Si	si	si	No
f _{cm,24 hs} (MPa)	53,2	55,6	10,2	0

*Tiempo estimado de inicio de liberación de calor desde el inicio del pastón.

** No se obtuvo el resultado por problemas técnicos.

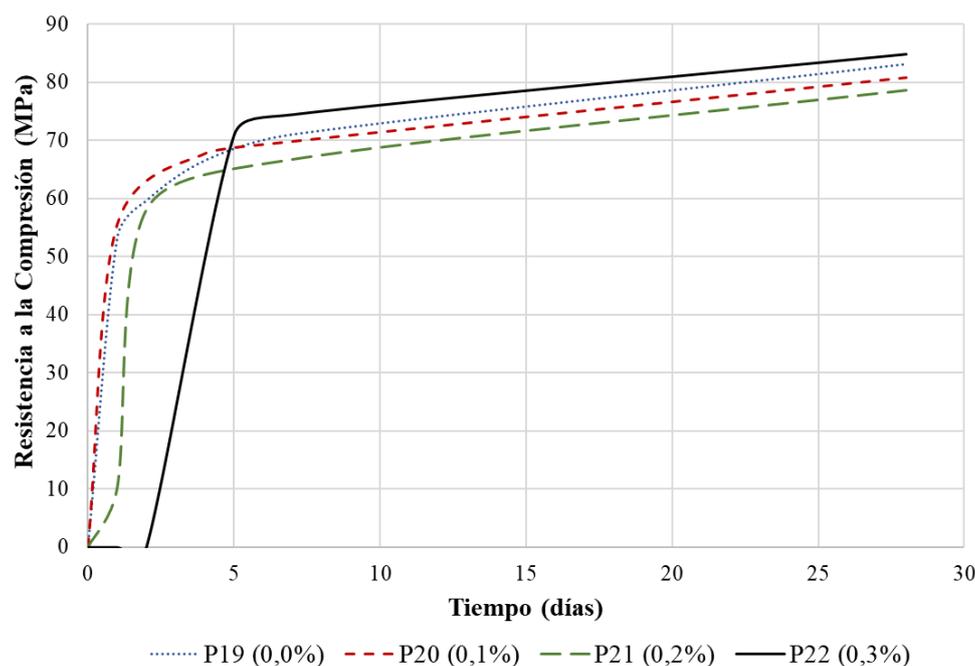


Figura 5.17. Evolución de la resistencia a la compresión con distintos porcentajes de aditivo IH.

Los resultados obtenidos indican que al incorporar una dosis de aditivo IH entre un 0% y un 0,2% es posible realizar el desmolde a las 24 horas. No obstante, en el caso del pastón P22 (0,3% IH), aunque el desmolde se realizó a las 48 horas se obtuvieron valores nulos de resistencia a la compresión. Según la Figura 5.16, a medida que aumenta la dosis de aditivo IH se retrasa el inicio de la liberación de calor.

Los pastones P19 (0,0% IH) y P20 (0,1% IH), mostraron resultados similares, detectándose un retraso del inicio de hidratación de 3 horas en el P20. Se observó que el efecto del aditivo aumenta al incrementar la dosis, mostrando un retraso adicional del tiempo de inicio de hidratación de 12 horas para el pastón P21 (0,2% IH) y un mínimo de 24 horas para el pastón P22 (0,3% IH). A los 28 días se obtuvieron resultados de resistencia a la compresión adecuados, con valores superiores a 70 MPa, en los cuatro pastones realizados.

A. Comentarios parciales

No se observó una relación clara entre la fluidez de las mezclas y el aumento del aditivo IH, aunque sí se notaron cambios significativos en la viscosidad plástica al manipular el hormigón.

Por ello, se considera necesaria la incorporación del aditivo IH para garantizar la trabajabilidad y facilitar el bombeo del hormigón. No obstante, su uso enlentece la reacción de hidratación del cemento, lo que retrasa tanto el inicio de la liberación de calor como el fraguado del hormigón, siendo este efecto más pronunciado a medida que se incrementa la dosis. De acuerdo con los resultados obtenidos y considerando que, a escala industrial, se observó un aumento significativo en la fluidez del hormigón al incrementar el volumen y la energía de mezclado, se considera viable la implementación de una dosis del 0,1% de aditivo IH.

5.3.2.2. Caracterización completa de la mezcla

Se realizó la caracterización completa del pastón P20, para ello se elaboró una mezcla de 70 litros. La incorporación de los aditivos siguió la secuencia trabajada hasta el momento, el aditivo P se incorporó al inicio, el IH a los 10 minutos y a los 50 minutos se adicionó el aditivo SP. A los 60 minutos, considerado como T0, se comenzó con las pruebas de ensayo.

A. Estado Fresco

En estado fresco se evaluó la pérdida de fluidez en el tiempo y la evolución de la viscosidad plástica, tomando medidas cada 30 minutos, desde T0 hasta T60 (120 minutos desde el inicio del pastón). A los 5 minutos previos a incorporar el aditivo SP, se determinó la fluidez del hormigón mediante el cono abrams (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)), brindando como resultado 3 cm. La pérdida de fluidez luego de la incorporación del aditivo SP se midió con el ensayo de cono de flujo (UNIT-ISO 1920-13:2018 (UNIT, 2018)). La densidad y el contenido de aire se midieron a los 30 minutos desde T0 (T30) (UNIT-ISO 1920-2:2016 (UNIT, 2016)).

La Figura 5.18 presenta los resultados del ensayo de fluidez del pastón P20 junto con los resultados de la dosificación objetivo para escala industrial (P16 – Lab. Obtenida en el Capítulo 4) y de la prueba a escala industrial (P16 - Esc. Ind.), cuyas únicas diferencias en término de dosificación en laboratorio fue la dosis de aditivo IH.

Los resultados de la densidad y el contenido de aire fueron 2417 kg/m^3 y 1,4% respectivamente. La Figura 5.19 presenta los valores obtenidos junto a los de la dosificación objetivo para escala industrial (P16 – Lab. Obtenida en el Capítulo 4) y de la prueba a escala industrial (P16 - Esc. Ind.).

La reometría se evaluó mediante un reómetro (ICAR RHEOMETER), la Figura 5.20 muestra los resultados obtenidos.

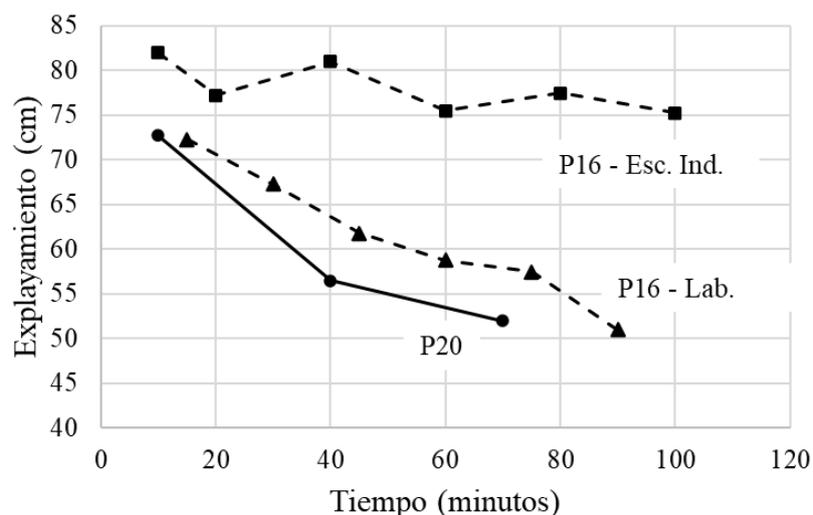


Figura 5.18. Resultados del comportamiento de la fluidez en el tiempo para la dosificación final (P20), la dosificación objetivo para escala industrial (P23) y la prueba a escala industrial (P23).

La Tabla 5.9 muestra los datos de temperatura y humedad de los días en los que se elaboraron las mezclas.

Tabla 5.9. Condiciones Ambientales de las mezclas comparadas

Condición Ambiental	P16 Laboratorio	P16 Esc. Industrial	P20 Laboratorio
Temperatura (°C)	22,5	28	25,1
Humedad (%)	43	-	50

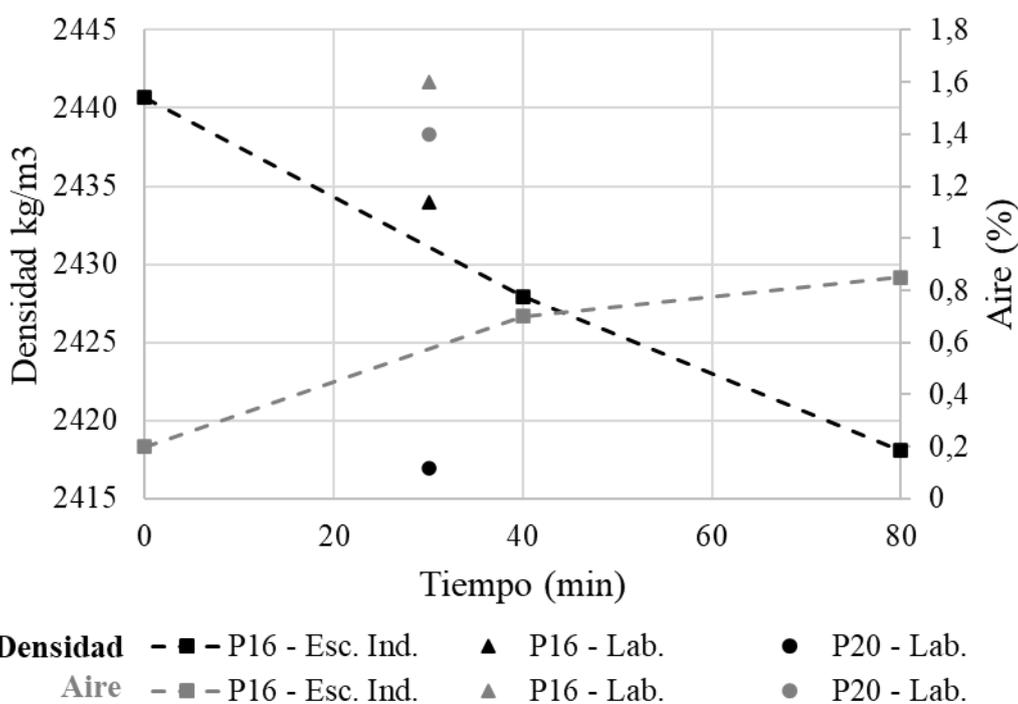


Figura 5.19. Resultados de densidad y contenido de aire para la dosificación final, la dosificación objetivo para escala industrial y la prueba a escala industrial.

El aditivo IH modifica las propiedades frescas del hormigón. La Figura 5.18 muestra que el aumento de la dosis de aditivo prolonga la ventana de trabajo del hormigón, ya que disminuir la dosis de 0,3% a 0,1% disminuyó la trabajabilidad con el tiempo, teniendo que detener las pruebas de ensayo del pastón P20 antes de lo previsto. Sin embargo, para una dosis de 0,10% de IH se obtuvo una ventana de trabajo, adecuada, de 60 minutos luego de colocado el SP. De la Figura 5.19 se observa que reducir la dosis de IH disminuye la densidad y el contenido de aire.

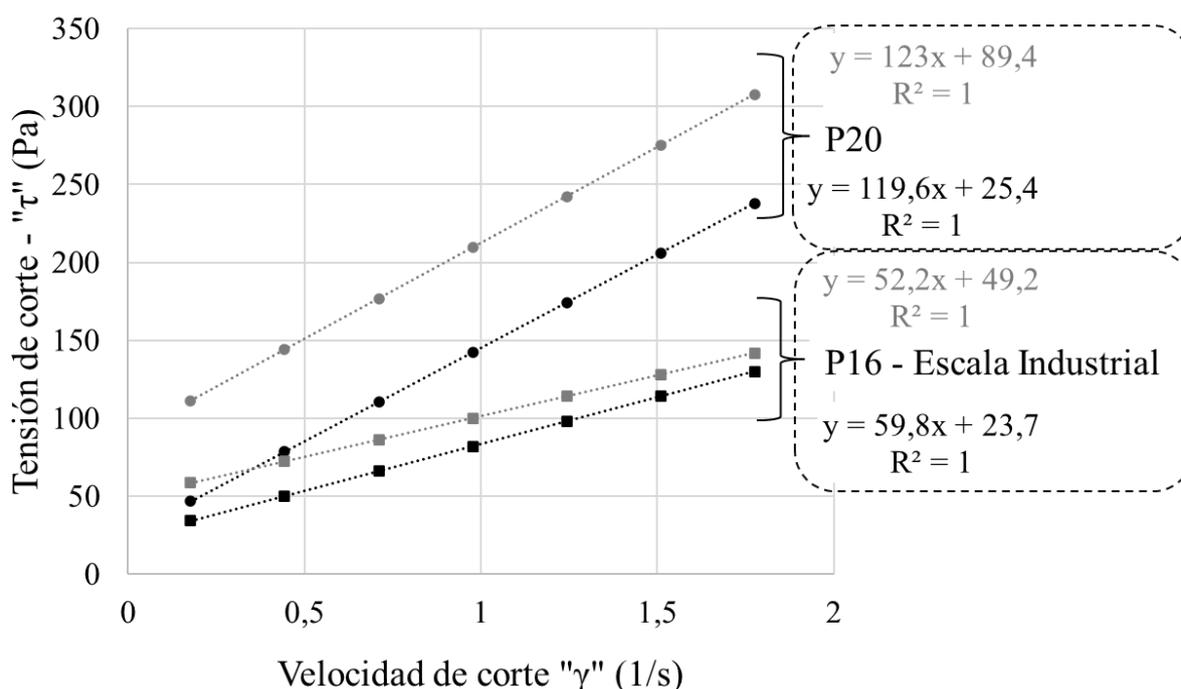


Figura 5.20. Resultados de reología mediante reómetro ICAR Rheometer. resultados pastón P20 y prueba a escala industrial (P16).

La Figura 5.20 muestra que los parámetros reológicos del hormigón aumentan con el tiempo, alcanzando valores considerablemente mayores que los observados en la escala industrial. Este comportamiento ya se había identificado previamente, destacándose que el aumento de volumen y energía de mezclado en la escala industrial mejoran la fluidez y reducen la viscosidad del hormigón. Al comparar los resultados del P20 con los obtenidos en la caracterización completa a escala industrial, se observó que, a los 60 minutos, la mezcla con un 0,10 % de IH presentó valores de viscosidad plástica y tensión crítica aproximadamente el doble de los registrados en la escala industrial.

B. Estado Endurecido

En estado endurecido se evaluaron la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la permeabilidad al aire.

La resistencia a la compresión se determinó promedio de 3 probetas cilíndricas de 10x20 cm ensayadas a 1, 7 y 28 días. La Figura 5.21 presenta los resultados obtenidos, que muestran valores aceptables y bajas desviaciones (menores a 3 MPa).

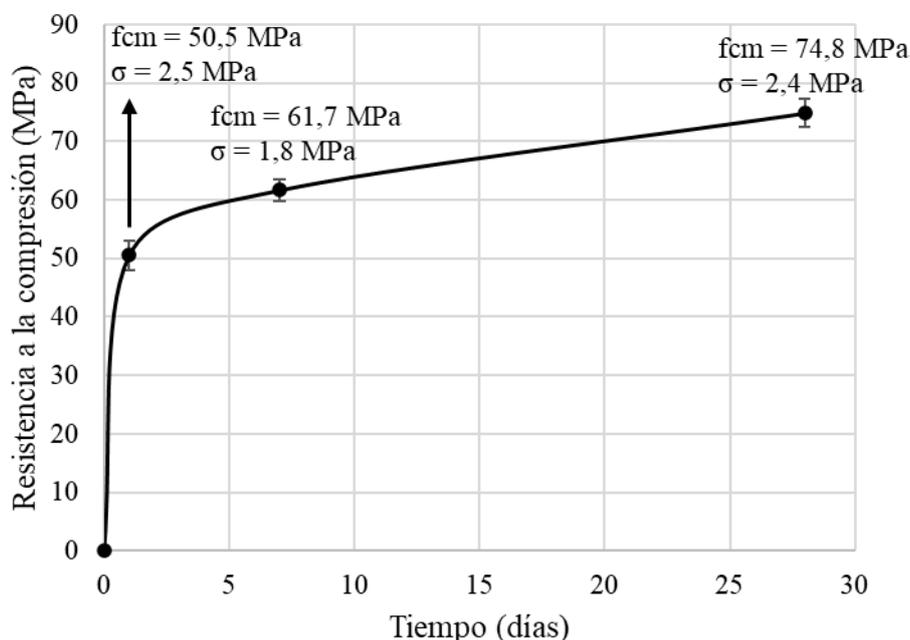


Figura 5.21. Resistencia media a la compresión – dosificación final (P20), fcm: promedio de tres determinaciones, σ : desviación estándar.

A los 28 días, se registró una desviación estándar de 2,4 MPa y una resistencia media de 75 MPa.

El módulo elástico mostró resultados prácticamente similares a los registrados para el pastón P16 y la escala industrial, con valores de 37 GPa.

La absorción de agua y la porosidad se determinaron por sumersión siguiendo el procedimiento descrito en el manual DURAR (CYTED, 2002). En la Tabla 5.10 es posible apreciar que, si bien la porosidad y la absorción aumentaron en comparación con la caracterización completa realizada en el laboratorio y presentada en el Capítulo 4, sus valores disminuyeron en comparación con los obtenidos a escala industrial. Con resultados que caracterizan un hormigón de alta durabilidad según la bibliografía consultada (Fallah y Nematzadeh, 2017) (Wang et al., 2014).

Tabla 5.10. Resultados de porosidad y absorción de agua

	M1	M2	M3	Promedio
Masa saturada (g)	1550,0	1545,0	1546,6	
Masa sumergida (g)	923,0	920,5	924,0	
Masa seca (g)	1515,0	1510,0	1513,0	
Porosidad (%)	5,6	5,6	5,4	5,5
Absorción (%)	2,31	2,32	2,22	2,28

Procurando obtener un dato adicional respecto a la durabilidad del hormigón, y poder correlacionarlo con otros parámetros de durabilidad, se determinó a los 56 días el coeficiente de permeabilidad al aire mediante el método de TORRENT. Previamente, se midió la humedad superficial del hormigón utilizando un medidor de humedad TESTO 606-2, obteniéndose valores en el entorno de 2%, lo que comprueba que la misma es inferior al límite de 5,5% que establece la norma de referencia (IRAM, 2022). La Tabla 5.11 y la Figura 5.22 muestran los resultados.

Tabla 5.11. Resultados de permeabilidad al aire

	M1	M2	M3	Promedio
ΔP_i (mbar)	6	6	7	
P_i (mbar)	28	28	26	
L (mm)	8,2	9,3	12,2	
kt (x10E-16 m²)	0,014	0,018	0,031	0,021

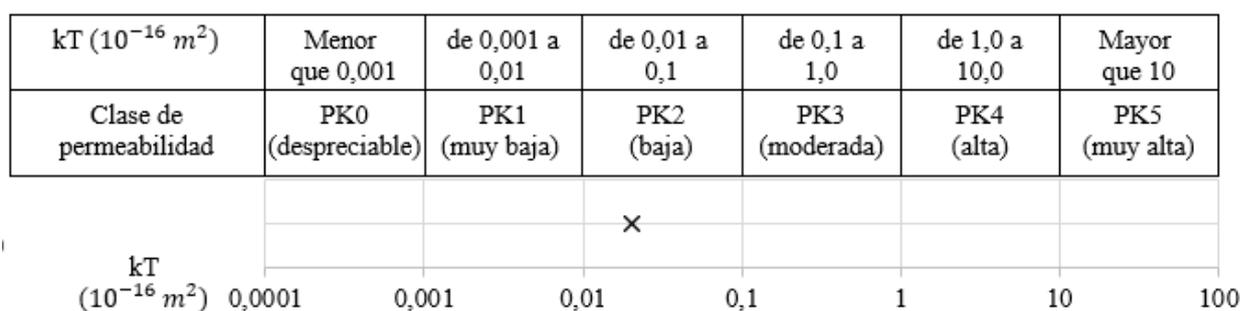


Figura 5.22. Clasificación de la permeabilidad del hormigón, basada en resultados de kT, norma IRAM 1892:2022-1 (IRAM, 2022).

Se caracteriza el valor obtenido según la norma IRAM (IRAM, 2022). como PK2 “baja permeabilidad” y según la bibliografía de referencia como baja permeabilidad al aire y condición superficial buena (Ptacek et al., 2022). En la bibliografía de referencia (Ebensperger y Torrent, 2010), Roberto Torrent correlaciona el coeficiente de permeabilidad al aire con los siguientes parámetros de durabilidad: coeficiente de permeabilidad al agua a presión, migración de cloruros, penetración de carbonatación y succión capilar. Las Figuras 5.23, 5.24, 5.25 y 5.26 presentan los gráficos de correlación establecidos en la bibliografía, junto con el valor obtenido para la mezcla elaborada, donde se observa un comportamiento durable del hormigón.

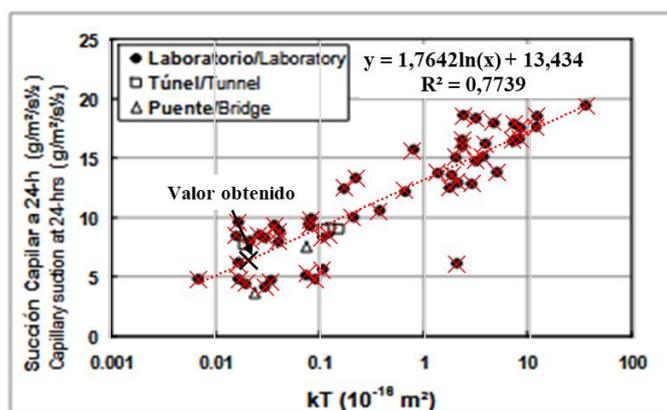


Figura 5.23. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados succión capilar y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo

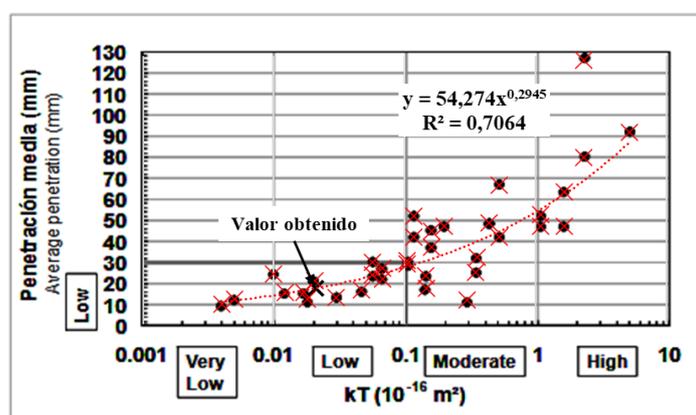


Figura 5.24. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados penetración de agua a presión y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo

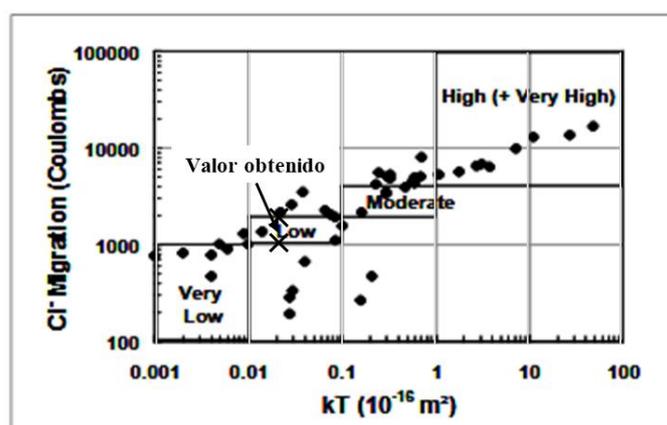


Figura 5.25. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados migración de cloruros y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo

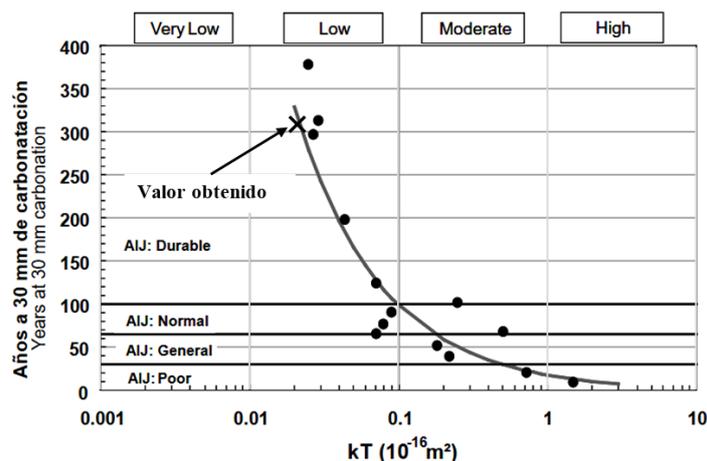


Figura 5.26. Correlación realizada por Torrent (Ebensperger y Torrent, 2010) entre resultados de carbonatación y la permeabilidad al aire, junto al valor obtenido en este trabajo

C. Comentarios Parciales

Se determinó una mezcla de alto desempeño considerada viable para el desarrollo a escala industrial. El ajuste de la dosis del aditivo IH, en comparación con los resultados obtenidos durante la prueba a escala industrial, disminuyó la fluidez del hormigón, la densidad, la resistencia a la compresión y el módulo elástico, mientras que aumentó el contenido de aire, y la viscosidad plástica. Sin embargo, se espera que el aumento de energía de mezclado que se logra al producir el hormigón a escala industrial mejore las propiedades mencionadas. Lo que significa que disminuya la viscosidad plástica, aumente la fluidez y no se vean afectadas negativamente las propiedades en estado endurecido.

Se evaluó la permeabilidad al aire del hormigón mediante el método de TORRENT. A partir de la norma IRAM 1892:2022-1 (IRAM, 2022) el valor obtenido fue clasificado como PK2 “Baja permeabilidad”. Mediante correlaciones realizadas por el autor del método se estimaron, para el resultado obtenido, los siguientes parámetros de durabilidad: coeficiente de permeabilidad al agua a presión, migración de cloruros, penetración de carbonatación y succión capilar. Se recomienda, como línea futura a investigar, realizar los ensayos correspondientes y comparar con los valores obtenidos a partir de los gráficos de correlación.

5.3.2.3. Temperatura

La Figura 5.27 muestra las temperaturas registradas por las termocuplas en el centro de la muestra de hormigón (T_m), en el centro de la cara (T_f), en el centro de la arista (T_e), en el vértice (T_c) y en la cámara interna entre el cubo fenólico y la espuma de poliestireno (T_a).

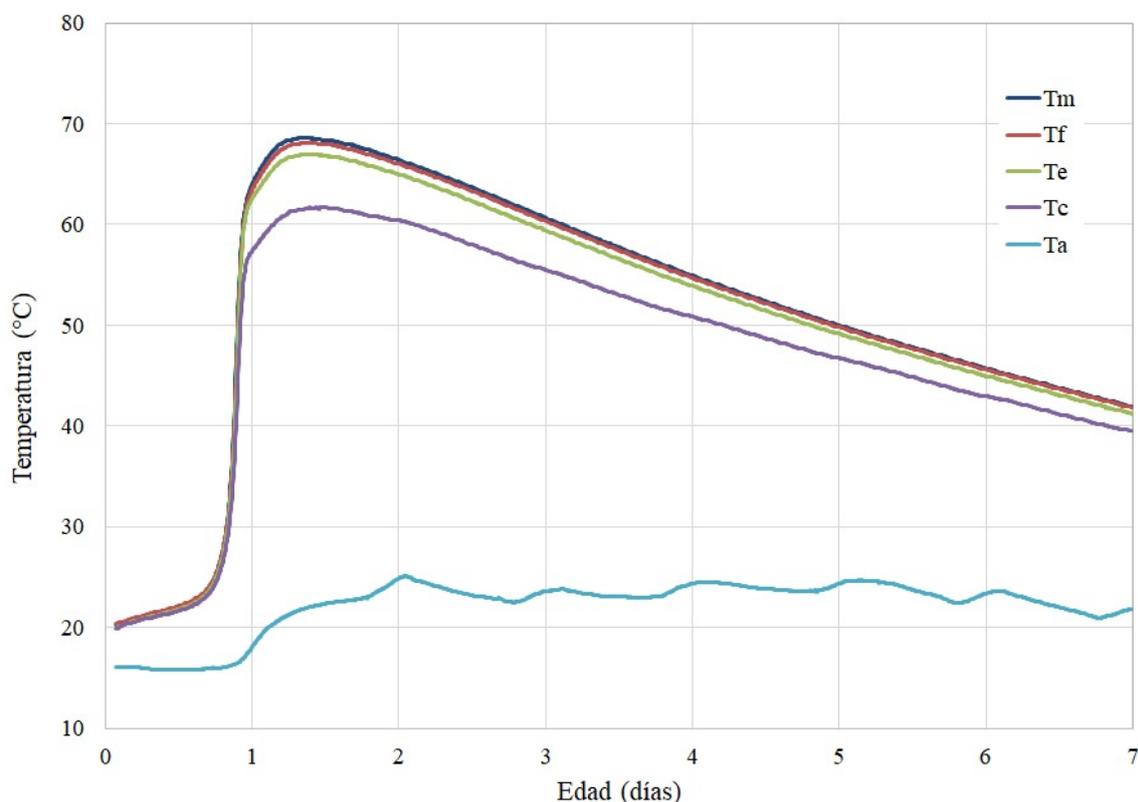


Figura 5.27. Temperaturas alcanzadas por el hormigón del pastón P20, Tm: temperatura en el centro del cubo, Tf: temperatura en el centro de la cara, Te: temperatura en el centro de la arista, Tc: temperatura en el vértice, Ta: temperatura en la cámara interna

Observando la Figura 5.27 se destaca que la temperatura de la cámara intermedia se mantuvo bastante constante con valores por debajo de los 25°C, reflejando las variaciones diarias del ambiente del laboratorio. El vértice fue el que registró menor temperatura con valores poco mayores a 60°C, sin embargo, resulta interesante resaltar que se obtuvieron temperaturas similares en el centro del cubo (Tm) y en el punto medio de su superficie lateral (Tf), con valores ligeramente menores a 70 °C.

Inicialmente se verificó que el equipo funcionara adecuadamente, para ello se determinó la característica de pérdida de calor (λ), mediante las Ecuaciones presentadas en la sección 5.1.1 correspondiente a tres tiempos de medición distintos entre las 120 y las 144 horas de iniciada la mezcla. La Tabla 5.12 presenta los resultados obtenidos para los tres tiempos considerados, su promedio y el valor límite establecido por los autores del método.

Tabla 5.12. Coeficiente característico de pérdida de calor (λ)

Parámetro (λ_{horas})	Valor
λ_{126}	$2,069 \times 10^{-06}$
λ_{132}	$2,057 \times 10^{-06}$
λ_{138}	$2,020 \times 10^{-06}$
Promedio	$2,05 \times 10^{-06}$
Límite establecido por los autores (Ng, Ng y Kwan, 2008)	$2,18 \times 10^{-06}$

Una vez corroborado que el coeficiente característico de pérdida de calor es menor al estipulado por los autores, se procede a calcular la temperatura adiabática alcanzada por el hormigón. La temperatura adiabática se calculó como la suma de la temperatura máxima de la media móvil (T_G) determinada por la Ecuación 5.11 (Sección 5.1.1) y la temperatura de colocación del hormigón. En la Figura 5.28 se presentan las temperaturas registradas por las termocuplas junto a la temperatura adiabática del hormigón para cada instante de tiempo.

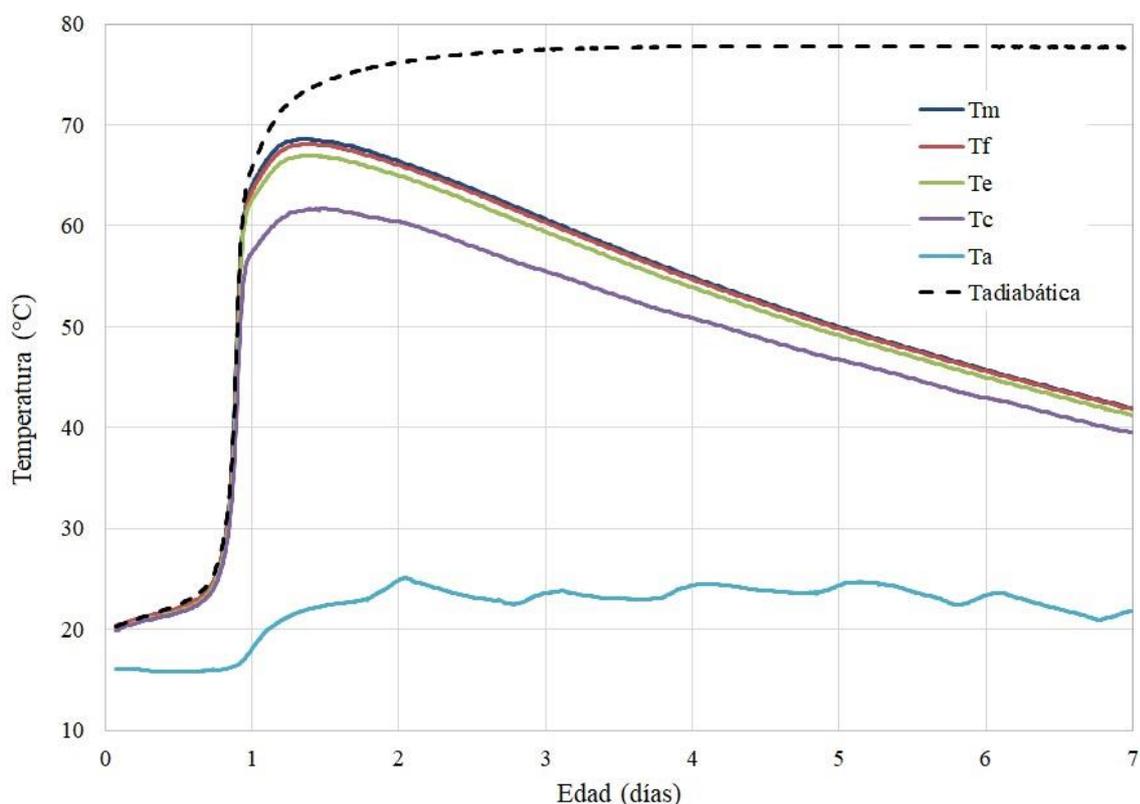


Figura 5.28. Temperatura adiabática y temperaturas alcanzadas por el hormigón del pastón P20

A partir de los resultados se observa que la temperatura máxima alcanzada es de $77,8^{\circ}\text{C}$ para una temperatura de colocación del hormigón de $20,5^{\circ}\text{C}$, implicando un máximo de la media

móvil (T_G) de $57,3^\circ\text{C}$. Finalmente la generación de calor cada 100 kg de cemento (T_G ($^\circ\text{C}/100\text{ kg}$)) fue de $8,8$ ($^\circ\text{C}/100\text{ kg}$).

A partir de la Ecuación 5.2, Sección 5.1.1, se calculó el calor específico del hormigón (ψ), asumiendo los valores recomendados de calor específico 4,19, 0,86 y 0,82 para el agua, el cemento y los agregados respectivamente (De Larrard, 1999), cuyo valor fue de $2536\text{ kJ/m}^3/^\circ\text{C}$, que dividido por la densidad obtenida en estado fresco (2417 kg/m^3) determina un calor específico del hormigón (ψ) igual a $1,05\text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$.

Finalmente, a partir del calor específico del hormigón, su contenido máximo de cemento y la temperatura adiabática se calcula el calor de hidratación (H) mediante la Ecuación 5.1. Los resultados son presentados en la Figura 5.29, cuyo valor máximo obtenido H_u fue de 223 (kJ/kg).

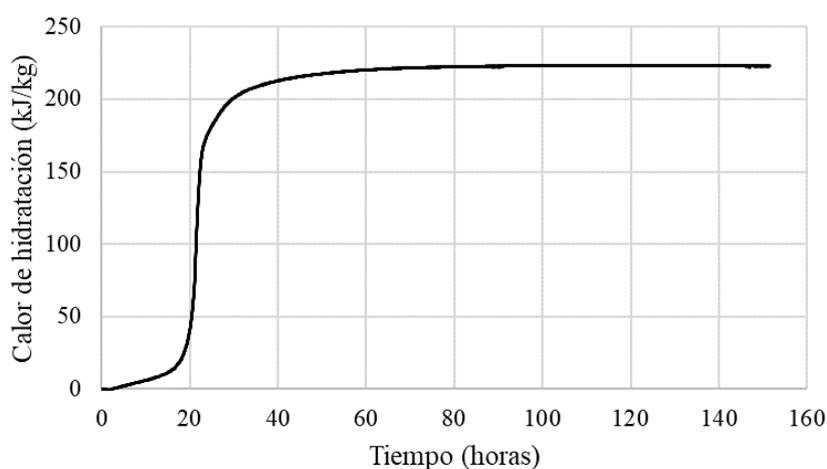


Figura 5.29. Evolución del calor de hidratación obtenido en el tiempo para el P20.

A modo de comparación en la Figura 5.30 y en la Figura 5.31 se compara el valor obtenido con resultados de investigadores internacionales, con distintas dosificaciones. Donde es posible observar que, a medida que aumenta el contenido de cemento o se reduce la relación a/c disminuyen el calor de hidratación y la temperatura adiabática generada cada 100 gramos de cemento. Para el contenido de cemento y la relación a/c utilizada en el P20, los valores obtenidos mediante el estudio de temperatura siguen la tendencia observada por investigadores internacionales que aplicaron el mismo método de ensayo, mostrada en la Figura 5.30. Sin embargo, difieren con los valores presentados en la Figura 5.31. Pudiéndose observar que, para la relación a/c de 0,26 la temperatura adiabática y el calor generado se encuentra por debajo del esperado según la tendencia, sin embargo cuando se compara el contenido de cemento o la resistencia a la compresión, la temperatura adiabática y el calor generado obtenidos experimentalmente son algo mayor a los esperados según la tendencia.

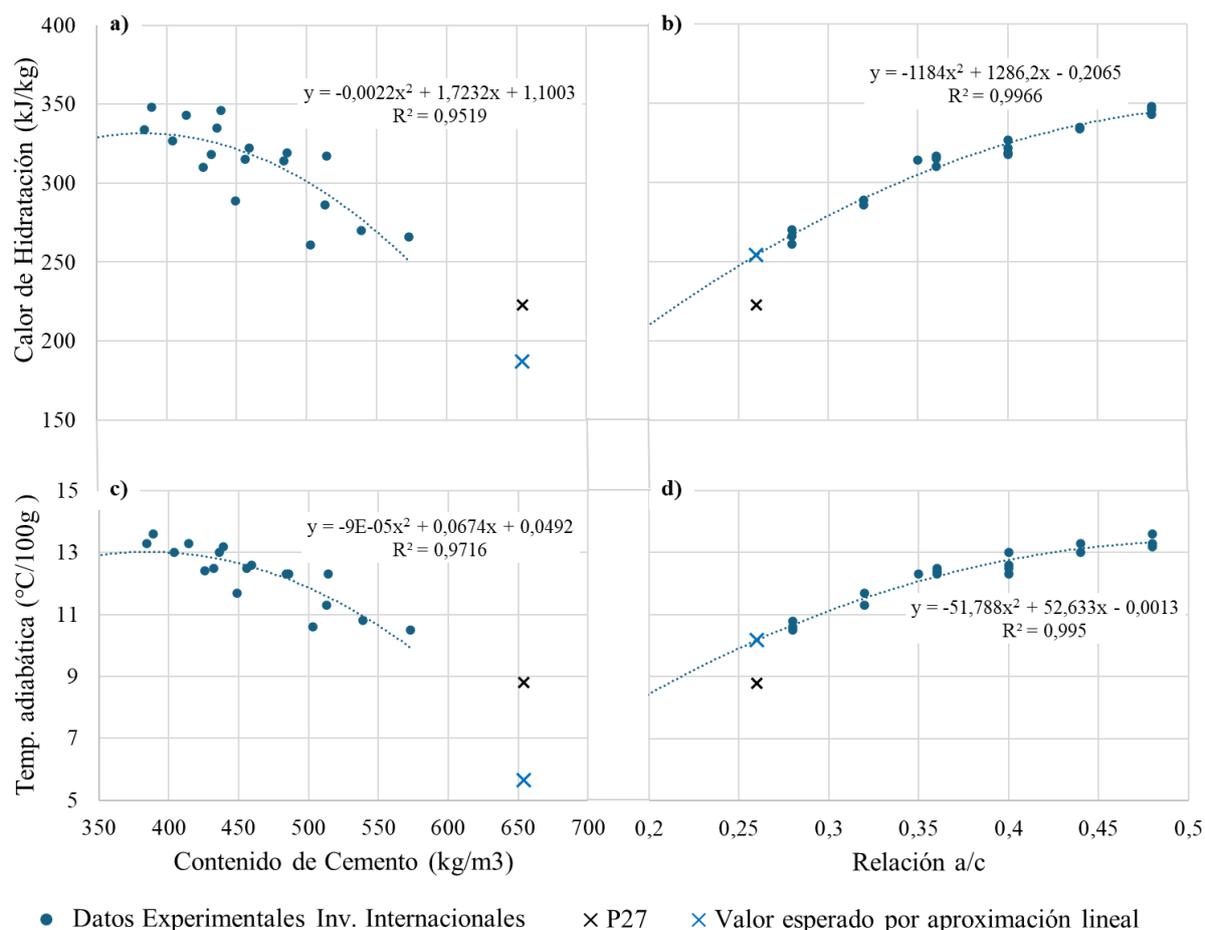


Figura 5.30. Valores Experimentales de Investigadores Internacionales (Ng, Ng y Kwan, 2009) y valor obtenido para el pastón P20, (a): Calor de hidratación vs. Contenido de cemento, (b): Calor de hidratación vs. Relación a/c, (c): Temperatura adiabática vs. Contenido de cemento, (d): Temperatura adiabática vs. Relación a/c.

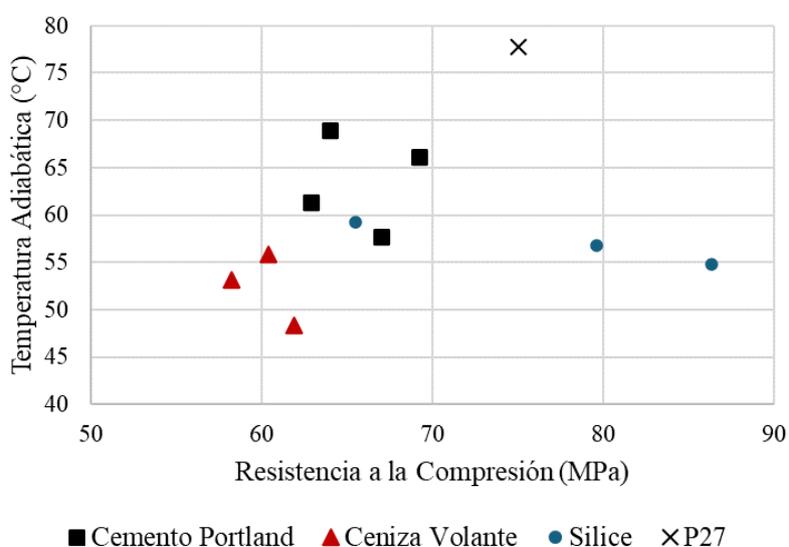


Figura 5.31. Temperatura máxima adiabática obtenida por investigadores internacionales vs pastón P20.

Aunque la temperatura medida bajo condiciones adiabáticas fue alta, se obtuvo una baja ganancia de temperatura, a valores de 8,8 °C/100 kg de cemento. Sin embargo, el principal problema surge cuando el hormigón supera los 70 °C, favoreciendo a la formación de etringita diferida. Esta preocupación obtiene mayor relevancia en estructuras masivas como presas, muros de contención o grandes cimentaciones, cuyo núcleo se encuentra en condiciones similares a las de un cubo en condiciones adiabáticas. Aunque el calor se disipa a través de las superficies en contacto con el ambiente, el núcleo central puede alcanzar temperaturas elevadas. A pesar de esto, dado que la dosificación utilizada está diseñada principalmente para pilares, donde se espera una mayor tasa de disipación de calor, se consideró adecuado analizar la temperatura alcanzada. Existen varias formas de controlar el desarrollo de temperatura en el hormigón de alto desempeño (HAD). Desde el inicio, resulta intuitivo considerar el control de la cantidad o el tipo de cemento utilizado. Por ejemplo, el uso de un cemento con bajo calor de hidratación o la sustitución del mismo por adiciones minerales podría reducir la temperatura alcanzada. Sin embargo, esta opción se aleja de nuestras posibilidades y de las disponibilidades nacionales. Como se mencionó en el Capítulo 2 nuestro país no dispone de adiciones minerales que permitan reducir la temperatura del hormigón sin afectar su resistencia. Además, el uso de adiciones minerales o cementos con bajo calor de hidratación podría retrasar el desencofrado de las estructuras, lo que aumentaría los costos de construcción (Aïtcin, 1998).

Sin embargo, reducir la temperatura del hormigón a través de la disminución de la temperatura de sus materiales resulta ser una solución bastante adecuada y relativamente fácil de implementar. Para disminuir la temperatura máxima que alcanza el hormigón, es conveniente comenzar con una mezcla que tenga la menor temperatura posible. Esto se logra controlando las temperaturas de los componentes de la mezcla.

Controlar la temperatura del cemento es posible si la planta de premezclado cuenta con un silo adicional que permita almacenar el cemento, estabilizando su temperatura hasta igualarla con la temperatura ambiente. Sin embargo, disponer de un silo para enfriar el cemento suele ser inviable y costoso desde el punto de vista de producción (Aïtcin, 1998).

Sin embargo, reducir la temperatura de los agregados es posible evitando la exposición directa al sol o su pulverización con agua fría, aunque el impacto de estas técnicas suele ser limitado. Por otro lado, disminuir la temperatura del agua de mezclado resulta ser una opción más eficiente y viable, como por ejemplo el uso de enfriadores y la sustitución del agua por hielo en escamas (Aïtcin, 1998).

Adicionalmente, se ha observado en algunos casos que el uso de dosis elevadas de aditivos superplastificante, pueden retardar la hidratación del cemento que generalmente se ve acompañado con una disminución de la temperatura máxima (Aïtcin, 1998).

5.4. Conclusiones parciales

5.4.1. Escala Industrial

Se confirmó que la dosificación determinada en laboratorio (P16 Capítulo 4) permite no solo su elaboración y “transporte” a escala industrial sino también su bombeo. El aumento del

volumen de la mezcla y la energía de mezclado incrementaron considerablemente la fluidez del hormigón, induciendo inicialmente una pequeña segregación que posteriormente se estabilizó.

Se realizó una caracterización completa de la muestra, analizando la variación en el tiempo del comportamiento en estado fresco y endurecido. La fluidez incrementada mostró valores significativamente mayores que los obtenidos en laboratorio y una pérdida de asentamiento con valores superiores a los esperados.

Se observó que, a medida que transcurre el tiempo, el contenido de aire se incrementa, lo que provoca una disminución en la densidad. Aunque se obtuvo una densidad promedio similar a la observada en laboratorio, los valores del contenido de aire fueron sorprendentemente menores.

A pesar de la elevada fluidez inicial y la tendencia a la segregación, la muestra mostró una alta viscosidad plástica al inicio, la cual disminuyó a los 20 minutos. Sin embargo, posteriormente presentó un comportamiento acorde a lo esperado, con un aumento de la viscosidad a medida que transcurría el tiempo.

En estado endurecido, se obtuvo una resistencia media adecuada, con valores superiores a 70 MPa y un módulo de elasticidad de 38,7 GPa. Sin embargo, el desmolde de las probetas fue posible recién a los 5 días, y todos los especímenes moldeados presentaron grandes defectos, que iban desde oquedades y pequeñas fisuras hasta segregación. Según los resultados obtenidos, se deberán realizar ajustes en la dosis de aditivo inhibidor de hidratación.

5.4.2. Ajustes Posteriores – Dosificación final

Si se considera utilizar el hormigón para otros fines distintos a los previstos, que puedan comprometer la durabilidad de la estructura, se recomienda realizar un estudio de la evolución de temperatura con mayor profundidad, considerando adoptar medidas preventivas que mitiguen el aumento de temperatura como ser la disminución de la temperatura inicial de los componentes o el uso de un cemento de bajo calor de hidratación, sino también otras medidas respaldadas por normativas como la CIRSOC (INTI, 2005). Dado que la mezcla alcanza una resistencia de 80 MPa a los 56 días, con un aumento del 10% en la resistencia comparado con los 28 días, considerar una edad de diseño diferente podría permitir reducir el contenido de cemento y, por ende, la temperatura alcanzada.

Se determinó una dosificación que se considera viable a implementar a escala industrial, con una resistencia media superior a 70 MPa y una alta durabilidad. El ajuste del aditivo inhibidor de hidratación mostró resultados adecuados en el laboratorio, donde se observó que la reducción de la dosis afectó levemente los valores obtenidos en la caracterización completa, con una disminución en la densidad, resistencia y módulo elástico. Sin embargo, estos resultados son suficientes para considerar la mezcla obtenida (P20) como un HAD que cumple con los objetivos planteados.

Capítulo 6 - Conclusiones

Con la finalidad de acompañar el crecimiento del país, donde los edificios son cada vez más altos, se desarrolló un hormigón de alto desempeño (HAD) viable para su producción a escala industrial, con una resistencia superior a 70 MPa y una trabajabilidad adecuada para su colocación mediante bombeo. Este hormigón permite diseñar pilares más delgados incrementando el área útil en cada planta y reduciendo el peso propio y las cargas sobre las fundaciones.

Uno de los principales desafíos de este trabajo fue alcanzar las propiedades requeridas utilizando los materiales disponibles en la producción habitual de la empresa. La selección de los componentes se realizó siguiendo las recomendaciones bibliográficas, y la caracterización de los mismos demostró su aptitud para HAD. Aunque se recomienda el uso de sistemas aglomerantes con adiciones activas, se decidió no utilizar humo de sílice debido al incremento del costo, reservando su uso para aumentar la resistencia a futuro. Por ello, se analizó la aptitud y compatibilidad del sistema aglomerante actualmente empleado por la empresa hormigonera, compuesto por cemento CPC40 y polvo de electrofiltro (PEF). Sin embargo, se observó que utilizar PEF como adición en el hormigón aumentaba la viscosidad plástica y disminuía la capacidad bombeable del mismo.

Para seleccionar el aditivo reductor de agua más adecuado, se realizaron ensayos de calorimetría con el fin de identificar el período de inducción, el inicio del fraguado y el orden de reacción de los productos de hidratación, que permitieron detectar que alguna combinación tiene potencial para la formación de etringita diferida.

En cuanto a los agregados, se seleccionaron una arena fina y una arena gruesa con módulos de finura de 1,1 y 3,7, respectivamente. Como agregado grueso, se optó por una piedra partida granítica de calidad reconocida a nivel nacional, con un tamaño máximo de 14 mm. Para optimizar la compacidad de la mezcla, se combinó el método experimental de O'Reilly con el método matemático de Andersen y Andreasen modificado. La mejor combinación granulométrica, mostró un coeficiente de ajuste "q" igual a 0,25, con un IDE de 0,44.

La mezcla se diseñó en laboratorio combinando la optimización del esqueleto granular, métodos teóricos de dosificación, y ajustes experimentales. Obtener una resistencia característica superior a 70 MPa y una trabajabilidad adecuada para el bombeo del hormigón requirió un mayor volumen de agua y una menor relación agua/cemento en comparación con las recomendaciones bibliográficas.

La implementación de una mezcla con una relación a/c de 0,26 y un volumen de agua de 170 l/m³ requirió un contenido de cemento de 653 kg/m³. Aunque esta dosificación se considera relativamente alta, se utilizó un cemento compuesto con un 83% de Clinker, lo que equivale a 542 kg/m³ si se empleara un cemento Portland normal. Debido al elevado contenido de cemento, se evaluó la liberación de calor del hormigón mediante un calorímetro, obteniéndose una temperatura máxima de 78°C en condiciones adiabáticas. Si bien la mezcla está diseñada para pilares estructurales, donde la disipación de calor es mayor, no se recomienda su uso en estructuras masivas, ya que el núcleo podría superar los 70°C, generando condiciones necesarias para la formación de etringita diferida.

En caso de considerar el uso del hormigón para aplicaciones distintas a las previstas, que puedan comprometer la durabilidad de la estructura, se recomienda realizar un análisis con mayor profundidad adoptando medidas preventivas que mitiguen el aumento de temperatura.

Aunque la mezcla de hormigón puede caracterizarse como autocompactante, se decidió realizar la compactación ya que se comprobó que esta disminuía la porosidad y aumentaba la resistencia.

El paso del laboratorio a escala industrial implicó buscar alternativas que ampliaran la ventana de trabajo del hormigón, asegurando un tiempo de 50 minutos para su transporte y una ventana mínima de 60 minutos para su colocación. Para ello, se optó por un enfoque innovador, integrando tres aditivos en etapas específicas del proceso: un plastificante inicial incorporado en planta como aditivo de sacrificio, un inhibidor de hidratación colocado a los 10 minutos y un superplastificante agregado en obra, que aseguran las ventanas indicadas de traslado y colocación.

Se corroboró que la mezcla podía ser producida en la planta mezcladora, vertida en el mixer sin atascamientos en las tolvas, mezclada y transportada por el camión y colocada mediante bombeo. Sin embargo, aunque se alcanzaron altas propiedades mecánicas, se observó que el aumento del volumen y la energía de mezclado a escala industrial incrementó considerablemente la fluidez del hormigón, lo que provocó la segregación de la mezcla, un retraso excesivo en el fraguado y patologías en el hormigón endurecido. Esto requirió ajustar la dosis del aditivo inhibidor de hidratación.

Una vez realizada esta modificación, se obtuvo una mezcla de HAD que se considera viable para implementar a escala industrial, proporcionando una resistencia característica de 72,7 MPa en laboratorio y una fluidez que se asume adecuada para su bombeo. Aunque el trabajo realizado responde a los objetivos planteados, es importante considerar que, a escala industrial, muchos factores adquieren mayor relevancia. En este sentido, se plantea como necesario, a futuro, evaluar y correlacionar la influencia de las variaciones de los materiales, el volumen de hormigón, la energía de mezclado y los tiempos de traslado en la dosis de aditivo superplastificante aplicado en obra y su impacto en el desempeño final del hormigón. Además, resulta conveniente explorar alternativas que amplíen la ventana de trabajo.

Se recomienda investigar el uso de adiciones activas disponibles en otros mercados para mejorar la sostenibilidad del proceso y realizar un estudio detallado sobre la evolución térmica en condiciones reales, así como su efecto en la durabilidad a largo plazo. Estos estudios contribuirían a validar la adaptabilidad del hormigón a diferentes escenarios y garantizar un desempeño óptimo bajo diversas condiciones.

Se demostró que es posible desarrollar y producir hormigón de alto desempeño en condiciones industriales en Uruguay, superando retos técnicos y logrando un producto de alta calidad con alta resistencia y durabilidad. Los ajustes e investigaciones realizados establecen las bases para futuras aplicaciones del hormigón de alto desempeño en la construcción local, favoreciendo su implementación en elementos estructurales que requieran menor peso y mejor desempeño a largo plazo. Para su aplicación, es necesario que los estudios de cálculo integren este material en sus diseños y que las empresas constructoras se capaciten para manejar sus particularidades en términos de colocación, curado y control de calidad.

Capítulo 7 - Referencias Bibliográficas

AİTCIN, P. C., High-performance concrete. Londres: E & FN Spon, 1998. ISBN 0203475038.

ALYHYA, W.S.; KULASEGARAM; S. y KARIHALOO, B.L.. Simulation of the flow of self-compacting concrete in the V-funnel by SPH. En línea. Cement and Concrete Research, vol. 100 (2017), pp. 47–59. DOI 10.1016/j.cemconres.2017.05.021

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, ASTM C29. United States: American Society for Testing and Materials.

AMIN, M. y ABU EL-HASSAN, K. Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. En línea. Construction and Building Materials, vol. 80 (2015), pp. 116–124. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.075

ANDREASEN, A. H. M., 1930. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Kolloid-Zeitschrift, vol. 50 (1930), pp. 217–228. Disponible en: DOI 10.1007/BF01422986

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN. Hormigones Especiales. Buenos Aires: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2004.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN, 2013. Hormigón, Parte 9: Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante, UNE-EN 206-9. España: Asociación Española de Normalización.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN, 2018. Hormigón, Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad, UNE-EN 206:2013+A1. España: Asociación Española de Normalización.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005. Agregados para concreto – Especificação, ABNT NBR 7211. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BEAUDOIN, J. y ODLER, I. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. En: Lea’s Chemistry of Cement and Concrete, pp. 157–250. Oxford: Elsevier, 2019. ISBN 9780081007730. DOI 10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8

BEYCIOĞLU, A. y YILMAZ ARUNTAŞ, H.. Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. Construction and Building Materials, vol. 73 (2014), pp. 626–635. DOI 0.1016/j.conbuildmat.2014.09.071

BROUWERS, H. J.H. and RADIX, H. J.. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. Cement and Concrete Research, vol. 35 (2005), no. 11, pp. 2116–2136. DOI 10.1016/j.cemconres.2005.06.002

CHRIST, R.. Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (uhpc). Doutor em Engenharia. Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos. São Leopoldo, 2019.

Cyted. Manual DURAR: Diagnóstico, evaluación y estrategias de intervención en estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes agresivos. Madrid, 2002.

DE CASTRO, A. L. y PANDOLFELLI, V. C.. Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production. *Cerámica*, vol. 55 (2009), no. 333, pp. 18–32. DOI 10.1590/s0366-69132009000100003

DE LARRARD, F.. *Concrete Mixture Proportioning. A Scientific Approach*. New York: CRC Press, 1999. ISBN 978-0419235002

DI MAIO, Á. A. et al., *Ese material llamado Hormigón*. Buenos Aires: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2012. Argentina. ISBN 978-987-21660-5-2

DINAKAR, P.; KARTIK REDDY, M. y SHARMA, M. Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash. *Materials & Design*, vol. 46 (2013), pp. 609–616. DOI 10.1016/j.matdes.2012.11.015

EBENSPERGER, L. y TORRENT, R. Medición “in situ” de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 25 (2010), no. 3, pp. 371–382.

EUROPEAN STANDARD, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1.

DE LARRARD, F. y SEDRAN, T. The Use of a Packing Model for Ultra-High- Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 24 (1994), no. 6, p.997–1009. Doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1

FALLAH, S. y NEMATZADEH, M. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, vol. 132 (2017), pp. 170–187. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100

FARAJ, R. H. et al. Rheological behavior and fresh properties of selfcompacting high strength concrete containing recycled PP particles with fly ash and silica fume blended. *Journal of Building Engineering*, vol. 34 (2021), p. 101667. DOI 10.1016/j.jobbe.2020.101667

FENNIS, S.A.A.M. y WALRAVEN, J.C.. Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. En línea. *Heron*, vol. 57 (2012), no. 2, pp. 73–102. Disponible en: <https://heronjournal.nl/57-2/1.pdf>

FRIAS, M., et al.. Granulometría laser: Estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos. En línea. *Materiales de Construcción*, vol.40 (1990), no. 217, 39-51. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

FULLER, W. B. and THOMPSON, S. E.. The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. American Society of Civil Engineers, vol. 59 (1907), no. 2, pp. 67–143. DOI 10.1061/TACEAT.0001979

FURNAS, C. C. Flow of gases through beds of broken solids. En línea. Washington DC: United States Department of Commerce, 1929. Disponible en: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc38776/m2/1/high_res_d/metadc38776.pdf

FURNAS, C. C.. Grading aggregates I: Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Industrial and Engineering Chemistry, ACS Publications*, vol. 23(1931), no. 9, pp. 1052–1058. Doi.org/10.1021/ie50261a017

GALETAKIS, M. et al.. Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting. *Construction and Building Materials*, vol. 107 (2016), pp. 247–254. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.014

GARAS, V. Y. and KURTIS, K. E.. Assessment of methods for optimising ternary blended concrete containing metakaolin. *Magazine of Concrete Research*, vol. 60 (2008), no. 7, pp. 499–510. DOI 10.1680/macr.2007.00095

GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, Erhan y ÖZBAY, E. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*, vol. 23 (2009), no. 5, pp. 1847–1854. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015

GOMEZ JURADO SARRIÁ, J. y SÁNCHEZ DE GUZMÁN, D., Tecnología y propiedades. 2.^a ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto – ASOCRETO, 1997.

GUERRERO VARGAS, C. y NAVAS CARRO, A.. Módulo de elasticidad en concretos de alto desempeño. *Ingeniería*, vol. 22 (2012), no. 2, pp. 75–92.

HARRISSON, A. M.. Constitution and specification of Portland cement. En: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp. 87–155. Oxford: Elsevier, 2019. ISBN 9780081007730. DOI 10.1016/B978-0-08-100773-0.00004-6

HELENE, P. y TUTIKIAN, B. F.. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. En: Geraldo Cechella Isaia (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Disponible en : <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>

HEWLETT, P. C., ed. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 9780750662567.

HEWLETT, P. C., ed. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 9780750633659.

I. Y. T. NG, P. L. Ng y A. K. H. KWAN. Effects of Cement and Water Contents on Adiabatic Temperature Rise of Concrete. *ACI Materials Journal*. American Concrete Institute, vol. 106 (2009), no. 1, pp. 42–49. DOI: 10.14359/56315

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, 1997. *Granulometría de los agregados para hormigones*, IRAM 1627. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, 2020. Hormigón elaborado, Requisitos y control de la producción, IRAM 1666. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, 2022. Hormigón, Método de ensayo para la determinación del coeficiente de permeabilidad al aire (kT) del hormigón endurecido, IRAM 1892. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, 2005. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado, CIRSOC 201. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 1951. Granulometría de agregados finos para hormigones, UNIT 82. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 1998a. Cemento pòrtland - Determinación de la finura mediante el método de permeabilidad al aire (Método de Blaine), UNIT-NM 76. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 1998b. Agregados - Determinación del contenido de arcilla en terrones y materiales friables, UNIT-NM 44. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 1999. Agregados gruesos - Determinación del coeficiente de forma, UNIT 1029. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002a. Agregados - Determinación de la composición granulométrica, UNIT-NM 248. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002b. Agregado fino - Determinación de la densidad relativa y de la densidad relativa aparente, UNIT-NM 52. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002c. Agregados finos - Determinación de la absorción de agua, UNIT-NM 30. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002d. Agregado grueso - Determinación de la densidad relativa y de la densidad relativa aparente, UNIT-NM 53. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002e. Agregados - Determinación del material fino que pasa por el tamiz 75 μm , por lavado, UNIT-NM 46. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002f. Agregados - Muestreo, UNIT-NM 26. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2002g. Agregados - Reducción de la muestra de campo para ensayo de laboratorio, UNIT-NM 27. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a. Cemento pórtland - Determinación de la pasta de consistencia normal, UNIT-NM 43. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2004b. Cemento pórtland - Determinación del tiempo de fraguado, UNIT-NM 65. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2005. Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado, UNIT 1050. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2009. Métodos de ensayo de cementos - Determinación de resistencias mecánicas, UNIT-ISO 679. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2010. Ensayos de hormigón - Parte 10: Determinación del módulo de elasticidad estático en compresión, UNIT-ISO 1920-10. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. Ensayos de hormigón - Parte 2: Propiedades del hormigón en estado fresco, UNIT-ISO 1920-2. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2018. Ensayos de hormigón - Parte 13: Propiedades del hormigón fresco autocompactante, UNIT-ISO 1920-13. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2019. Ensayos de hormigón - Parte 3: Elaboración y curado de probetas de ensayo, UNIT-ISO 1920-3. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2020. Ensayos de hormigón - Parte 4: Resistencia del hormigón endurecido, UNIT-ISO 1920-4. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS, 2022. Cementos pórtland para uso general - Definiciones y requisitos, UNIT 20. Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

INTERNATIONAL CENTER FOR AGGREGATE RESEARCH. ICAR Rheometer. United States: The University of Texas at Austin.

JANG, Kyong P. et al.. Experimental Observation on Variation of Rheological Properties during Concrete Pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol. 12 (2018), no. 1, p. 79. DOI 10.1186/s40069-018-0310-3

JUILLAND, P. et al.. Effect of mixing on the early hydration of alite and OPC systems. *Cement and Concrete Research*, vol. 42 (2012), no. 9, pp. 1175–1188. DOI 10.1016/j.cemconres.2011.06.011

JUSTS, J. et al.. Influence of superabsorbent polymers on hydration of cement pastes with low water-to-binder ratio. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 115 (2014), no. 1, pp. 425–432. DOI 10.1007/s10973-013-3359-x

KUMAR V, S. y SANTHANAM, M.. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. En línea. *The Indian Concrete Journal*, vol.77(9):1324-1331pp. 1324–1331. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/286840879>
KOSMATKA, S.H.; et al.. Diseño y control de mezclas de concreto. Boletín de Ingeniería EB201. Skokie, Illinois: Cement Portland Association, [s.f.].

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE COLOMBIA, [2021]. Proyecto de directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Mejores_tecnicas_disponibles_y_las_mejores_practicas_ambientales_-_Introduccion.pdf [Accedido el 5 de Marzo 2024].

MOLINA, A., et al., 2023. Efecto de la morfología y composición del cemento portland en su hidratación. *Memorias de la 3ª edición de las Jornadas de Jóvenes Investigadores*, pp. 32–34, ISBN 978-631-90193-0-8.

NEVILLE, A. M. Cementos portland, cementos adicionados y otros cementos hidráulicos. En: *Tecnología del concreto*. 4.ª ed. México: Limusa, 1997. cap. 2, pp. 25–76. ISBN 9681817985.

NEVILLE, A. y AİTCIN, P. C.. High performance concrete-An overview. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 31 (1998), no. 2 pp. 111–117.

NEVILLE, A. M. Properties of concrete. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7

OLIVEIRA, C. Umbinger. Análise de desempenho físico e mecânico de tubos de concreto produzidos com aditivo baseado em óxido de cálcio supercalcinado. Tesis, Universidade São Judas Tadeu, Brasil, 2007.

O'REILLY DÍAZ, V. A.. Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño. México, D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2007.

MEHTA. P. H. y AİTCIN P. C.. Principles Underlying Production of High- Performance Concrete. Cement, Concrete, and aggregates. *American Society for Testing and Materials*, vol. 12 (1990), no. 2, pp. 70–77.

P. L. NG; I. T. NG y KWAN, A. K. H.. Heat Loss Compensation in Semi- Adiabatic Curing Test of Concrete. *Aci Materials Journal*, vol. 105 (2008), no. 1, pp. 52–61.

PEREYRA, M. N., et al., 2019. Módulo de elasticidad del Hormigón. Estudio de la influencia del tipo de agregado y ajuste normativo. En: XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción [en línea]. Tuxla Gutiérrez, Chiapas, México: CONPAT, vol. 1, pp 1-10.

PERONIUS, N. y SWEETING, T. J.. On the correlation of minimum porosity with particle size distribution. *Powder Technology*, vol. 42 (1985), no. 2, pp. 113-121.

PTACEK, L. et al.. Concrete Curing Performance Assessment Based on Gas Permeability Testing in the Lab and on Site. *Sensors*, vol. 22 (2022), no. 13, p. 4672. DOI 10.3390/s22134672

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. (2000). Estudio comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz. Tesis (Doctorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G. et al.. 2008. Avances en la Producción de Hormigón Verde en el Uruguay. En : III Congreso Uruguayo y II Congreso Regional de Gestión de la calidad, patología y recuperación de la construcción. Montevideo, 2008. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/33166/1/201036.pdf>

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G.; ROMAY, C.; COSTA, F. (2012). Valuation of the residual obtained from the burning of rice husk for use in concrete. En: *Concrete in the Low Carbon Era. 8th International Conference: Concrete in the Low Carbon Era*, Dundee, UK, 9–11 de julio de 2012. Vol. 1, pp. 895–904. Dundee, UK: University of Dundee-Concrete Technology Unit. ISBN 978-0-9573263-0-9.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G.; RODRÍGUEZ VIACAVA, I; GODOY, D. (2015). Blended cements: chemical properties, mechanical properties, physical properties, environmental viability. En: *Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. Thirteenth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, Ottawa, pp. 485–502. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. ISBN 987-0-9916737.

RODRÍGUEZ DE SENSALE, G.; RODRÍGUEZ VIACAVA, I. (2018). A study on blended cements containing residual rice husk ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, vol. 166, pp. 873–888. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.113. ISSN 0950-0618.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R. y LOTHENBACH, B. (eds.). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Taylor & Francis, 2016. Doi.org/10.1201/b19074

SETHY, K.; PASLA, D. y SAHOO, U. C.. Effect of Slag on the rheological and strength properties of self-compacting concrete. *Key Engineering Materials*, vol. 629–630 (2014), pp. 399–404. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.399

SIDDIQUE, R.; *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-74293-7.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. Supplementary cementing materials. Berlin: Springer-Verlag, 2011. (Engineering Materials). ISBN 978-3-642-17865-8. DOI 10.1007/978-3-642-17866-5.

SPRINGENSCHMID, R. (Ed.). Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. . Londres, 1998. Doi.org/10.1201/9781482271812

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C. y HELENE, P.. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. En: ISAIA, Geraldo C. (ed.), Concreto: Ciência e Tecnologia. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/304628423>

TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. Doutor em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponible en: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11309/000611153.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

WANG, Wei et al.. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*, vol. 55 (2014), pp. 1–13. DOI 10.1016/j.cemconres.2013.09.008

WU, K.; CHEN, Bing; YAO, Wu; ZHANG, Dong. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1421–1425. Doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00588-9

YUN, Kyong-Ku et al.. Influence of Colloidal Silica and Silica Fume on the Rheology and Mechanical Properties of High-Performance Shotcrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26 (2022), no. 6, pp. 2737–2746. DOI 10.1007/s12205-022-0356-2

ANEXO 1: Procedimiento de ensayo de Calorimetría

Método de mezclado:

Se compararon dos formas de mezclado: Un mezclado manual, en donde el agua es añadida al cemento y mezclada en forma rápida procurando evitar grumos o zonas sin mezclar, y un segundo método realizado mediante mezcladora IBERTEST modelo Ibermix del año 2022, utilizando el procedimiento para la realización de probetas de morteros (UNIT – ISO 679). Esta comparación se realizó para el CPC40 y el CPC50B. La Figura A1.1 muestra la curva de calor por unidad de masa Vs. tiempo. En la figura de la izquierda (a) se muestra los resultados obtenidos para el cemento CPC40, la curva oscura representa el mezclado manual y la clara el mezclado a máquina. La figura de la derecha (b) presenta los resultados del cemento CPC50B, siendo también, la curva oscura el mezclado a mano y la curva clara el mezclado a máquina.

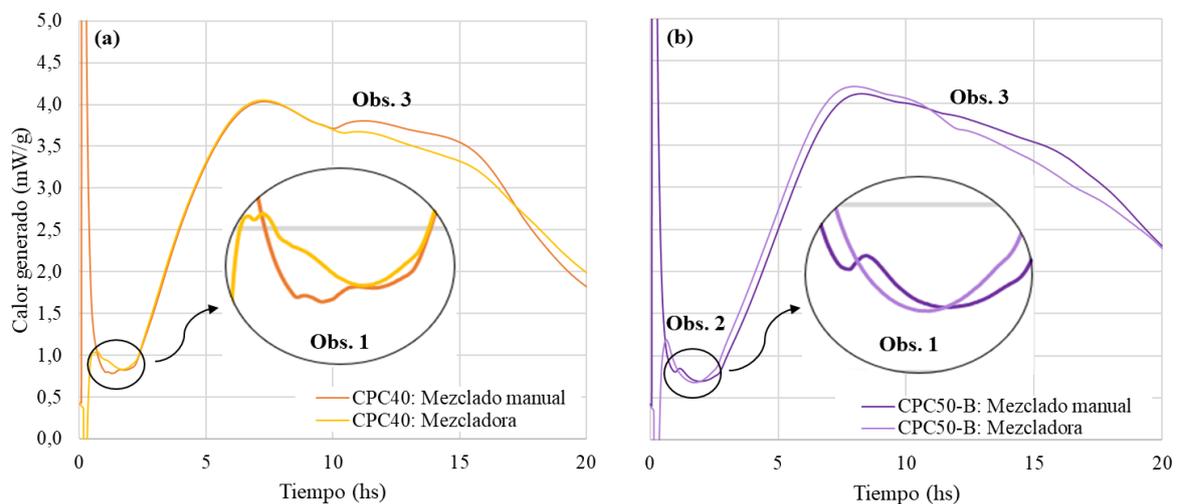


Figura A1.1. Resultados de calorimetría comparación métodos de mezclado: manual vs. mezcladora. (a): cemento CPC40, (b): cemento CPC50B.

Se destacan 3 observaciones:

- **Obs.1:** en ambos cementos, cuando la pasta es mezclada en forma manual se generan variaciones en la liberación de calor luego del pico inicial (generalmente descartado). Los pequeños picos, mostrados en los detalles de la Figura A1.1, señalan que el mezclado a mano genera la hidratación de aluminatos previo a la reacción de silicatos.
- **Obs.2:** para el CPC50B la hidratación se acelera y el período de inducción disminuye a medida que aumenta la velocidad de mezclado (cambio de pendiente).
- **Obs.3:** los aluminatos reaccionan más abruptamente cuando el mezclado se realiza manualmente. Picos muy intensos de formación de etringita a las 10 horas pueden generar tensiones internas y consecuentemente fisuraciones.

Masa de pasta incorporada el calorímetro:

Se evaluó como afecta la cantidad de masa incorporada dentro del calorímetro. Para ello se realizaron dos ensayos, una muestra con 80 gramos y otra con 15 gramos, ambos mezclados se realizaron con mezcladora. La Figura A1.2 presenta los resultados de calorimetría, en línea continua la muestra de 80 gramos y en línea punteada la mezcla de 15 gramos.

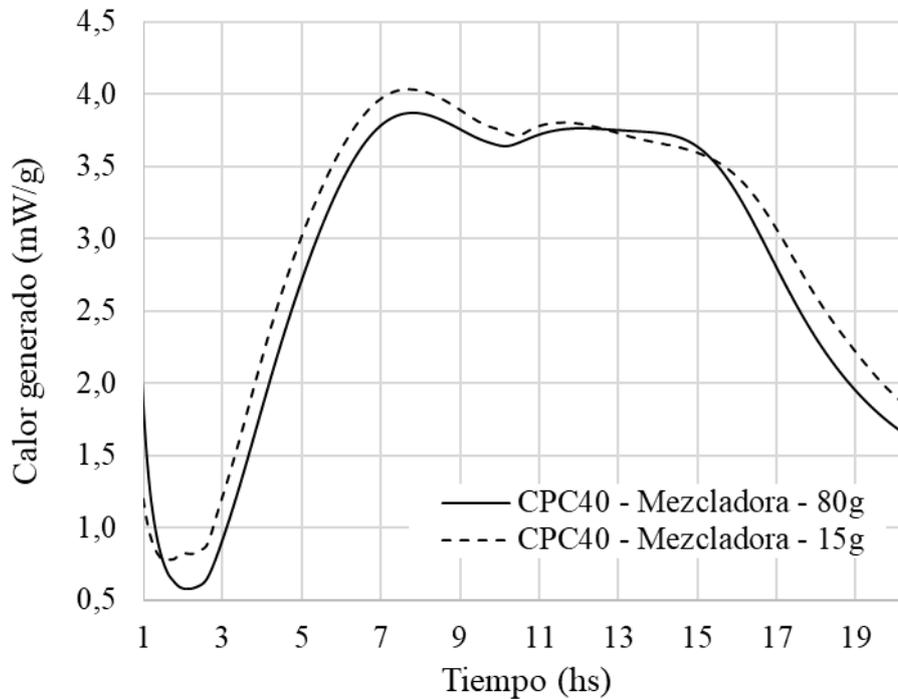


Figura A1.2. Resultados de calorimetría comparación masa de la muestra colocada en el calorímetro

Cuando la mezcla agregada al calorímetro es elevada (como en el caso de 80 gramos), la velocidad de hidratación disminuye durante todo el proceso de liberación de calor, aumentando el tiempo de inducción y disminuyendo el calor liberado finalmente. Se observa, además, que durante la etapa de inducción el calorímetro se vuelve insensible a los primeros picos de hidratación, resultantes de la reacción temprana de los aluminatos.

ANEXO 2: Artículo Presentado en la 3ª Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y del Hormigón

EFFECTO DE LA MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND EN SU HIDRATACIÓN

Anyela Molina^{1,2}, Iliana Rodríguez², Renan Pícolo Salvador³, Ariel Guzzo¹, Virginia Fernandez¹, Gustavo Tovar¹, Luis Segura²

1 Cementos Artigas

2 Universidad de la República, Uruguay

3 Universidad de São Judas Tadeu, Brasil

Palabras Clave: morfología del cemento, hidratación, calorimetría, reductores de agua

Introducción

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de un proyecto público-privado para desarrollar hormigón de alto desempeño, particularmente de alta resistencia, en el que el estudio de sus componentes y su adecuada selección se vuelve crucial. Se analizaron las muestras de cementos y su compatibilidad con adiciones y aditivos disponibles en el mercado, mediante ensayos de calorimetría. Los resultados demuestran la influencia de la composición del cemento y principalmente la influencia de la morfología de las partículas en su hidratación. Con ello se demostró que cuando la molienda del cemento es realizada mediante molino vertical se obtienen partículas más angulosas que las producidas por molinos de bolas. La angulosidad de las partículas aumenta la superficie específica, volviéndolas más reactivas y aumentando su velocidad de hidratación. Cuando se incorporan aditivos reductores de agua, el mismo es adsorbido en la superficie de las partículas, que al aumentar su angulosidad genera un efecto contrario; en el que el aumento de la superficie específica de las partículas aumenta su dispersión y disminuye su velocidad de hidratación.

Materiales y métodos

Se seleccionaron tres muestras de cemento que difieren tanto en composición química como en método de molienda. El cemento C1 está compuesto por un 76% de clinker, 4,2% de yeso, 1% de arcilla calcinada y 16% de filler calcáreo. El cemento C2 está compuesto por un 91% de clinker, 3% de yeso, 1% de arcilla calcinada y 5% de filler calcáreo. El cemento C3 está compuesto por un 90% de clinker, 4% de yeso, 1% de arcilla calcinada y 5% de filler calcáreo.

La composición química de las muestras, presentada en la Tabla 0.1, se obtuvo a partir de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, y sus componentes principales se calcularon mediante las Ecuaciones de Bogue [2], [3].

Tabla 0.1: Composición química y mineralógica de las muestras de Cemento

Muestra	Composición Química (FRX)									Composición Mineralógica				SO_3
	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)	PPC (%)	C3S (%)	C2S (%)	C3A (%)	C4AF /C3A (%)	
C1	19,58	3,96	2,44	59,39	2,52	2,80	1,41	0,14	7,08	62,80	8,70	6,40	7,40	0,44
C2	20,70	3,92	2,00	61,38	3,05	3,00	1,43	0,14	3,46	63,30	11,60	7,00	6,10	0,43
C3	20,96	4,02	2,70	60,82	3,12	2,84	1,40	0,16	2,80	57,40	16,80	6,10	8,20	0,47

El aditivo seleccionado es un reductor de agua de última generación, cuya dosis adoptada fue de 0,6% en peso de cemento. Se utilizó agua destilada estabilizada a la temperatura ambiente del laboratorio, $20 \pm 2^\circ C$.

La molienda de las muestras de cemento se realizó mediante distintos métodos, obteniéndose diferentes granulometrías, superficies específicas y morfologías de las partículas (Figura 3, Figura 4).

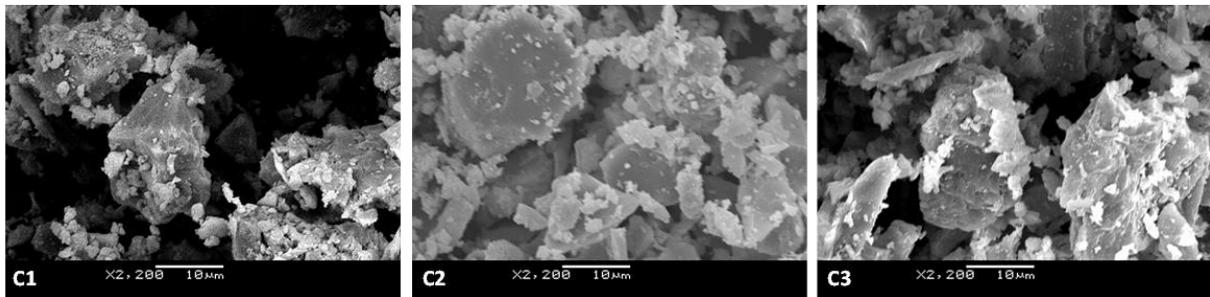


Figura 3. Morfologías de las partículas de cemento, Microscopía Electrónica de Barrido

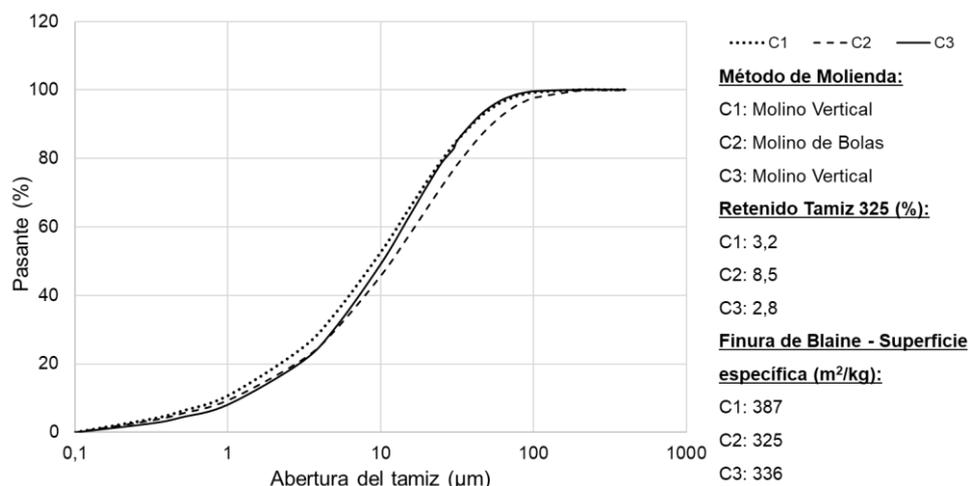


Figura 4. Molienda, Granulometría, Retenido en el tamiz 325 y superficie específica de las muestras de cemento.

Para cada ensayo se preparó una pasta con 500 g de cemento y una relación a/c de 0,45. La preparación de las muestras se realizó mediante una mezcladora IBERTEST (modelo ibermix año:2022). Se procuró mezclar las pastas a velocidad lenta durante 1 minuto (paleta 140 rpm y planetario 61 rpm), luego con la ayuda de una espátula se rasparon las paredes del recipiente (1/2 minuto), finalmente se continuó con el mezclado a velocidad rápida por un lapso de 3 minutos (paleta 285 rpm y planetario 124 rpm).

El equipo utilizado fue un calorímetro isotérmico Calmetrix, modelo I-Cal 8000 HPC y la cantidad de pasta colocada dentro del equipo fue de 15 g. Se definieron la temperatura y duración de ensayo como 20°C y 48 horas respectivamente. Los ensayos se realizaron de acuerdo con los lineamientos que se encuentran en [1], en caso necesario, los procedimientos fueron adecuados a las instalaciones del laboratorio.

Resultados

La Figura 5 presenta los resultados de calorimetría para los cementos C1, C2 y C3, con y sin incorporación de aditivo reductor de agua de última generación.

Comparando los resultados para las muestras sin aditivos, es posible apreciar a grandes rasgos un comportamiento similar en la hidratación de los silicatos, con valores de liberación de calor máximos en el entorno de 3 mW/g.

El cemento C3 presentó mayor calor de hidratación durante la reacción de los silicatos (adjudicada al pico máximo). Pudiéndose observar también mayor variabilidad en la formación de etringita secundaria y su posterior conversión en mono-sulfatos.

Si se analizan las propiedades de las muestras de cemento, se aprecia que si bien el cemento C3 presentó mayor pico máximo de calor, la cantidad de C_3S en su composición mineralógica resultó menor que en las demás muestras. Sin embargo, la angulosidad de sus partículas aumentó su velocidad de hidratación, implicando en una leve reducción del período inactivo y un aumento en el pico máximo de calor generado.

Analizando los resultados obtenidos para las pastas con incorporación de aditivo, se destaca que las muestras presentaron un comportamiento similar previo a la hidratación de los silicatos, donde puede apreciarse un retardo similar en el tiempo de inicio del fraguado.

La pasta del cemento C3 presentó mayor calor liberado (en el entorno de 3 mW/g) que la del cemento C1. Sin embargo, la muestra C2 fue la que presentó mayor pico máximo de liberación de calor. Observándose un comportamiento diferente al obtenido para las pastas sin aditivo.

Analizando la liberación máxima de calor, se ve la influencia del aditivo en las dos muestras cuya molienda se realizó mediante el molino vertical, presentando mayor superficie específica y por ende mayor dispersión de las partículas; implicando una disminución del pico máximo de calor al añadir el aditivo.

La hidratación de los aluminatos de la pasta C1 se vio afectada por la incorporación del aditivo, obteniéndose un pico más pronunciado. La incorporación de aditivos reductores de agua de última generación inhibe la hidratación de los aluminatos, retardando la formación secundaria de etringita.

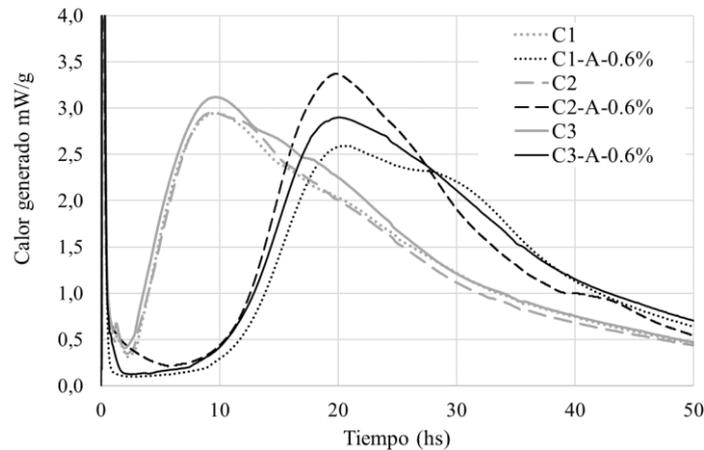


Figura 5. Calorimetrías obtenidas de las pastas con y sin incorporación de aditivo

Conclusiones

Se constató que el tipo de molienda influye en la morfología de las partículas. Cuando se utiliza el molino de bolas la molienda es realizada por el machaqueo de la muestra mediante unas bolas de acero [2], que permiten que las partículas obtenidas presenten morfología aproximadamente esférica. En el caso del molino vertical la molienda es realizada por el paso de las partículas por debajo de rodillos de acero que las rompen mediante esfuerzo a compresión [2], obteniéndose partículas con mayor angulosidad.

Se observó que la morfología de las partículas afecta la hidratación de los aluminatos, generando mayor variabilidad en la formación secundaria de etringita y su posterior formación en mono-sulfato. La hidratación de los silicatos no se vio directamente afectada por el tipo de molienda, debido a su dureza. Sin embargo, se apreció que el aumento de la reactividad de las partículas aumentó la velocidad de reacción, disminuyendo el período inactivo y aumentando el pico máximo de calor generado.

Se comprobó la influencia de la morfología del cemento en la hidratación de las pastas cuando son incorporados aditivos reductores de agua de última generación. Al entrar en contacto el aditivo con el cemento, este es adsorbido a la superficie de las partículas, generando su dispersión. Cuando el cemento es molido mediante molino vertical incrementa la angulosidad y la superficie específica de la muestra, aumentando la adsorción del aditivo y consecuentemente la dispersión entre las partículas de cemento. Esto provoca que disminuya su interacción y por ende el calor máximo generado.

Referencias

- [1] Scrivener K. Snellings R. Lothenbach B., "A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials", (13: 978-1-4987-3867-5), Edición 20151020, Taylor & Francis Group, LLC, (2016), 530.
- [2] Balzamo H. Bascoy A.D. Bonavetti V. *et al*, "Ese material llamado hormigón", AATH, (2012), 387.
- [3] Hewlett P.C. Liska.M "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, 2019, 858.
- [4] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, UNIT 1083:2003, "Cemento – Cálculo de la composición potencial del Clinker pórtland", 2003, 7.

ANEXO 3: Comparación dosificación objetivo y métodos de dosificación

En esta sección se propone analizar las recomendaciones por los autores seleccionados y las dosificaciones inicial y objetivo. La Tabla A3.0.1 y la Tabla A3.0.2 presentan las dosificaciones e indicadores de las mezclas y la Figura A3.1 las granulometrías junto a la curva de mayor compacidad según el método de A&A modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007).

A modo de comparación, se determinaron las curvas granulométricas para las dosificaciones y se calculó el indicador “IDE”, que representa en valor absoluto la diferencia entre la curva teórica ideal según el método de A&A (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) y la curva práctica obtenida.

La segunda columna de la Tabla A3.0.1 muestra la dosificación determinada mediante las recomendaciones de Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) para la resistencia buscada. A efectos de comparación, se escogió una combinación de agregado fino compuesta por 50% de arena fina y 50% de arena gruesa, ya que el método carece de recomendaciones específicas para ello. No se incorporó PEF en sustitución del cemento, dado que los sistemas aglomerantes recomendados por Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) no consideran la implementación de PEF, sino el uso de adiciones activas. Si bien se graficó la curva granulométrica y se determinó el indicador IDE, no se realizaron iteraciones mediante el método de A&A modificado (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007).

La tercera columna presenta la dosificación determinada mediante el método de A&A (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007), que implicó la iteración de todos sus parámetros. Se utilizó, a modo de comparación, la misma masa de agua recomendada por el método de Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990). Es notable que la búsqueda de la curva de mayor compacidad para los materiales utilizados permite hasta un 8% de sustitución de cemento por PEF sin modificar el valor mínimo del IDE obtenido, logrando así una mezcla más sustentable.

Tabla A3.0.1. Dosificación inicial, objetivo y recomendaciones de los autores

Dosificación	Mehta Aïtcin	A&A	Inicial	Objetivo
Cemento (kg/m ³)	542,5	527,0 - 484,8*	522,4	653,8
PEF (kg/m ³)	0,0	0,0 – 37,3*	24,0	0,0
Arena Fina (kg/m ³)	333,4	403,2	415,8	230,7
Arena Gruesa (kg/m ³)	328,3	705,9	573,3	518,0
PP 5-14 (kg/m ³)	1034,9	598,5	660,3	800,0
Agua (kg/m ³)	150,0	150,0	165,4	170,0
Aditivo (g/m ³)	5,4	5,3 – 4,8*	5,2	5,2

* La curva de mayor compacidad permitió una incorporación máxima de PEF del 8% sin modificar el IDE de la mezcla.

Tabla A3.0.2. Indicadores dosificación inicial, objetivo y recomendaciones de los autores

Indicadores/Dosificaciones	Mehta Aïtcin	A&A	Inicial	Objetivo
Relación a/c	0,28	0,28 – 0,31	0,30	0,26
Relación a/finos*	0,28	0,28 – 0,29	0,32	0,26
Pasta (%)**	35	34	36	41
Agregados (%)	65	66	63	59
Agregado Fino (%)	25	43	38	29
Arena Fina (%)	***	15,3	16	9
Arena Gruesa (%)	***	27,3	22	20
Agregado Grueso (%)	40,0	22,9	25	31
IDE (Método A&A)	0,69	0,23	0,35	0,70
MF	2,48	2,83	2,44	2,66

*Se consideran finos el cemento y el PEF

**Para el cálculo de la pasta se consideran los finos, el agua, los aditivos y 2% de aire.

***El método no determina la proporción entre las arenas, a modo de comparación para obtener la curva del método de A&A se considera una proporción de 50% AF - 50% AG.

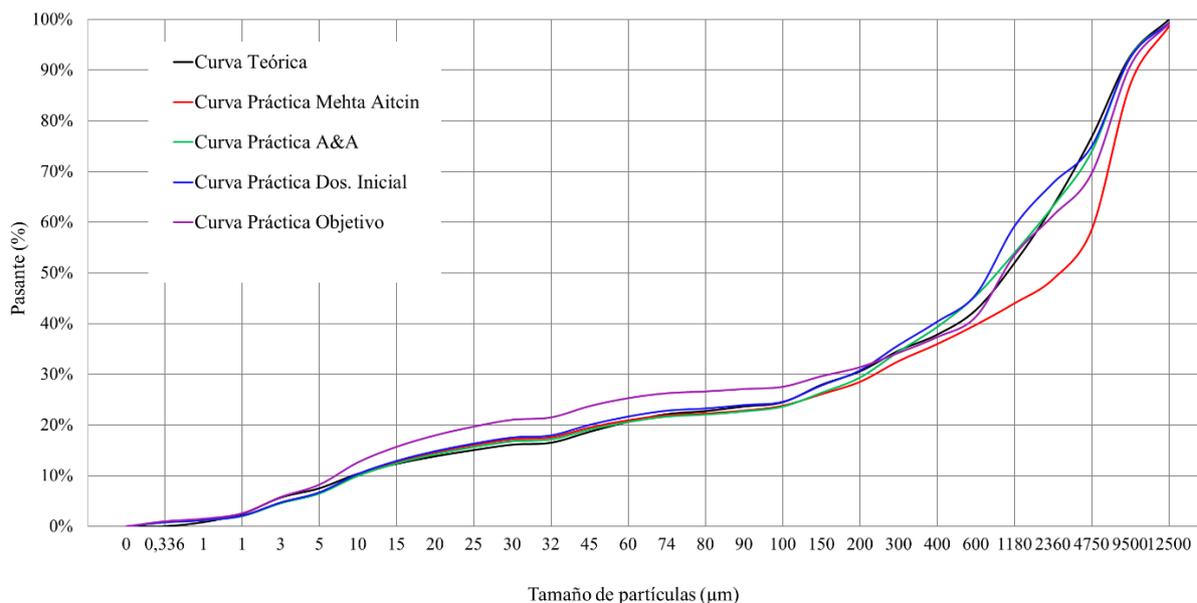


Figura A3.1. Curvas de compacidad de las mezclas correspondientes a las dosificaciones propuestas por Mehta Aïtcin, A&A y las dosificaciones propuestas como inicial y objetivo.

Se observa que ambos métodos recomiendan porcentajes similares en cuanto a la consideración de pasta y esqueleto granular; sin embargo, difieren en la combinación óptima entre los agregados. Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) recomiendan, para la resistencia buscada, una masa de agregado grueso en el entorno de los 1000 kg sin considerar su granulometría. Sin embargo, para obtener la curva más compacta es necesario, con los materiales utilizados, disminuir el volumen de piedra prácticamente a la mitad, aumentando la cantidad final de arenas, lo que implicará una mayor demanda de agua debido al aumento de la superficie específica.

Se destaca que la dosificación inicial nace de las combinaciones de ambos métodos, pero al ajustarse experimentalmente, fue necesario aumentar el volumen de agua para obtener una mezcla relativamente trabajable, lo que aumentó la cantidad de pasta requerida y disminuyó

consecuentemente el volumen de agregados. Es importante notar que el aumento de la cantidad de arenas en sustitución de la piedra, como recomienda el método de A&A (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007), incrementa la superficie específica y, por ende, la cantidad de agua retenida por las mismas, lo que explica el aumento de agua determinado experimentalmente. Aumentar únicamente el contenido de agua sin modificar la masa de cemento representó un aumento de la relación a/c e inevitablemente una disminución de la resistencia buscada.

Durante la determinación de la dosificación objetivo, se observó que la implementación de PEF aumentaba la viscosidad de la mezcla, disminuyendo la trabajabilidad. Si bien la sustitución de cemento permite obtener una mezcla más sustentable, es importante considerar que muchos de los métodos de dosificación, como el de Mehta Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990), consideran principalmente cementos normales, que según nuestra normativa (UNIT 20) permite un 95% de clinker. Sin embargo, con el avance de las tecnologías y el enfoque en la sostenibilidad, hoy en día se implementan cementos con altos contenidos de adiciones en sustitución del clinker. Es interesante destacar que la dosificación objetivo se obtuvo utilizando un cemento compuesto con un porcentaje de clinker del 83%, implicando una mezcla relativamente sustentable.

Otra observación importante es el volumen de agregado grueso. Aunque fue necesario aumentar el agregado grueso planteado en la dosificación inicial, sus valores se encuentran aproximadamente en un punto intermedio entre los recomendados por los métodos de Mehta-Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) y el de A&A (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007). Implementar el volumen recomendado por A&A (De Castro y Pandolfelli, 2009), (Tutikian y Alegre, 2007) no solo resultó en una menor resistencia, sino también en una menor trabajabilidad. Sin embargo, utilizar el volumen recomendado por Mehta-Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) mostró un aspecto “grueso” de la mezcla, debido principalmente a la falta de pasta para rodear las partículas de agregados.

Se debe considerar que los métodos de dosificación suponen que las partículas de los agregados tienen una forma redondeada o “equidimensional”, lo cual difiere sustancialmente del agregado triturado, como en el caso de la piedra partida. Si comparamos la forma de la partícula con una esfera perfecta, una partícula angulosa o no redondeada presentará una mayor superficie específica y rugosidad, lo que requerirá mayor contenido de pasta para rodearla y aumentará el volumen de agua retenida en su superficie. Es esperable que cuando analizamos el volumen del agregado grueso, los valores recomendados por Mehta-Aïtcin (Mehta y Aïtcin, 1990) den la sensación de una mezcla visualmente gruesa, con escasez de pasta, implicando la necesidad de aumentar su contenido para los materiales utilizados.

Aunque los métodos de dosificación permiten determinar una mezcla de partida, las propiedades obtenidas están fuertemente vinculadas a los materiales disponibles, lo que implica diferencias entre las dosificaciones teóricas y las obtenidas experimentalmente. Se observa la gran influencia que tienen no solo el tamaño de las partículas, sino también su forma y angulosidad.

Analizando en mayor detalle la dosificación objetivo, se observa que, para alcanzar la resistencia y trabajabilidad buscadas, fue necesario aumentar el contenido de agua manteniendo una baja relación a/c, lo que implicó un elevado contenido de cemento. Obteniéndose finalmente un hormigón con un alto contenido de pasta, un volumen medio de agregado grueso

y un módulo de finura dentro del rango recomendado por Aïtcin para hormigones de alto desempeño (Aïtcin, 1998).