



**UTN** Universidad  
Tecnológica  
Nacional   
**Facultad Regional Córdoba**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA

TESIS DE DOCTORADO EN INGENIERÍA – MENCIÓN MATERIALES

HORMIGONES CON ADICIONES ACTIVAS: DISEÑO,  
OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN CON CRITERIO DE  
SUSTENTABILIDAD

Autor Bárbara Belén Raggiotti  
Ingeniera Civil por la Universidad  
Tecnológica Nacional – FR Córdoba

Directora María Josefina Positieri  
Doctora Ingeniera Civil

Co Director Julio Daniel Fernández  
Geólogo

Para optar por el título de:  
Doctora en Ingeniería, mención Materiales  
Resoluciones CONEAU 1181-11 y 254-13, Carrera 4486, Categoría “A”

Córdoba, Marzo de 2015



Tribunal nombrado por la Comisión de Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional, el día 20 de noviembre de 2014, mediante Resolución N° 1964/2014 del Consejo Superior.

Jurado: Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.

Jurado: Dr. Eduardo Herrero.

Jurado: Dra. Mariana Gatani.

Realizado el acto de defensa y lectura de tesis el día 18 de marzo de 2015 en la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional.

.....  
Jurado: Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.

.....  
Jurado: Dr. Eduardo Herrero.

.....  
Jurado: Dra. Mariana Gatani.



A Ángel



## Agradecimientos

Esta tesis no hubiera sido posible sin la ayuda y el apoyo de un gran número de personas e instituciones; por eso quisiera agradecer:

A la Universidad Tecnológica Nacional por otorgarme la beca para la formación de doctores.

Al CINTEMAC por abrirme sus puertas y ser el lugar donde se desarrolló esta tesis.

A mi directora de tesis, María Positieri, por su entrega, su generosidad, su preocupación/ocupación y su tiempo.

A mi codirector, Julio Fernández, por su paciencia y disposición.

A Ángel Oshiro, por todo! Por los mail, por las consultas, por las respuestas, por ser mi Wikipedia, por sus silencios, por su presencia.

A Eli! Por creer en mí.

A mi familia, por estar, por entender.

A mis amigos, por alentarme.

A los chicos del laboratorio, Nelson, Pablo, Tana, Yani, Edu, Mari, Facu, Ruso, Christian, Gustavo, Valen y Vicky, por ayudarme en tantas horas de trabajo, por estar, por aguantarme, por las risas...

A Claudia, Adriana, Male, Cari, Cristian, Adrian, Roxi, Mariano, Carlos por su ayuda y comprensión.

A Iris, Eli, Mery Joe, Naty y Caro por la terapia de doctorandas!

A Francisco Locati, por su disposición, su generosidad y su tiempo.

A Lorena Pena, por su paciencia.

A las empresas que apoyaron el desarrollo de esta tesis: DIATEC SRL, Tensolite, Sika, Loma Negra, Holcim, cantera el Gran Ombú.



## Resumen

Hoy, el hormigón es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados debido a su bajo costo, apropiadas características mecánicas y de durabilidad, así como su versatilidad para adoptar diversas formas y tamaños. Debido a la importancia del uso del hormigón como material de construcción y a su impacto en el ambiente como consumidor de grandes cantidades de recursos naturales y emisor de CO<sub>2</sub> en la industria del cemento, es necesario desarrollar desde la ciencia de materiales mezclas que acompañen el crecimiento de la construcción al tiempo que consideren y tomen medidas que cuiden al ambiente; es decir desarrollar materiales energéticamente eficientes.

En los últimos años el cuidado del medio ambiente y la reducción de costos de fabricación han sido tema de discusión en la mayoría de las industrias, por lo que en la industria del cemento portland se ha impulsado el uso de materiales suplementarios, naturales, residuales o subproductos que requieran menos energía de producción.

En respuesta a esto y considerando los problemas medioambientales se propone en esta tesis investigar sobre hormigones con la incorporación de una zeolita natural como reemplazo parcial en distintos porcentajes del cemento en hormigones estructurales.

La zeolita es un mineral disponible en el país, sin investigación previa a nivel local en mezclas cementicias, que tiene en su composición SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reactivos, lo que ofrece una actividad puzolánica potencial al contribuir a la resistencia del hormigón a través de la reacción con el Ca(OH)<sub>2</sub> de la hidratación del cemento; por lo que la reactividad puzolánica de este material resulta muy interesante en el estudio de hormigones sustentables.

Se presenta el estudio de la zeolita, su caracterización, su dosificación en las mezclas, los resultados de resistencia mecánica y de durabilidad de los hormigones, su discusión y conclusión. Se trabajó con dos tipos de cementos para evaluar su influencia y el porcentaje de zeolita de reemplazo en peso del cemento utilizado.

En virtud de lo investigado, es posible incorporar zeolita natural como un nuevo material en la tecnología del hormigón, con el objeto de mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad y como contribución al cuidado del medio ambiente y a la reducción de costos en la fabricación de hormigones debido a la factibilidad del menor consumo de cemento.



## Abstract

Nowadays, concrete is one of the most widely used construction materials, due to its low cost, appropriate mechanic characteristics, durability and versatility to adopt different forms and sizes. Due to the importance of the use of concrete as a construction material and its impact in the environment as a consumer of important quantities of natural resources and as a CO<sub>2</sub> emitter in the cement industry, it becomes necessary for the materials science to develop mixtures that go along with the growth of the construction industry and that at the same time, consider and take into account the environment; that is, it is necessary to develop energetically efficient materials.

In the last years, the protection of the environment and the reduction of costs of production have been topics for discussion in the majority of industries. Therefore, in the Portland cement industry, the use of supplementary, natural, residual materials or sub products that require less energy has been boosted.

In response to this, and taking into consideration the environmental problems, this work seeks to investigate concrete and the incorporation of a natural zeolite as a partial replacement of cement in different percentages in structural concrete.

Zeolite is an available mineral in our country, and there is no previous research at a national level in cement mixtures. In its composition, it contains SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reactive, which offer a potential pozzolanic activity by contributing to the resistance of concrete through the reaction with the Ca(OH)<sub>2</sub> coming from the cement hydration. This is why the pozzolanic reactivity of this material turns really interesting in the study of sustainable concrete.

The study of the zeolite, its characterization, its dosage in mixtures, the results of mechanic resistance and durability in concrete, discussion and conclusion are presented in this work. Two types of cement have been used to evaluate their influence and the percentage of zeolite used as replacement in weight of the cement used in the mix.

In accordance with what has been investigated, it is possible to incorporate natural zeolite as a new material in the technology of concrete, with the purpose of improving the mechanic and durability properties and as a contribution to the protection of the environment and to the reduction of the costs in the production of concrete due to the feasibility of consuming less cement.



---

## ÍNDICE GENERAL

<b>Dedicatoria</b> .....	V
<b>Agradecimientos</b> .....	VII
<b>Resumen</b> .....	IX
<b>Abstract</b> .....	XI
<b>Índice temático</b> .....	XIII
<b>Lista de figuras</b> .....	XIX
<b>Lista de tablas</b> .....	XXIII

## ÍNDICE TEMÁTICO

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1    Introducción .....	2
1.1.1    Planteamiento del problema – justificación .....	3
1.2    Propuesta de incorporación de adiciones .....	4
1.3    Objetivos .....	6
1.3.1    Objetivo general .....	6
1.3.2    Objetivos específicos .....	6
1.4    Programa teórico experimental y metodología .....	7
1.4.1    Plan de Trabajo .....	7
1.5    Estructura de la tesis .....	9
Capítulo 2: CIENCIA DE MATERIALES .....	13
2.1    Introducción .....	14
2.1.1    Ciencia de materiales .....	14
2.1.2    Importancia de la ciencia de materiales .....	15
2.1.3    Campo de estudio de la ciencia de materiales .....	16
2.2    Concepto de composite .....	18
2.2.1    Materiales compuestos reforzados con partículas .....	21
2.3    Hormigón como material compuesto .....	22

2.3.1	Composición del hormigón: Cemento, agua, agregado grueso, agregado fino, aditivos y adiciones.....	23
2.3.2	Hidratación del cemento Portland. Pasta de cemento hidratada.....	33
2.3.3	Interfaz pasta agregado.....	37
Capítulo 3: ADICIONES.....		39
3.1	Concepto.....	40
3.2	Clasificación.....	41
3.2.1	Material Cementante.....	42
3.2.2	Material Pozolánico.....	42
3.2.3	Fíller.....	43
3.3	Efectos químicos y físicos de las adiciones.....	44
3.4	Hormigón con adiciones.....	45
3.4.1	¿Por qué utilizar adiciones? Ventajas de su uso.....	46
3.4.2	Su uso a nivel mundial.....	47
Capítulo 4: ZEOLITA.....		51
4.1	Concepto.....	52
4.2	La zeolita desde un punto de vista químico.....	54
4.2.1	Definición.....	54
4.2.2	Clasificación de las zeolitas según el tamaño de poros.....	55
4.2.3	Estructura.....	56
4.2.4	Clasificación estructural de las zeolitas.....	56
4.3	Estudios realizados a nivel mundial.....	59
4.4	Antecedentes nacionales.....	62
4.5	Yacimientos de las zeolitas naturales.....	64
4.6	Caracterización del material zeolítico.....	64
4.6.1	Espectroscopia por fluorescencia de rayos X.....	65
4.6.2	Determinación de densidad según picnómetro.....	65
4.6.3	Determinación del área superficial.....	66
4.6.4	Distribución Granulométrica.....	67
4.6.5	Caracterización mediante Difractometría de Rayos X (DRX).....	67
4.6.6	Análisis por espectroscopia IR.....	67
4.6.7	Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	68
4.6.8	Microanálisis Semicuantitativo por Sonda de electrones (EDS).....	69
4.6.9	Microscopia electrónica de barrido por electrones secundarios (SEM-ES).....	69
4.6.10	Microscopia electrónica de barrido acoplada a un sistema de Espectroscopia de energía dispersiva (EDS: Energy Dispersive Spectroscopy).....	70

4.6.11	Análisis térmicos.....	70
Capítulo 5: PROGRAMA EXPERIMENTAL. MATERIALES, DOSIFICACIONES Y METODOLOGÍA		73
5.1	Introducción.....	74
5.2	Materiales.....	74
5.2.1	Cemento.....	74
5.2.2	Aditivo.....	75
5.2.3	Agua.....	76
5.2.4	Agregado grueso.....	77
5.2.5	Agregado fino.....	78
5.2.6	Zeolita.....	79
5.3	Mezclas y metodología.....	80
5.3.1	Variables.....	80
5.3.2	Dosificaciones.....	80
5.3.3	Procedimiento de mezclado.....	85
5.3.4	Metodología.....	86
Capítulo 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		97
6.1	Caracterización físico química de la zeolita.....	98
6.1.1	Espectroscopia por fluorescencia de rayos X.....	98
6.1.2	Densidad.....	99
6.1.3	Área superficial.....	100
6.1.4	Granulometría.....	101
6.1.5	Difractometría de Rayos X (DRX).....	103
6.1.6	Análisis por espectroscopia IR.....	104
6.1.7	Microanálisis Semicuantitativo por Sonda de electrones (SEM – EDS).....	105
6.1.8	Análisis térmicos.....	109
6.2	Comportamiento en estado fresco.....	111
6.2.1	Consistencia.....	111
6.3	Comportamiento en estado endurecido.....	113
6.3.1	Resistencia a compresión.....	113
6.3.2	Resistencia a tracción por compresión diametral.....	121
6.3.3	Módulo elástico.....	122
6.3.4	Absorción de agua.....	127
6.3.5	Succión capilar.....	128
6.3.6	Permeabilidad al Aire.....	131
6.3.7	Penetración de agua a presión.....	135

6.3.8	Profundidad de carbonatación.....	136
Capítulo 7: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		139
7.1	Consideraciones generales .....	140
7.2	Conclusiones sobre la caracterización físico química de la zeolita .....	140
7.3	Conclusiones sobre las mezclas en estado fresco .....	141
7.4	Conclusiones sobre los hormigones en estado endurecido .....	142
7.4.1	Resistencia mecánica.....	142
7.4.2	Indicadores de durabilidad.....	144
7.5	Conclusiones finales.....	147
7.6	Trabajo futuro .....	148
7.6.1	Líneas de investigación futuras .....	148
Anexo I: ESTADIA EN LA UNIVERSIDADE ESTADUAL VALE DO ACARAÚ. PROYECTO: “DISEÑO DE MEZCLAS CEMENTICIAS ECOLÓGICAS CON EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA UN AMBIENTE SUSTENTABLE”. TRABAJO EXPERIMENTAL CARNAÚBA. ....		151
8.1	Proyecto: Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable.....	152
8.1.1	Objetivos del Proyecto .....	153
8.1.2	Convocatoria: Proyectos de fortalecimiento de redes interuniversitarias VI ..	153
8.2	Introducción: Polvo de Carnaúba .....	154
8.2.1	Antecedentes carnaúba.....	155
8.3	Trabajo experimental.....	155
8.3.1	Materiales y métodos.....	156
8.3.2	Dosificaciones .....	161
8.3.3	Resultados y análisis .....	162
8.4	Conclusiones .....	167
Anexo II: TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA AL MEDIO LOCAL. TRABAJO EXPERIMENTAL EN INDUSTRIA DE PREMOLDEADOS .....		169
9.1	Empresa local de premoldeados y pretensados de hormigón .....	170
9.1.1	Producción de viguetas .....	171
9.2	Introducción.....	171
9.2.1	Obejtivo .....	173
9.3	Trabajo experimental.....	173

---

9.4	Materiales .....	174
9.4.1	Cemento .....	174
9.4.2	Ceniza volante [CV].....	174
9.4.3	Agregado grueso.....	175
9.4.4	Agregado fino .....	175
9.4.5	Agua .....	175
9.5	Diseño de hormigones .....	176
9.5.1	Resultados y análisis .....	176
9.6	Conclusiones .....	182
Anexo III: PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.....		185
10.1	Trabajos presentados en congresos con referato .....	186
10.1.1	Año 2011.....	186
10.1.2	Año 2012.....	187
10.1.3	Año 2013.....	188
10.1.4	Año 2014.....	190
10.2	Trabajos presentados en congresos no publicados.....	192
10.2.1	Año 2012.....	192
10.3	Artículos en revistas indexadas .....	194
10.4	Participación en proyectos I+D .....	195
10.5	Pasantías .....	196
10.6	Formación de recursos humanos .....	197
10.6.1	Codirectora de beca de investigación de grado .....	197
10.6.2	Curso: Hormigón, tecnología, propiedades, materiales y producción.....	200
10.7	Actividad docente .....	200
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		201



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Clasificación de materiales compuestos (Callister, 1995) .....	18
Figura 2.2 Algunos ejemplos de materiales compuestos: (a) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminar de capas de chapas de madera. (b) La fibra de vidrio es un compuesto reforzado por fibra, que contiene largas fibras rígidas de vidrio en una matriz polimérica más blanda (x175). (c) El hormigón es un compuesto particulado, que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento.....	20
Figura 2.3 Modelo Feldman-Sereda para SCH. (Neville, 2012). .....	35
Figura 3.1 Esquema del diagrama ternario de fases $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .....	41
Figura 5.1 Granulometría del agregado grueso .....	77
Figura 5.2 Granulometría del agregado fino .....	79
Figura 5.3 Moldes para probetas .....	85
Figura 5.4 Probeta ensayada a compresión axial .....	87
Figura 5.5 Probeta ensayada a tracción por compresión diametral. ....	88
Figura 5.6 Determinación del módulo elástico .....	88
Figura 5.7 Probetas durante la determinación de la capacidad de succión capilar.....	91
Figura 5.8 Zonas con distinta clase de permeabilidad al aire .....	93
Figura 5.9 Medición de la permeabilidad al aire con equipo PermeaTORR™.....	93
Figura 5.10 Resistencia a penetración de agua a presión .....	94
Figura 5.11 Probetas rociadas con fenolftaleína para determinación de carbonatación.....	95
Figura 6.1 Picnómetro con agua destilada a la izquierda y con agua y la muestra a la derecha .....	100
Figura 6.2 Curvas de frecuencia acumulada y relativa para el material puzolánico que pasa el tamiz #18 (1000 micras). ....	102
Figura 6.3 Patrón de difracción del material puzolánico. z: zeolita, g: yeso, p: plagioclasa, b: biotita, q: cuarzo.....	104
Figura 6.4 Espectro FTIR del material zeolítico en absorbancia.....	104
Figura 6.5 Imagen mediante SEM de los cristales laminares de clinoptilolita-Na. ....	106
Figura 6.6 FE-SEM-EDS. a) Imagen de electrones secundarios del material puzolánico (18 kV). b-f) mapas de composición de Si (b), de Al (c), Na (d), K (e) y Mg (f), de un mismo sector ..	108
Figura 6.7 FE-SEM-EDS. g-j) Mapas composicionales de S (g), Ca (h), Fe (i) and Ti (j), del sector estudiado en la Figura 6.6a .....	108
Figura 6.8 Diagrama DSC-TG del material puzolánico. La línea de trazos representa la pérdida de masa (%) determinada por TG y la línea continua representa la diferencia de temperatura ( $\mu\text{V} / \text{mg}$ ) determinada por DSC. ....	110
Figura 6.9 Curva DTA de la muestra zeolítica.....	110
Figura 6.10 Evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo de todos los hormigones.....	119
Figura 6.11 Evolución de resistencia a compresión, serie con CPN .....	119
Figura 6.12 Evolución de resistencia a compresión, serie con CPC.....	120
Figura 6.13 Relación entre resistencia a tracción y compresión a 28 días .....	122

Figura 6.14 Módulo elástico según expresiones matemáticas de Reglamentos Internacionales .....	126
Figura 6.15 Succión capilar serie CPN.....	130
Figura 6.16 Succión capilar serie CPC .....	131
Figura 6.17 Permeabilidad al aire serie CPN .....	132
Figura 6.18 Permeabilidad al aire serie CPC.....	133
Figura 6.19 Relación entre la resistencia a compresión y la permeabilidad al aire a los 90 días. .....	133
Figura 6.20 Relación entre la absorción y la permeabilidad al aire a los 90 días.....	134
Figura 6.21 Relación entre la succión capilar y la permeabilidad al aire a los 90 días.....	134
Figura 6.22 Medición de profundidad de carbonatación en probetas .....	137
Figura 6.23 Profundidad de carbonatación a 365 días.....	137
Figura 8.1. Copernicia prunifera .....	156
Figura 8.2 Secado de las hojas de carnaúba para la posterior extracción del polvo. Fuente: Fernandez Texeira Mesquita (2011).....	156
Figura 8.3 Curva granulométrica del agregado fino.....	158
Figura 8.4 Curva granulométrica del agregado Grueso.....	159
Figura 8.5 Aditivo empleado.....	160
Figura 8.6 Materiales finos de los hormigones .....	161
Figura 8.7 Resistencia a compresión .....	163
Figura 8.8 Evolución de la resistencia a la compresión .....	164
Figura 8.9 Resistencia a tracción .....	165
Figura 8.10 Relación entre el módulo elástico y la resistencia a compresión a 28 días .....	166
Figura 9.1 Proceso de fabricación: mezcladora y tolva de descarga.....	173
Figura 9.2 Máquina viguetera.....	173
Figura 9.3 Viguetas frescas ya moldeadas.....	173
Figura 9.4 CV <sub>20</sub> durante el mezclado .....	177
Figura 9.5 Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo. ....	178
Figura 9.6 Succión capilar.....	180
Figura 9.7 Resultados de ensayo de succión capilar. ....	180

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Estructura del hormigón, como material compuesto (Zerbino, 1998).....	23
Tabla 2.2 Normas de la calidad de agua para empleo en morteros y concretos. (Kosmatka et al., 2004) .....	25
Tabla 2.3 Requisitos químicos del agua de mezclado y curado. (Norma IRAM 1601, 2012) ...	26
Tabla 3.1 Datos estadísticos de consumo de CV en la industria de la construcción.....	49
Tabla 4.1 Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de poros. (Csicsery, 1984). .....	55
Tabla 4.2 características generales de las zeolitas. (Whyte & Dalla Betta, 1982). .....	55
Tabla 4.3 Clasificación estructural de las zeolitas según Meier, Olson & Baerlocher (1996). .	58
Tabla 4.4. Investigaciones previas de la utilización de zeolita natural en el cemento y compuestos de hormigón.....	61
Tabla 5.1 Características de los cementos utilizados. ....	75
Tabla 5.2 Composición de los cementos utilizados.....	75
Tabla 5.3 Características del aditivo plastificante .....	76
Tabla 5.4 Características del agregado grueso .....	77
Tabla 5.5 Características del agregado fino.....	78
Tabla 5.6 Clases de resistencia de hormigón según CIRSOC 201 .....	81
Tabla 5.7 Contenido mínimo de material que pasa por el tamiz IRAM 300 µm en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso (CIRSOC 201) .....	82
Tabla 5.8 Dosificación para hormigones para un m <sup>3</sup> de mezcla .....	84
Tabla 5.7 Clasificación de la Permeabilidad al aire según parámetro kT .....	92
Tabla 6.1 Composición química (%) del material puzolánico determinada por FRX (LOI: Pérdida de ignición) .....	98
Tabla 6.2 Pesos en gramos para la determinación de densidad según picnómetro de la zeolita .....	100
Tabla 6.3 Granulometría de fracción más gruesa del material puzolánico. ....	102
Tabla 6.4 Composición semi-cuantitativa (EDS) de la clinoptilolite-Na. Recalculada al 100% considerando 13.5% de H <sub>2</sub> O (H <sub>2</sub> O promedio de cinco análisis de Sheppard & Gude 1969). ..	106
Tabla 6.5 Asentamientos de los hormigones .....	112
Tabla 6.6 Resistencia a compresión a distintas edades. ....	114
Tabla 6.7 Rangos de Duncan para las resistencia a compresión de la serie con CPN a los 7 días .....	117
Tabla 6.8 Resultados del test de Duncan para las resistencias a compresión .....	117
Tabla 6.9 Resistencia a tracción por compresión diametral a 28 días .....	121
Tabla 6.10 Módulo elástico a 28 y 90 días .....	123
Tabla 6.11 Relación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico.....	124
Tabla 6.12 Expresiones del módulo de elasticidad según Reglamentos Internacionales.....	125
Tabla 6.13 Absorción de agua a 90 días .....	127
Tabla 6.14 Resultados de succión y velocidad capilar.....	128
Tabla 6.15 Resultados de permeabilidad al aire .....	131
Tabla 6.16 Profundidad de la penetración de agua a presión .....	135

Tabla 8.1 Características del agregado fino.....	158
Tabla 8.2 Características del agregado grueso.....	159
Tabla 8.3 Composición del cemento. Componentes en % de la masa total .....	160
Tabla 8.4 Dosificación para hormigones para un m <sup>3</sup> de mezcla .....	162
Tabla 8.5 Asentamiento.....	162
Tabla 8.6 Módulo elástico .....	165
Tabla 8.7 Absorción por inmersión e índice de vacíos .....	167
Tabla 9.1 Ceniza volante. Caracterización.....	174
Tabla 9.2 Dosificaciones .....	176
Tabla 9.3 Resistencias a compresiones alcanzadas en MPa. ....	177
Tabla 9.4 Módulos elásticos en GPa.....	179
Tabla 9.5 Clases de permeabilidad .....	181
Tabla 9.6 Resultados de ensayo de permeabilidad al aire .....	181
Tabla 9.7 Valores de absorción.....	182

---

## SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA

### Química del cemento

☐	Grado de hidratación
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro
K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio
MgO	Óxido de magnesio
SO <sub>3</sub>	Óxido de azufre
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sodio
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico
C <sub>3</sub> S	ASilicato tricálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de Calcio
CH	Hidróxido de calcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de calcio
SCH	Silicato de calcio hidratado
C <sub>6</sub> AS <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	Etringita
C <sub>5</sub> H <sub>2</sub>	Yeso
CaASH <sub>12</sub>	Monosulfoaluminato de calcio hidratado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CPN	Cemento Portland Normal
CPC	Cemento Portland Compuesto
CV	Ceniza Volante

### Técnicas de caracterización

ATG	Análisis Termogravimétrico
DTA	Análisis Térmico Diferencial
DSC	Calorimetría Diferencial de barrido
DSC-TG	Calorimetría Diferencial de barrido termogravimétrico
TG	Termogravimetría
SEM	Microscopía electrónica de barrido
SEM-ES	Microscopía electrónica de barrido por electrones secundarios
SEM-EDS	Microscopía electrónica de barrido. Espectroscopia de energía dispersiva
FE-SEM-EDS	Microscopía electrónica de barrido con emisión de campo. Espectroscopia de energía dispersiva
EDS	Espectroscopía de energía dispersiva. Microanálisis por sonda de electrones
SEM	Microscopía electrónica de barrido
DRX	Difracción de rayos X
FTIR	Espectrometría Infrarroja con transformada de Fourier

SA	Área superficial
SEB	Superficie específica Blaine

Centros de investigación

CICTERRA	Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. UNC – CONICET.
CINTEMAC	Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad. UTN.
CIRSOC	Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. INTI: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
CITeQ	Centro de Investigación y Tecnología Química. UTN - CONICET

## Capítulo 1

<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>
---------------------------------

En el apartado 1.1 de este capítulo se presenta una introducción del trabajo de investigación que se desarrolla en esta tesis, la problemática planteada que dio lugar a la investigación y el enfoque del análisis realizado.

En el apartado 1.2 se plantea la propuesta de incorporación de adiciones ante la problemática encontrada. En el apartado 1.3 se describen los objetivos generales y particulares de la investigación y el alcance de la misma. El programa teórico experimental y la metodología se presentan en el apartado 1.4 y finalmente en el apartado 1.5 se presenta la estructura de esta tesis.

## 1.1 Introducción

La fabricación de hormigón implica un importante consumo de recursos naturales y un aporte de residuos que deben ser eliminados o minimizados; la propuesta de esta investigación es contribuir al diseño de hormigones con vistas a un medio ambiente sustentable.

Desde la óptica del medio ambiente se considera que la elaboración del clinker Portland produce:

- alto consumo de materias primas,
- alto consumo de energía (» 5% de la energía industrial).
- la emisión de entre 730 y 990 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por tonelada de material procesado (Battelle, 2002).

Considerando que, la mayor cantidad de emisión de CO<sub>2</sub> se produce por la calcinación de la piedra caliza y el empleo de combustibles fósiles, será necesario, para cumplir las cuotas de emisiones impuestas en el Protocolo de Kyoto, reducir la cantidad de clinker en el cemento y aumentar la eficiencia del proceso de elaboración para disminuir el consumo de combustibles fósiles.

Es conocido que en condiciones normales, para la elaboración de una tonelada de clinker Portland, se requiere entre 1,5 y 1,6 toneladas de materiales naturales que pueden ser calcinados a altas temperaturas (aproximadamente 1400°C), y esto ocasiona un gran gasto de recursos mineros no renovables y una seria degradación del terreno en las zonas de canteras. Si se considera que un hormigón convencional contiene 12% de cemento, 8% de agua y 80% de agregados, la industria del hormigón consume unos 1600 millones de toneladas de cemento (unos 2500 millones de toneladas de materiales naturales), 1000 millones de toneladas de agua y unos 11000 millones de toneladas de agregados, lo que hace un total de 14500 millones de toneladas por año de recursos naturales. Este elevado consumo transforma a la industria del hormigón en uno de los usuarios más importantes de recursos naturales del mundo. Pero con el empleo de cemento con alto contenido de adiciones y el aumento en la edad de diseño y en la vida útil de las estructuras, el hormigón puede transformarse en un material sustentable o *green concrete* debido a que el consumo

---

de materiales y energía y su impacto ambiental se ven reducidos cuando se los evalúa integralmente a través de una vida en servicio mucho más prolongada. (Bonavetti, 2004).

Si se implementaran todos estos cambios sería posible que el hormigón, al menos desde el punto de vista del consumo de cemento, pueda transformarse en un material con desarrollo sustentable.

Esta tesis propone la incorporación de adiciones al hormigón, en este caso de zeolita natural, disminuyendo el consumo de cemento como un medio de contribución para minimizar la contaminación ambiental que produce la producción de clínker para el cemento.

Las adiciones permitidas para incorporar en la fabricación del cemento en Argentina por la norma IRAM 50000 (2010) son la escoria, la puzolana natural y el material calcáreo. La primera es un subproducto, mientras que las últimas dos adiciones, si bien no constituyen desechos, también podrían emplearse para elaborar un hormigón sustentable, debido a que disminuyen la cantidad de materia prima y el consumo de combustible para producir el cemento.

La producción de clínker precisa mucha energía y produce mucho dióxido de carbono; ésto significa que el uso de zeolita supondría un ahorro energético y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> importante.

El mundo de la construcción es muy dinámico y existe una gran demanda de alta tecnología y materiales energéticamente eficientes por lo que el empleo de la zeolita natural, que es una materia prima disponible en nuestro país, ofrece grandes oportunidades para el desarrollo de futuros materiales de construcción.

### **1.1.1 Planteamiento del problema – justificación**

El material de construcción más utilizado es el hormigón, comúnmente compuesto por una mezcla de cemento Portland con arena, piedra y agua. Por ejemplo, en el año 1963, en EE.UU. se convirtieron sesenta y tres millones de toneladas de cemento Portland en quinientos millones de toneladas de hormigón, cinco veces el consumo en peso de acero. En muchos países, la proporción del consumo de hormigón sobre el consumo de acero es de

diez a uno. Un consumo mundial total de hormigón en ese año se estimó en tres billones de toneladas, o sea, una tonelada por cada ser humano vivo. No hay material más consumido por los seres humanos en cantidades tales, con excepción del agua. (Brunauer & Copeland, 1964).

Pero sin duda que el consumo de hormigón hoy es mucho mayor que cuarenta años atrás, y se va incrementando año a año con los nuevos avances de la industria de la construcción. Por eso desde el punto de vista de la ciencia de los materiales es importante el desarrollo de hormigones sustentables que no sólo contemplen mantener y mejorar la calidad de éstos como material estructural sino que se lo considere un elemento sustentable de construcción.

## **1.2 Propuesta de incorporación de adiciones**

Durante la historia del hormigón y con distintos objetivos se han utilizado las adiciones minerales activas, cuyas funciones cubren actualmente aspectos de índole económica, ecológica y tecnológica. Económica, porque disminuyen el contenido de cemento en el hormigón ya que el cemento consume una elevada cantidad de energía para su producción. Ecológica, porque al reemplazar parte del cemento se disminuye la emisión del CO<sub>2</sub> (compuesto que contribuye al efecto invernadero), se optimiza la utilización de los recursos no renovables que se emplean en la fabricación del mismo y además el hormigón admite, en muchos casos, subproductos o desechos industriales como materiales componentes. Y la tecnológica, porque según sus interacciones con el sistema pasta cementicia-agregado contribuyen al mejoramiento de algunas de las propiedades del hormigón (Rahhal & Eperjeci, 2012).

El uso de las adiciones minerales en la construcción civil es anterior a la invención del cemento, habiéndose iniciado, según Malhotra y Mehta (1996), en el periodo de 1500 a.C. en Grecia donde se había adoptado un material de origen volcánico, originado de erupciones ocurridas en la isla Santorini. Esas adiciones se difundieron por todo el imperio romano para ejecución de varias obras (Carpena Coitinho dal Molin, 2005).

---

En los días actuales, por ejemplo, se utilizan adiciones que son residuos provenientes de otras industrias, tal como la ceniza volante proveniente de centrales termoeléctricas. Este tipo de adiciones, si fueran consideradas sólo como un residuo, serían descartadas en grandes cantidades en lugares incorrectos, generando el riesgo de contaminación de suelo y fuentes de agua (Carpena Coitinho dal Molin, 2005).

En los últimos años el cuidado del medio ambiente y la reducción de costos de fabricación han sido tema de discusión en la mayoría de las industrias. En virtud de esto, la industria del cemento Portland ha realizado numerosos cambios, uno de los cuales impulsa el uso de materiales suplementarios, naturales, residuales o subproductos que requieran menos energía de producción. Una de las respuestas a esta problemática es la expansión del uso de los cementos puzolánicos (Fernández & Trezza, 2007). De acuerdo a Saad, De Andrade y Paulon (1982), el costo de producir puzolana es una tercera parte del costo de producción del cemento Portland, explicación por lo que su incorporación al cemento o al hormigón resulta tan beneficioso desde el punto de vista económico.

Originalmente el término puzolana fue asociado con cenizas volcánicas naturales y tierras calcinadas las cuales reaccionan con la cal a temperatura ambiente, en ambiente húmedo. Actualmente el término ha sido extendido a todos los materiales silico-aluminosos, los cuales finamente molidos, en presencia de agua, pueden reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio (CH) para formar compuestos que poseen propiedades cementicias, clasificándolas en consecuencia como puzolanas naturales y artificiales.

Si bien las mezclas cementicias con zeolita han sido ampliamente utilizadas en las construcciones desde la antigüedad, no existen registros de su utilización en hormigones en nuestro país. Hoy en día, son conocidos más de 50 minerales naturales de zeolita y 150 sintéticos que se utilizan en diversas industrias. En la industria del cemento, la zeolita natural es una puzolana natural popular en algunas regiones del mundo, pero la amplia diversidad de composiciones exige un análisis completo para su empleo. Existen antecedentes de su utilización en grandes cantidades como un tipo de material puzolánico natural en lugares como, China (Najimi, Sobhani, Ahmadi, & Shekarchi, 2012), Irán (Ahmadi & Shekarchi, 2010), Cuba (Rosell, Galloso, & Calvo, 2006), entre otros. En China, se utiliza como material de mezcla en el cemento. Según Poon, Lam, Kou y Lin (1999), la cantidad total de zeolita consumida para este propósito es de 30 millones de toneladas por año.

En Argentina, no se conocen cifras del consumo de zeolita; a pesar de utilizarse este mineral en agricultura, filtros, nutrición animal, y otros. Actualmente en el país no hay aplicaciones y uso de la zeolita natural en mezclas cementicias. Por lo que esta tesis propone la incorporación de este mineral como reemplazo parcial en distinto porcentaje del cemento en hormigones, aprovechando la disponibilidad de yacimientos de zeolita en el país.

Se considera que la incorporación de zeolita en hormigones, como tema de investigación de esta tesis, contribuye a facilitar el desarrollo, aplicación y ampliación de conocimientos sobre hormigones especiales con incorporación de zeolitas naturales en el país. Estas zeolitas, están disponibles en el país, y no han sido investigadas y utilizadas en la construcción, a pesar de su prometedor efecto puzolánico en las mezclas cementicias.

Además resulta interesante investigar la influencia de esta adición en las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco donde, las adiciones en general, afectan la trabajabilidad de las mezclas, como en estado endurecido donde influyen sobre la resistencia a compresión y en aspectos referidos a la durabilidad, como la permeabilidad.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general es el desarrollo de modelos de comportamiento de hormigones especiales utilizando alto volumen de adiciones (zeolitas naturales) que contribuyan a la sustentabilidad del medio ambiente y que puedan ser transferidos para su aplicación, desarrollando con el avance en estos conocimientos, criterios para su dosificación y propuestas de mejoras de la durabilidad.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar y caracterizar física y químicamente los materiales a utilizar.

- 
- Analizar las alternativas de elaboración de mezclas de hormigones especiales con volumen de adiciones.
  - Estudiar los modelos de comportamiento en estado fresco, propiedades físico-mecánicas y durabilidad de las mezclas elaboradas.
  - Intercambiar experiencias con los Centros de Investigación y Universidades vinculadas y divulgar los resultados en congresos y revistas científicas nacionales e internacionales.
  - Transferir las nuevas tecnologías al medio productivo, a las industrias de premoldeados, hormigón elaborado y otras.

Con el objetivo de contribuir al conocimiento de las propiedades de los hormigones con adiciones se propone un estudio teórico experimental que abarque el relevamiento del estado actual del estudio de éstos en Argentina, la revisión del estado del arte y la elaboración de una familia de hormigones con adición de zeolitas naturales; en estos hormigones se determinan sus propiedades en estado fresco y endurecido y su desempeño, midiendo parámetros indicadores de durabilidad.

El análisis de la información y de los resultados experimentales permite conocer mejor las propiedades en estado fresco y endurecido y la durabilidad de los hormigones con adición de zeolita natural y brindan la oportunidad de realizar propuestas para desarrollar criterios de dosificación y de criterios de durabilidad de estos hormigones sustentables.

## **1.4 Programa teórico experimental y metodología**

El estudio teórico-experimental propone avanzar en el diseño y conocimiento de las propiedades en estado fresco y endurecido y en la durabilidad de hormigones especiales con adición de zeolita natural como reemplazo de parte del cemento.

### **1.4.1 Plan de trabajo**

El plan experimental para el logro de los objetivos propuestos es el siguiente:

1. Estudio bibliográfico del estado del arte sobre materiales cementicios sustentables. Para cada una de las etapas se contempló una revisión continua de la bibliografía existente abordando los temas considerados importantes para una comprensión y desarrollo completo de este trabajo.
2. Caracterización de los posibles materiales para su aplicación en el diseño de los hormigones propuestos:
  - Agregados de peso normal
  - Puzolanas - zeolitas (naturales)
  - Aditivos
  - Cementos
3. Caracterización de la adición zeolita mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia por fluorescencia de rayos X. Determinación de densidad según picnómetros, determinación del área superficial, distribución granulométrica, análisis por espectroscopia IR, microanálisis semicuantitativo por Sonda de electrones (EDS) y análisis térmicos.
4. Diseño y caracterización en estado fresco de los hormigones. Estudio de dosificaciones: análisis de los métodos y criterios para optimizar las dosificaciones de cada tipo de hormigón, influencia del cemento, agregados y los aditivos. Caracterización en estado endurecido. Resistencia a compresión, tracción, módulo de deformación y aquellos que son indicadores de durabilidad, como absorción, succión capilar, permeabilidad al agua y al aire, penetración de agua a presión y profundidad de carbonatación.
5. Análisis de las variables que intervienen en los niveles de resistencia mecánica y en la durabilidad de los materiales cementicios.
6. Revisión bibliográfica, análisis y conclusiones. Recomendaciones para el diseño y uso de estos materiales.
7. Redacción, transferencia y difusión: Escritura de tesis y divulgación de la misma a la comunidad académica, a los centros de investigación, a las empresas relacionadas con la industria de la construcción, a las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales.

---

## 1.5 Estructura de la tesis

La tesis se estructura en siete capítulos y tres anexos. En primer lugar se presenta una introducción a la problemática que le dio origen a esta tesis, el estado del arte, la importancia del hormigón como composite dentro de la ciencia de materiales, el avance en el conocimiento en la incorporación de distintas adiciones en la tecnología del hormigón y el estudio y caracterización de la zeolita utilizada como adición mineral. Luego se presenta el programa experimental desarrollado considerando distintos porcentajes de reemplazo de cemento Portland normal y cemento Portland compuesto por una zeolita natural, los resultados alcanzados, el análisis y discusión de resultados, las conclusiones y finalmente las futuras líneas de investigación propuestas.

Los dos primeros anexos presentan avances alcanzados en el estudio de otras adiciones utilizadas en hormigones dentro del marco de proyectos institucionales. El tercer anexo presenta sintéticamente la producción científica desarrollada durante la producción de esta tesis.

Capítulo 1: Introducción y objetivos: Se presenta la introducción del trabajo de investigación, la problemática que dio lugar a la investigación y el enfoque abordado; la solución propuesta a la problemática y los objetivos generales y particulares de la investigación y el alcance de la misma.

Capítulo 2: Ciencia de los materiales: En este capítulo se menciona la importancia de la ciencia de materiales, su campo de estudio, la importancia del hormigón como composite. La composición del hormigón, la interacción entre sus materiales y la relación entre éstos y las propiedades físico-mecánicas alcanzadas por el hormigón.

Capítulo 3: Adiciones: Se presenta el concepto de adiciones para mezclas cementicias y una introducción de la incorporación de éstas en la tecnología del hormigón. Se incluye la clasificación de las mismas según interacción con el cemento. Se aborda el tema de hormigones con adiciones, por qué su uso, la utilización a nivel mundial y las ventajas de utilizar adiciones. Finalmente se presentan los antecedentes en el ámbito internacional, nacional y regional de la utilización de adiciones en mezclas cementicias.

Capítulo 4: Zeolita: Aborda el estudio de la zeolita como material puzolánico en mezclas cementicias. Comienza con la definición de zeolita. Se analizan las propiedades físico químicas de la zeolita y se presentan los antecedentes a nivel mundial de experiencias realizadas con el empleo de zeolitas naturales en mezclas cementicias.

Capítulo 5: Programa experimental: Se describen los materiales elegidos para la dosificación y fabricación del hormigón. Se presentan las dosificaciones y los procedimientos experimentales empleados en la ejecución de los diferentes ensayos.

Capítulo 6: Resultados y discusión: El capítulo reúne los resultados obtenidos en el trabajo experimental; Se presentan los resultados de la caracterización físico química de la zeolita, los resultados correspondientes a los hormigones en estado fresco, los resultados de los ensayos empleados en la determinación de las propiedades mecánicas del hormigón: resistencia a compresión, módulo elástico y resistencia a tracción indirecta, y los resultados de los ensayos que se consideran indicadores de parámetros de durabilidad, tales como absorción, succión capilar, permeabilidad al aire, penetración de agua a presión y profundidad de carbonatación. Discusión de resultados: Se analiza los resultados obtenidos y se discuten los mismos en función del tipo de cemento empleado y la influencia de los porcentajes de zeolita utilizada.

Capítulo 7: Conclusiones: Se presentan las principales conclusiones alcanzadas y las futuras líneas de investigación.

Anexo I: Estadía en la Universidade Estadual Vale do Acaraú. Proyecto “Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable”. Trabajo experimental carnauba: En este anexo se presenta parte del trabajo de investigación realizado con polvo de carnaúba como adición puzolánica potencial en hormigones especiales. Este trabajo se desarrolló durante una pasantía en el IEMAC, Instituto de Estudos dos Materiais de Construção, de la Universidade Estadual Vale do Acaraú en la ciudad de Sobral, estado de Ceará, Brasil en el marco del “Programa de Promoción de la Universidad Argentina” según Resolución RES-2340-Redes-VI bajo la convocatoria Proyectos de fortalecimiento de redes interuniversitarias VI.

Anexo II: Transferencia de tecnología al medio local. Trabajo experimental en la industria de premoldeados: Se presenta la transferencia del diseño y elaboración de hormigones en los

---

que se utiliza ceniza volante como adición al cemento. El trabajo se realizó en una empresa reconocida en el medio que se dedica a la fabricación de elementos premoldeados y pretensados de hormigón para viviendas.

Anexo III: Producción científica: Se mencionan los principales trabajos y actividades desarrolladas y logradas durante la tesis doctoral. Trabajos científicos publicados en congresos, talleres, jornadas, reuniones nacionales e internacionales, artículos publicados en revistas pertinentes a la temática de estudio, proyectos I+D en los que se ha participado y han dado marco a la presente investigación, formación de recursos humanos y actividad docente.

Al final de la tesis se presentan las referencias bibliográficas citadas y consultadas.



## Capítulo 2

<b>CIENCIA DE MATERIALES</b>
------------------------------

En este capítulo se menciona la importancia de la ciencia de materiales, su campo de estudio y la importancia del hormigón como composite. La composición del hormigón, la interacción entre sus materiales y la relación entre éstos y las propiedades físico-mecánicas alcanzadas por el hormigón.

En el apartado 2.3 se presenta al hormigón como un material compuesto. Se destaca la función de la pasta de cemento hidratada y la importancia de la interfaz pasta agregado.

## 2.1 Introducción

El ingeniero durante el ejercicio de su profesión se relaciona continuamente con materiales. Los ingenieros y profesionales que se dedican a la elaboración y desarrollo de productos tienen que ver con los materiales, de manera cotidiana, en manufactura y procesamientos y en el diseño y construcción de componentes o de estructuras. Deben seleccionar y utilizar materiales y analizar las fallas de los mismos.

Al seleccionar los materiales para incorporar en un producto, deben tomarse decisiones importantes. Se debe tener en cuenta de verificar que el material pueda mantener su forma y propiedades en condiciones durante su vida útil. También, si las propiedades requeridas se pueden conseguir y mantener durante el tiempo de servicio y si el material es compatible con otras partes de un ensamble y puede fácilmente unirse a ellas. Otra consideración importante de tener en cuenta es la factibilidad que tenga el material de reciclarse y que su fabricación no ocasione problemas ecológicos. Finalmente, se debe considerar la economía de la producción del material. (Askeland, 1998).

Según Ashby y Jones (1996), hay más de 50.000 materiales disponibles para el uso en ingeniería. En el diseño de una estructura o dispositivo, el modo de cómo el profesional escoge del gran menú de opciones de materiales disponibles cual se ajusta mejor a su propósito es fundamental. Una mala elección de estos puede ocasionar problemas serios. Por ejemplo, durante la Segunda Guerra Mundial, un buque mercante soldado sufrió graves daños, no por un ataque enemigo, sino por fallas en las soldaduras que derivaron que se rompiera en la mitad del mar. En esta oportunidad, la resistencia a la fractura del acero y, sobre todo, de las soldaduras fue deficiente.

### 2.1.1 Ciencia de materiales

La ciencia de materiales es un campo multidisciplinar que estudia los conocimientos fundamentales sobre las propiedades físicas macroscópicas de los materiales y los aplica en varias áreas de la ciencia, la ingeniería, la arquitectura, la tecnología de productos entre otras, consiguiendo que éstos puedan ser utilizados en obras, máquinas y herramientas

---

diversas, o convertidos en productos necesarios o requeridos por la sociedad. Incluye elementos de la química y física, así como las ingenierías química, mecánica, civil y eléctrica o medicina, biología y ciencias ambientales. Con la atención puesta de los medios en la nanociencia y la nanotecnología en los últimos años, la ciencia de los materiales ha sido impulsada en muchas universidades.

A pesar de los espectaculares progresos en el conocimiento y en el desarrollo de los materiales en los últimos años, el permanente desafío tecnológico requiere materiales cada vez más sofisticados y especializados.

La disciplina ciencia de materiales implica investigar la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales, mientras que la ingeniería de los materiales se fundamenta en las relaciones propiedades-estructura y diseña o proyecta la estructura de un material para conseguir un conjunto predeterminado de propiedades (Callister, 1995).

Normalmente la estructura de un material se relaciona con la disposición de sus componentes internos. Existen distintos niveles de observación de esta estructura. La estructura subatómica implica a los electrones dentro de los átomos individuales y a las interacciones con su núcleo. A nivel atómico, la estructura se refiere a la organización de átomos o moléculas entre sí. El próximo gran dominio estructural, que contiene grandes grupos de átomos enlazados entre sí, se denomina “microscópico” y significa que se puede observar utilizando algún tipo de microscopio. Finalmente los elementos estructurales susceptibles de apreciarse a simple vista se denominan “macroscópicos”.

Según Callister (1995), las propiedades de un material se expresan en términos del tipo y magnitud de la respuesta a un estímulo específico impuesto. Las propiedades de los materiales sólidos se agrupan en seis categorías: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas. Para cada categoría existe un tipo característico de estímulos capaz de provocar respuestas diferentes. Las propiedades mecánicas relacionan la deformación con la carga o fuerza aplicada; ejemplos de ellos son el módulo elástico y la resistencia. En las propiedades eléctricas, tales como conductividad eléctrica y constante dieléctrica, el estímulo es un campo eléctrico. El comportamiento térmico de los sólidos se representa en función de la capacidad calorífica y de la conductividad térmica. Las propiedades magnéticas se refieren a la respuesta de un material frente a la influencia de un

campo magnético. Para las propiedades ópticas, el estímulo es la radiación electromagnética o lumínica; el índice de refracción y la reflectividad son propiedades ópticas representativas. Finalmente las propiedades químicas indican la reactividad química de un material.

### **2.1.2 Importancia de la ciencia de materiales**

La importancia de la ciencia de materiales radica en el nivel con que estudia la relación entre estructura y propiedades de los materiales. Es justamente la relación propiedades-estructura-prestaciones lo que hace útil o no a cada material para una determinada función o prestación.

Probablemente la importancia de los materiales en nuestra cultura es mayor que lo que habitualmente se cree. Prácticamente cada segmento de nuestra vida cotidiana está influido en mayor o menor grado por los materiales, como por ejemplo transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, recreación y alimentación. Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. En efecto, las primeras civilizaciones se conocen con el nombre del material que alcanzó mayor desarrollo (por ejemplo, Edad de piedra, Edad de bronce).

El hombre primitivo sólo tuvo acceso a un número muy limitado de materiales, que encontró en la naturaleza: piedras, madera, arcilla, cuero y pocos más. Con el transcurso del tiempo, el hombre descubrió técnicas para producir materiales con propiedades superiores a la de los naturales.

Callister (1995) expresa que hace relativamente poco tiempo que los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento, adquirido en los últimos 50 años aproximadamente, los ha capacitado, en alto grado, para modificar o adaptar las características de los materiales.

Esta tesis pretende a partir de los conocimientos brindados por la ciencia de materiales y la tecnología del hormigón contribuir al desarrollo de un material que responda a una

---

necesidad tecnológica, económica y ambiental; a partir de materiales disponibles y en búsqueda de una aplicación concreta.

### **2.1.3 Campo de estudio de la ciencia de materiales**

La Ciencia de Materiales se encarga del estudio de la preparación, estructura cristalina y propiedades físicas y químicas de los materiales, y de cómo adaptarlos a usos específicos.

La finalidad del estudio de los materiales a través de esta ciencia es conocer la diversidad de materiales existentes en la naturaleza, con una mayor profundización y estudiar aquellos fenómenos que permitan comprender las propiedades de los materiales existentes y avanzar en la generación de nuevos materiales. Pues, en raras ocasiones un material reúne una combinación ideal de propiedades, por lo que, muchas veces, habrá que reducir una en beneficio de la otra.

La mayoría de las tecnologías modernas requiere materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, las cerámicas y los polímeros convencionales. Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de materiales compuestos (composites). En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible de acuerdo con el principio de acción combinada.

El material compuesto es un material multifase obtenido artificialmente, en oposición a los que se encuentran en la naturaleza. Además, las fases constituyentes deben ser químicamente distintas y separadas por una interfase.

Callister (1995), enuncia que la mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una, llamada matriz, que es continua y rodea a la otra fase, denominada fase dispersa. Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas.

Una clasificación de materiales compuestos consta de tres divisiones: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales; además existen dos subdivisiones para cada una. Las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas son equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones); la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tiene la geometría de una fibra (es decir, una relación longitud-diámetro muy alta). Los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos.

A continuación en la Figura 2.1 se observa la clasificación propuesta por Callister (1995) de los materiales compuestos. En esta figura se ubica al hormigón dentro de la zona remarcada, que corresponde a los materiales compuestos reforzados con partículas grandes.

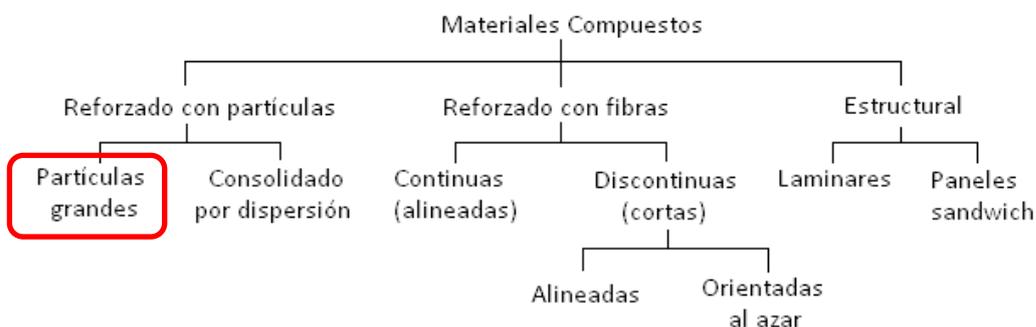


Figura 2.1 Clasificación de materiales compuestos (Callister, 1995)

## 2.2 Concepto de composite

Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí. Es importante destacar la escala de longitudes donde se trata la microestructura (entre  $10^{-7}$  y  $10^{-4}$  m  $\equiv$  0.1  $\mu$ m y 100  $\mu$ m), macroestructura ( $> 10^{-3}$  m  $\equiv$

---

>1 mm) y la nanoestructura o estructura atómica ( $< 10^{-8} \text{ m} \equiv < 10 \text{ nm} \equiv < 100 \text{ \AA}$ ). (Pinilla & Veloza, 2010).

En ciencia de materiales, según Askeland (1998), reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

Ejemplos de estos tipos de materiales los encontramos en la antigüedad cuando el hombre fabricaba, por ejemplo, adobes reforzados con paja, o en la propia naturaleza como es el caso de un nido de golondrina o un árbol.

Fijémonos en este último ejemplo: en un árbol, las fibras de madera resisten los esfuerzos mecánicos a los que el árbol pudiera estar sometido en el caso de que soplara el viento, mientras que las resinas naturales configuran las formas de esas fibras, manteniéndolas unidas y sirviendo como medio transmisor de cargas de unas fibras a otras.

Como se ha dicho antes, el material compuesto presenta mejores características físicas o químicas que las que poseen sus materiales constituyentes por separado. Dentro de las propiedades de mayor interés, que resultan mejoradas con estos materiales, podríamos citar:

- Resistencia mecánica
- Rigidez
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Ligereza
- Resistencia a la fatiga
- Aislamiento térmico y acústico
- Diseño artístico

Mehta y Monteiro (2008) clasifican en tres categorías a los compuestos. Con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales (Figura 2.2). El hormigón que

es una mezcla de cemento, agua, arena y grava, es un compuesto particulado; la fibra de vidrio, que contiene fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras; y la madera contrachapada o triplay, que tiene capas alternas de chapas de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están distribuidas uniformemente, los compuestos particulados tendrán propiedades isotrópicas; los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico.

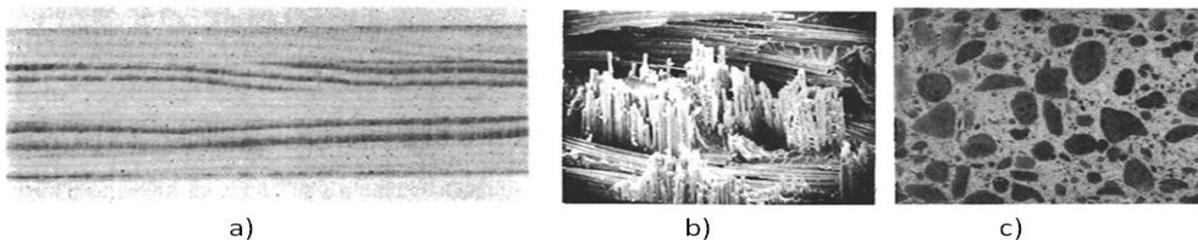


Figura 2.2 Algunos ejemplos de materiales compuestos: (a) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminar de capas de chapas de madera. (b) La fibra de vidrio es un compuesto reforzado por fibra, que contiene largas fibras rígidas de vidrio en una matriz polimérica más blanda (x175). (c) El hormigón es un compuesto particulado, que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento.

Los materiales son compuestos cuando cumplen las siguientes características:

- Están formados de dos o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia).

Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo en la industria del transporte son

---

necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas.

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales.

La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente pero algunos, como la madera y el hueso, aparecen en la naturaleza.

La importancia de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría. La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes. Por esto, concentraciones de material fibroso dispersado en una matriz del 50 % en volumen puede equivaler a una concentración muy diferente en % en peso.

### **2.2.1 Materiales compuestos reforzados con partículas**

Estos materiales compuestos reforzados con partículas se clasifican en materiales reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión. El término “grande” se utiliza para indicar las interacciones entre la matriz y las partículas a un nivel macroscópico. El material compuesto reforzado con partículas grandes más común es el hormigón.

Las partículas dispersas que lo componen (grava y arena) tienen un tamaño entre 0.5 mm y 20 mm en una matriz dura de silicatos y aluminatos (aglutinantes) que provienen de la hidratación del cemento.

El hormigón como material tiene la ventaja de la flexibilidad de diseño puesto que en su estado fresco inicial se puede verter y adquiere la forma que lo contiene, es económico en relación a otros materiales, tiene alta dureza, buena resistencia al fuego, y puede ser fabricado en el lugar. Los inconvenientes son escasa resistencia a la tracción, baja ductilidad y sufre problemas de dilatación/contracción con las variaciones de temperatura.

La pasta moldeable original se forma por la agitación física de la combinación de las cantidades adecuadas de cemento Portland (7-15 %), agua (14-21 %), agregado fino (arena 24-30 %) y agregado grueso (grava 31-51 %). La pasta del cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas.

### **2.3 Hormigón como material compuesto**

Según Irassar (2004), desde el punto de vista de la ciencia de materiales, el hormigón es considerado como un material compuesto de matriz cerámica (pasta de cemento) con partículas dispersas (agregados), y en el caso del hormigón armado, las barras de acero representan fibras discretas. A su vez, la matriz es un material multifásico, menos rígida y resistente que las partículas de agregado, y cuyas propiedades evolucionan en el tiempo debido al proceso de hidratación y son afectadas por la variación de la temperatura y humedad relativa del ambiente.

Las relaciones de microestructura-propiedades son el foco de las ciencias modernas de los materiales. El hormigón tiene una estructura altamente compleja y heterogénea. Así mismo es muy difícil elaborar modelos realistas de su microestructura, a partir de los cuales el comportamiento de los materiales se pueda predecir con facilidad. Entretanto, el conocimiento de la microestructura y de las propiedades individuales de los constituyentes de los hormigones, como la relación entre ellos sirve para ayudar en el control de sus propiedades. (Mehta & Monteiro, 2008)

En la Tabla 2.1 se indican los niveles estructurales, sus aspectos característicos y sus correspondientes modelos para estudiar el comportamiento del material compuesto

hormigón. Los niveles de observación asociados con los estudios que se efectúan sobre el hormigón son tres: micronivel, mesonivel y macronivel.

Tabla 2.1 Estructura del hormigón, como material compuesto (Zerbino, 1998).

Nivel estructural	Aspectos característicos	Tipo de modelo
<b>Micronivel</b>	Estructura de la pasta de cemento	Ciencia de los materiales
<b>Mesonivel</b>	Poros, Fisuras, inclusiones, interfase	Ingeniería de los materiales, modelos mecánicos y numéricos
<b>Macronivel</b>	Geometría de elementos estructurales	Ingeniería estructural y leyes constitutivas del material

Para Zerbino (1998), los fenómenos como la contracción y creep pueden explicarse a partir de procesos que ocurren en el macronivel, aunque el comportamiento del hormigón no puede ser completamente explicado a partir de los mecanismos que se desarrollan en la pasta endurecida de cemento. Por ello, la presencia de poros, fisuras, interfases e inclusiones hacen que el estudio del material se lleve a cabo desde el mesonivel. Los conocimientos en estos dos niveles son aplicados, para describir el comportamiento del material en el cálculo estructural (macronivel).

### 2.3.1 Composición del hormigón: Cemento, agua, agregado grueso, agregado fino, aditivos y adiciones

El CIRSOC, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, a través del informe de Datos Tecnológicos del Hormigón Normal (1985), establece que el hormigón normal de cemento Portland está constituido por agregados pétreos naturales, cemento Portland y agua. A veces se adicionan pequeñas cantidades de ciertas sustancias, aditivos químicos y adiciones pulverulentas, para conferir al hormigón fresco o endurecido ciertas propiedades especiales. En la concepción moderna del hormigón éste está constituido por un sistema de dos componentes: agregados y pasta de cemento. La

pasta de cemento, formada por cemento y agua, determina en el hormigón fresco en alto grado, la trabajabilidad y la consistencia y constituye en el hormigón endurecido la matriz que envuelve a los agregados y que determina la resistencia y la durabilidad del hormigón.

### **Agua**

Es uno de los componentes principales del hormigón. Participa en la elaboración de hormigón como: agua de mezclado, agua de curado y agua de lavado.

Galuppo (2011) expresa que el agua de mezclado cumple tres funciones importantes en el hormigón: reaccionar con el cemento, permitiendo su hidratación; actuar como lubricante de los otros materiales componentes del hormigón y proveer el espacio necesario en la pasta de cemento para que se puedan desarrollar los compuestos que se forman por la hidratación del cemento.

El agua de mezclado es agua libre que se encuentra en estado fresco en el hormigón, agua incorporada intencionalmente más el agua que proviene de la humedad superficial de los agregados.

Rahhal (2012) establece que cuando se varía el contenido de agua en la mezcla, se permite realizar la dosificación del hormigón variando su resistencia, plasticidad, asentamiento, trabajabilidad y permeabilidad. Por esto el agua, pese a ser el componente de más bajo costo, es un elemento tan importante como el cemento. La autora destaca que cuando se desconoce cómo es el agua, de dónde proviene y cuál es su composición química, se corre un gran peligro, porque aunque la razón agua/cemento sea la deseada, no se sabe si en el interior del hormigón, se tiene un aliado o un enemigo.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para la preparación del hormigón.

El Reglamento CIRSOC 201 (2005), normaliza que el agua empleada para lavar los agregados y mezclar y curar el hormigón, cumplirá con los requisitos establecidos en la norma IRAM 1601 (2012).

La Tabla 2.2 presenta las normas que tratan específicamente de la calidad del agua para empleo en morteros y concretos en distintos países. (Kosmatka et al., 2004)

Tabla 2.2 Normas de la calidad de agua para empleo en morteros y concretos. (Kosmatka et al., 2004)

País	Norma	Nombre de la norma
<b>Argentina</b>	IRAM 1601	Agua para morteros y hormigones de cemento Portland
<b>Chile</b>	NCh1498.Of1982	Hormigón - Agua de amasado - Requisitos
<b>Colombia</b>	NTC 3459	Concretos. Agua para la elaboración de concreto
<b>EE.UU.</b>	ASTM C94	Standard specification for ready mixed concrete
<b>Perú</b>	NTP 339.088-1982	Hormigón (concreto). Agua para morteros y hormigones de cementos Portland. Requisitos
<b>México</b>	NMX-C-122-82	Agua para concreto
<b>Venezuela</b>	CONVENIN 2385:2000	Concreto y mortero. Agua de mezcla. Requisitos
<b>Brasil</b>	ABNT NBR 15900-1:2009	Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos

Rahhal (2012) indica que la importancia de conocer las características del agua radica que en que ésta puede tener impurezas disueltas o en suspensión de diferentes tipos. Algunas de ellas pueden inferir en la hidratación del cemento, modificando el tiempo de fraguado, reduciendo la resistencia, causando manchas en la superficie del hormigón y aumentando el riesgo de corrosión de las armaduras en el caso de hormigón armado.

Para Kosmatka et al. (2004) se pueden establecer ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas sobre varias propiedades. Algunas impurezas pueden tener un pequeño efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado y aun afectar la durabilidad y otras propiedades.

Para CIRSOC (1985) el agua para el amasado de morteros y de hormigones de cemento Portland, como asimismo para el curado del hormigón debe ser clara libre de glúcidos

(azúcares), aceites u otras sustancias que pueden producir efectos desfavorables sobre el fraguado, la resistencia o la durabilidad del hormigón o sobre las armaduras. En general, y sin que ello implique excluir la realización de ensayos que permitan verificar su calidad, podrán considerarse usable las aguas potables. En la Tabla 2.3 se presentan los requisitos químicos que debe cumplir el agua para hormigón según norma IRAM 1601 (2012)

Tabla 2.3 Requisitos químicos del agua de mezclado y curado. (Norma IRAM 1601, 2012)

Requisitos		Unidad	Mínimo	Máximo
<b>Residuo sólido</b>	Agua recuperada de procesos de la industria del hormigón	mg/l	-	50.000
	Agua de otros orígenes	mg/l	-	5.000
<b>Materia orgánica, expresada en oxígeno consumido (1)</b>		mg/l	-	3
<b>pH</b>	Para su uso como agua de amasado		4,0	-
	Para su uso como agua de curado		6,0	-
<b>Sulfato, expresado como SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		mg/l	-	2.000
<b>Cloruro expresado como Cl<sup>-</sup></b>	Para emplear en hormigón simple	mg/l	-	4.500
	Para emplear en hormigón armado	mg/l	-	1.000
	Para emplear en hormigón pretensado	mg/l	-	500
<b>Hierro expresado como Fe<sup>3+</sup></b>	Para su uso como agua de curado (2)	mg/l	-	0,5
	Para su uso como agua de amasado	mg/l	-	1
<b>Alcalis, (Na<sub>2</sub>O + 0,658 K<sub>2</sub>O) (3)</b>		mg/l	-	1.500

(1) Si se excede este valor, el agua puede ser utilizada si cumple con los requisitos físicos y químicos establecidos

(2) Se debe cumplir sólo cuando es importante el aspecto estético

(3) Esta determinación es aplicable sólo si se espera utilizar agregados potencialmente reactivos

---

## Cemento

El cemento Portland puede tener composición variable pero dentro de rangos definidos. En Argentina los cementos que se comercializan están especificados en la norma IRAM 50000 (2010), cementos para uso en general, y en la norma IRAM 50001 (2010), cementos con propiedades especiales. Estas normas regulan la composición de los cementos. En general las materias primas básicas que constituyen los cementos son:

- caliza  $\text{CaO}$ , realmente se recoge la calcita del yacimiento y se descarbonata en el horno de clínquerizado,
- arena (sílice,  $\text{SiO}_2$ ),
- alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) proveniente de yacimientos de aluminosilicatos (arcillas),
- óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) generalmente provienen de la tostación de piritas.

Una vez molturados, se introducen en el horno giratorio inclinado, horno de clínkerizado junto con carbón y es la combustión de este carbón el que propicia la elevada temperatura (cerca de  $1500^\circ\text{C}$ ) donde existen pequeñas fases líquidas que originan el producto de salida, clínker, que contiene las siguientes fases cristalinas:

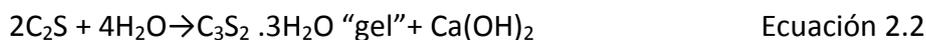
- silicato tricálcico,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) 60 %,
- silicato dicálcico,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 20 %,
- aluminato tricálcico,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) 10 %,
- aluminoferrato tetracálcico,  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) 10 %.

Este clínker puede tener composiciones ligeramente diferentes en función del uso a que se destine ya que se producen varios tipos de cementos Portland. Una vez molturado, el clínker se mezcla con unas pequeñas cantidades de agua y yeso ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para controlar el tiempo de preparación del hormigón (tiempo de fraguado), con valor total aproximado menor del 10 %. En función del tipo de cemento se le pueden añadir otros aditivos en la molienda final como cenizas volantes, etc.

Se pueden modificar las condiciones de endurecimiento como tiempo y temperatura ajustando las fases que componen el clínker y por tanto el cemento. Si se necesita un cemento con bajo calor de hidratación se baja la cantidad de  $\text{C}_3\text{S}$  a 25 % y se eleva la del  $\text{C}_2\text{S}$

a 50 %. Si se desea un endurecimiento rápido se eleva la de C<sub>3</sub>S a 65-70 % y se disminuye la de C<sub>2</sub>S a 10 %. Para resistir a los sulfatos se eleva la relación de C<sub>2</sub>S y C<sub>4</sub>AF.

Las reacciones de hidratación de los cementos son bastante complicadas. La reacción inicial de los silicatos cálcicos da un silicato cálcico hidratado según las reacciones químicas (Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2) generando partículas extremadamente pequeñas (<1µm) comportándose como un gel coloidal amorfo (gel SCH) y libera hidróxido cálcico "cristalino". El C<sub>3</sub>S reacciona rápidamente y es el responsable del endurecimiento rápido del cemento Portland. El C<sub>2</sub>S reacciona más lentamente y es el responsable del endurecimiento del cemento Portland en periodos mayores (los ensayos mecánicos típicos de dureza y resistencia a la tracción se hacen a los 28 días de la preparación de la mezcla). El C<sub>3</sub>A se hidrata rápidamente con la liberación de mucho calor. El C<sub>4</sub>AF se produce en el cemento porque el óxido de hierro reduce las temperaturas a la que se producen líquidos en el horno de clinkerizado por lo que se puede operar a temperaturas relativamente más bajas con el ahorro energético y económico que ello conlleva.



Actualmente los cementos han ido modificando su composición, al ir incorporando otro tipo de materiales dentro de la molienda del clínker. Así surgen los cementos especiales, dentro de los que se incluyen, el cemento Portland compuesto, el Portland fillerizado, los cementos puzolánicas, los de alta resistencia inicial, los resistentes a los sulfatos, los de bajo calor de hidratación, los resistentes a la reacción sílice-agregado, entre otros.

En los cementos puzolánicos, por ejemplo, las puzolanas se hidratan a través de una reacción secundaria donde se combinan con el Ca(OH)<sub>2</sub> formado durante la hidratación primaria (Ecuación 2.1), resultando compuestos SCH como se expresa en la Ecuación 2.3:



Donde el SiO<sub>2</sub> lo aporta la puzolana y el Ca(OH)<sub>2</sub> es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de Ca(OH)<sub>2</sub> por lo cual es de esperar que los cementos u hormigones que poseen

---

estas adiciones presenten mayor resistencia final y durabilidad que los elaborados con cementos “puros” ya que el  $\text{Ca(OH)}_2$  tiene muy baja resistencia estructural. (Becker,-)

### **Agregados**

A fines del siglo XIX y principios del siglo XX, con el desarrollo de los primeros estudios del hormigón de cemento Portland, se decía que los agregados tenían apenas el papel de relleno, que si bien, ocupaban el 70% - 80% del volumen de hormigones convencionales, se trataba apenas de un material inerte destinado a disminuir el costo final de la producción de hormigón. Como los agregados eran abundantes, baratos y de buena calidad, se tornaba fácil asegurar ese papel secundario. Pero con el incremento del uso del hormigón, su aplicación en gran escala, logró dejar en evidencia el verdadero rol de los agregados, su real importancia técnica, económica y social. (Sbrighi Nieto, 2011).

La norma IRAM 1569 (1990), establece que el agregado es un material granular resultante de la desintegración natural o el desgaste de las rocas, o que se obtiene mediante la trituración de ellas, de escoria siderúrgica o de otros materiales, que permiten obtener partículas de forma y tamaños estables.

Por su parte el reglamento CIRSOC 201 (2005), define a los agregados como aquellos componentes del hormigón constituidos por partículas minerales naturales, procedentes de la desintegración natural o de la trituración de rocas, con forma, tamaño y distribución de tamaños apropiados.

Los agregados, de acuerdo al tamaño de sus granos son clasificados en agregado grueso y agregado fino, de acuerdo a Norma IRAM 1627 (1997). Agregado grueso es el material que cuyos granos queda retenido en el tamiz de abertura de malla de 4,75 mm. Y el agregado fino es el material granular que pasa por el tamiz de abertura de 4,75 mm. El reglamento CIRSOC 201 (2005), define como agregado fino, aquel que en su totalidad pasa el tamiz IRAM 9,5 mm. (3,8”), que casi en su totalidad pasa el tamiz IRAM 4,75 mm. (Nº 4), y que es retenido predominantemente en el tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$  (Nº 200). El agregado grueso debe estar constituido por gravas (canto rodado) naturales o partidas, roca partida o por una mezcla de dichos materiales.

Cabrera (2013) destaca que la fase de agregado cumple varias funciones dentro del hormigón, entre ellas, son los principales responsables del peso unitario, del módulo de elasticidad y de la estabilidad dimensional del hormigón. Estas propiedades dependen, en gran parte, de la densidad y resistencia de los agregados, las cuales están más determinadas por las características físicas que por las químicas del agregado.

El conocimiento de las características de los agregados es fundamental para una correcta dosificación de hormigones, pues, las propiedades del hormigón dependen, entre otros factores, de características de los agregados tales como, porosidad, composición granulométrica, absorción de agua, estabilidad, forma y textura superficial de los granos, resistencia mecánica, módulo de deformación y sustancias perjudiciales presentes. Sbrighi Nieto (2011), destaca que uno de los conceptos básicos de la ciencia de materiales es: la microestructura de cualquier material está directamente relacionada con sus propiedades. Por lo que, además de la constitución mineralógica y de la composición química de un agregado, la microestructura debe ser tomada en cuenta. Para Cabrera (2013), las propiedades de los agregados no solo afectan las propiedades mecánicas del hormigón, sino también, y en forma muy desfavorable, su durabilidad. Se debe tener en cuenta que las propiedades físicas y químicas de las rocas dependen, entre otros parámetros, de las propiedades físicas y químicas de los minerales constituyentes.

Las características de los agregados dependen de la microestructura de la roca matriz, expresada por su porosidad, masa específica y composición mineralógica, así como de su exposición previa (grado de intemperismo) y de las condiciones del proceso de fabricación, tales como el uso de explosivos, tipo de trituradoras, etc. (Muniz de Farias & Marques Palmeira, 2010).

### **Aditivos**

Los aditivos son productos suplementarios a los componentes principales del hormigón, que en general se presentan de forma líquida o pulverulenta. Se agregan a la mezcla de hormigón en pequeñas dosis con el objeto de modificar una o más de sus propiedades, ya sea en estado fresco o endurecido. Se los utiliza en dosis menores al 1% del peso del cemento, y rara vez superan el 5%.

---

Balzamo y Giovambattista (2011), en la actualidad, más del 80% del hormigón empleado en los países desarrollados contiene este material. En nuestro medio, la casi totalidad de los hormigones utilizados en grandes obras de infraestructura y la gran mayoría de los hormigones producidos en plantas elaboradas emplean al menos un aditivo. El futuro seguramente impondrá la necesidad de aditivos cada vez más eficaces, que permitan lograr los parámetros de diseño requeridos (resistencia, durabilidad, etc.) con menores contenidos de cemento. Ello redundará en ahorro de energía y disminución de la emisión de CO<sub>2</sub>. De esta manera, los aditivos harán su aporte para lograr estructuras de hormigón sustentables y con la vida en servicio requerida.

Las definiciones y propiedades de los aditivos están indicados en la norma IRAM 1663 (2002). Ella está basada en la norma ASTM C494 (1999) de aditivos químicos y en la ASTM C260 (2006) que contempla los incorporadores de aire.

Kosmatka et al. (2004) establecen una clasificación de los aditivos según sus funciones en:

- Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire)
- Aditivos reductores de agua
- Plastificantes (fluidificantes)
- Aditivos aceleradores (acelerantes)
- Aditivos retardadores (retardantes)
- Aditivos de control de la hidratación
- Inhibidores de corrosión
- Reductores de retracción
- Inhibidores de reacción álcali-agregado
- Aditivos colorantes
- Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo, etc.

Estos autores también brindan las principales razones para el uso de aditivos:

- Reducción del costo de la construcción de hormigón,
- Obtención de ciertas propiedades en el hormigón de manera más efectiva que otras,

- Manutención de la calidad del hormigón durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso,
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción.

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad del material cementante, contenido de agua, forma, granulometría y proporción de los agregados, tiempo de mezclado y temperatura del concreto.

La terminología de la norma IRAM 1663 (2002) llama fluidificante a los aditivos que permiten una reducción del contenido de agua igual o mayor que el 5% y superfluidificantes a los que permiten llevar ese valor al 12% o superarlo. (Balzamo & Giovambattista, 2011)

Para Balzamo y Checmarew (2012) existen fundamentalmente tres razones que justifican la utilización de uno o más aditivos: técnicas, económicas y especificaciones de obra.

En el primer aspecto aparecen importantes mejoras que pueden lograrse en el hormigón fresco y endurecido y se desarrollará como ventajas técnicas con el uso de cada tipo de aditivo. El segundo aspecto contempla, además de la economía en la dosificación del hormigón, ahorros de energía, tiempo y facilidad de colocación, reutilización de encofrados, reducción de los plazos de entrega y puesta en servicio de la estructura. El tercer grupo considera la posibilidad de satisfacer las especificaciones técnicas para la obra o los requerimientos de los nuevos reglamentos.

## **Adiciones**

A lo largo de la historia del hormigón y con distintos objetivos se han utilizado las adiciones minerales, cuyas funciones cubren actualmente aspectos de índole económica, ecológica y tecnológica. Económica porque disminuyen el uso de cemento en el que se consume una elevada cantidad de energía para su producción. Ecológica porque al reemplazar parte del

cemento se disminuye la emisión del CO<sub>2</sub> (compuesto que contribuye al efecto invernadero); se optimiza la utilización de los recursos no renovables que se emplean en la fabricación del mismo; además constituyen un reservorio de muchos otros desechos industriales. Y la tecnológica porque según sus interacciones con el sistema contribuyen al mejoramiento de algunas de las propiedades del hormigón (Rahhal & Eperjeci, 2012).

El uso de las adiciones minerales en la construcción civil es anterior a la invención del cemento, habiéndose iniciado, según Malhotra y Mehta (1996), en el periodo de 1500 a.C. en Grecia donde se había adoptado un material de origen volcánico, originado de erupciones ocurridas en la isla Santorini. Esas adiciones se difundieron por todo el imperio romano para ejecución de varias obras (Carpena Coitinho dal Molin, 2005).

Según Carpena Coitinho dal Molin (2005), en días actuales, las adiciones minerales normalmente utilizadas son residuos provenientes de otras industrias, los cuales serían normalmente descartados en grandes cantidades en lugares incorrectos, generando el riesgo de contaminación de suelo y fuentes de agua. Son ejemplo de este tipo de adiciones las cenizas volantes y la cascara de arroz entre otras.

Fernandez y Trezza (2007), expresan que en los últimos años el cuidado del medio ambiente y la reducción de costos de fabricación han sido tema de discusión en la mayoría de las industrias. En virtud de esto, la industria del cemento Portland ha realizado numerosos cambios, uno de los cuales impulsa el uso de materiales suplementarios, naturales, residuales o subproductos industriales que requieran menos energía de producción. En respuesta a esto y considerando los problemas medioambientales los cementos puzolánicos y compuestos en general, se han expandido ampliamente.

En el Capítulo 3 se continúa con el estudio de las adiciones en el hormigón.

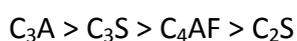
### **2.3.2 Hidratación del cemento Portland. Pasta de cemento hidratada.**

La hidratación del cemento involucra un gran número de reacciones simultáneas, exotérmicas, y para facilitar su comprensión se asume que la hidratación de cada compuesto es independiente de los restantes. Esta simplificación no es del todo válida, debido que la

hidratación de unos compuestos puede interferir en la hidratación de otros, pero en la mayoría de los casos resulta razonable esta simplificación. Los productos de hidratación del cemento son compuestos de solubilidad relativamente baja, lo que permite que el hormigón mantenga sus propiedades mecánicas, cuando se encuentra en contacto con el agua. (Cabrera, 2013).

Para Barnes y Bensted (2002), la hidratación del cemento Portland lleva asociada una secuencia de reacciones químicas entre las fases del clínker, el sulfato cálcico y el agua, que conducen primero al fraguado y posteriormente al endurecimiento del material.

Desde un punto de vista químico, la hidratación es un proceso complejo de disolución-precipitación en donde la disolución de fases anhidras conduce a la formación de compuestos de menores solubilidades que las de los minerales anhidros del clínker, produciéndose la precipitación de hidratos coloidales y cristalinos. La velocidad con la cual las distintas fases del cemento Portland reaccionan con el agua es diferente y se ordena de la siguiente manera. (Sanz, Sánchez & Jiménez, 2006).



Donde:

$C_3S$  = silicato tricálcico,

$C_2S$  = silicato dicálcico,

$C_3A$  = aluminato tricálcico

$C_4AF$  = ferroaluminato tetracálcico

Los aluminatos reaccionan primero, y son los principales responsables del fraguado, es decir, la solidificación de la pasta de cemento. La hidratación del  $C_3A$  y del  $C_4AF$ , en presencia de yeso, da lugar principalmente a sulfoaluminatos hidratados de calcio. El endurecimiento de la pasta de cemento, es decir, el desarrollo de resistencia que sigue a la solidificación, está gobernada por la hidratación de los silicatos. La hidratación del  $C_3S$  y del  $C_2S$  da lugar a silicatos hidratados de calcio formando un gel rígido que se indica como SCH. Está compuesto de partículas extremadamente pequeñas con una estructura laminar que tienden a aglomerarse en formaciones de unas pocas micras de tamaño, caracterizadas por

espacios interlaminares de pequeñas dimensiones (< 2 nm) y por una gran área superficial (100-700 m<sup>2</sup>/g). La Figura 2.3 muestra un modelo propuesto para describir esta estructura. Debido a la gran área superficial, el SCH puede dar una resistencia considerable a la pasta de cemento. Su composición química no está bien definida ya que la relación entre los óxidos de silicio y calcio puede variar según el grado de hidratación, la relación agua/cemento (a/c) y la temperatura (por ejemplo la relación C/S puede pasar de 1,5 a 2). El SCH representa aproximadamente el 50-60% del volumen de la pasta de cemento completamente hidratada.

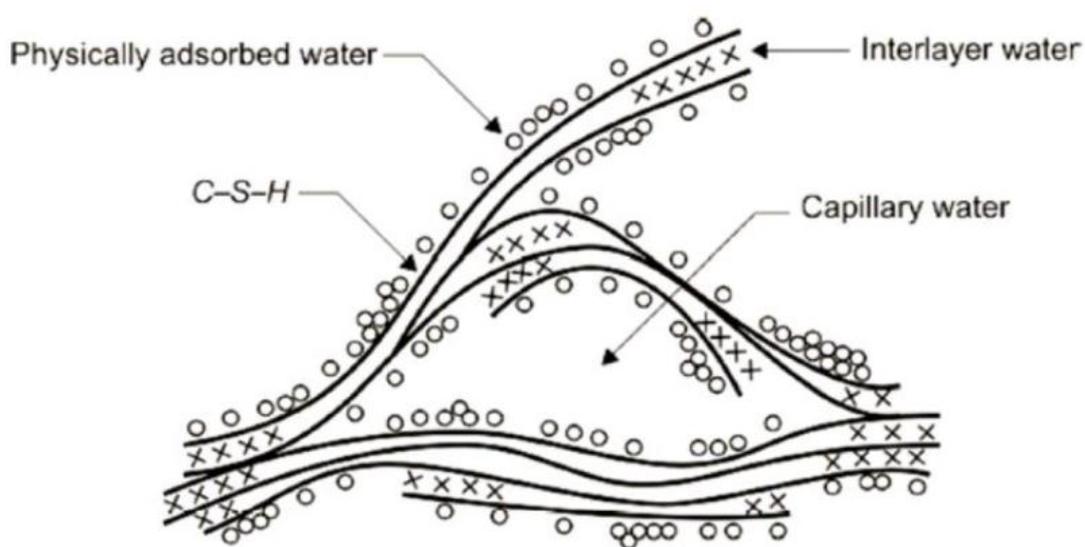
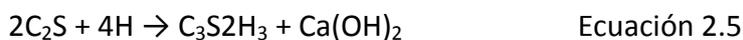


Figura 2.3 Modelo Feldman-Sereda para SCH. (Neville, 2012).

En la reacción de hidratación del silicato tricálcico y bicálcico también se producen cristales hexagonales de hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>, portlandita); que según la reacción química de hidratación por cada dos moles de C<sub>3</sub>S se producen tres moles de portlandita (Ecuación 2.4), mientras que por cada dos moles de C<sub>2</sub>S se produce un único mol de portlandita (Ecuación 2.5).



Estos cristales hexagonales, suelen tener dimensiones del orden de unas pocas micras y ocupan entre el 20 y el 25% del volumen de sólidos. No contribuyen a la resistencia de la pasta de cemento. Sin embargo, el  $\text{Ca(OH)}_2$ , así como el  $\text{NaOH}$  y el  $\text{KOH}$  que están presentes en pequeñas cantidades, son muy importantes en relación con la protección de las armaduras, porque dotan de un pH alcalino de hasta 13,5 a la disolución de los poros presentes en la matriz endurecida. (Lorca Aranda, 2014).

La pasta de cemento endurecida está compuesta por un sistema de sólidos intertrabados y de poros interconectados, los cuales se encuentran parcial o totalmente saturados con una solución alcalina.

Lea (1971) explica que cuando se mezcla cemento Portland y alguna puzolana se produce la reacción entre el  $\text{Ca(OH)}_2$  y los alcalis con los óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , SAF) de la puzolana, generando un gradual decrecimiento del  $\text{Ca(OH)}_2$  y un incremento en la formación de SCH y aluminatos de calcio similares a los obtenidos durante la hidratación del cemento Portland. Como consecuencia de esta reacción química, en la pasta se produce una manifestación física que involucra el refinamiento de poros y de acuerdo a Mehta (1987) este efecto es el que mayor influencia tiene sobre las propiedades mecánicas y durables de los hormigones.

La zeolita como puzolana natural, contribuye al endurecimiento del hormigo reaccionando con la portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Para Alcaraz Marín (2012), los aluminatos presentes en la puzolana, reaccionan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado en la hidratación del cemento Portland. Esto se realiza en una reacción lenta que disminuye el calor, consume el  $\text{Ca(OH)}_2$ , lo que mejora la resistencia frente a ambientes ácidos; y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento, lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica.

La reacción química es la expresada en la Ecuación 2.6:



Donde S son los aluminosilicatos de la puzolana (composición tipo  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )

---

### 2.3.3 Interfaz pasta agregado

Paulino Aguilar (2010) define a la interfaz como una superficie a lo largo de la cual dos sustancias, o fases distintas de un mismo material, o dos fases solidas de un material polifásico se encuentran. En algunos sólidos, mono y polifásicos, existen superficies especiales, como las fallas de empaquetamiento y el contorno de grano y de macla, que son superficies existentes entre regiones de orientaciones cristalográficas diferentes.

Las propiedades de las interfaces son de gran importancia para una serie de fenómenos y procesos. El estudio de las interfaces permite comprender determinados mecanismos de fractura y de desgaste mecánico.

Las superficies tienen siempre un comportamiento diferente de aquellos que están dentro de un volumen considerado. Esto ocurre porque comúnmente en los bordes, el empaquetamiento de los átomos es parcialmente diferente. Los átomos de la superficie no se encuentran en estado de equilibrio, pues no tienen los mismos vecinos que los átomos que componen el interior del volumen.

Irassar (2004) explica que en el hormigón, la matriz porosa rodea a un conjunto de inclusiones de distinta rigidez y tamaño (agregados); poros e inclusiones se distribuyen aleatoriamente junto con una serie de defectos principalmente constituidos por micro o macro fisuras. La interfaz matriz-agregado presenta productos de hidratación con diferente morfología y mayor porosidad, constituyen las zonas de mayor debilidad y, además, frecuentemente existen fisuras en la vecindad de las mismas aun antes de la aplicación de cargas exteriores. Sumado a todo ello, la estructura del hormigón se modifica considerablemente con el transcurrir del tiempo, al ser expuesto frente a distintas condiciones ambientales o sometido a diversas solicitaciones.

El agregado y la pasta de cemento presentan una relación esfuerzo deformación prácticamente lineal, y en cambio en el hormigón, que está compuesto por ambas fases, esta relación no es lineal. Este comportamiento del hormigón se relaciona con la presencia de interfaces y con el desarrollo bajo carga de microfisuras en esas zonas (Neville, 2012), que hace que el hormigón falle a una tensión considerablemente menor que sus dos componentes principales, es decir, que las interfaces afectan el proceso de fisuración y constituyen zonas de concentración de tensiones (Wittman, 1983).

Para Syner, Winslow, Bentz y Garboczi (1993), la zona de interfaces existe en la superficie del agregado grueso y del agregado fino, siendo en este último caso el espesor más pequeño, pero el correspondiente volumen de interfaces resulta mayor. La importancia de las interfaces radica en que afectan entre  $1/3$  y  $1/2$  del volumen total de pasta de cemento endurecida, y la porosidad de la pasta cercana a la superficie de los agregados puede llegar a ser 3 veces el valor de la porosidad de la pasta.

## Capítulo 3

<b>ADICIONES</b>
------------------

En el apartado 3.1 de este capítulo se presenta el concepto de adiciones para mezclas cementicias y una breve introducción de la incorporación de éstas en la tecnología del hormigón. En el apartado 3.2 se detalla la clasificación de las mismas según su forma de trabajo y de reacción con el cemento. El apartado 3.3 aborda el tema de hormigones con adiciones, por qué su uso, la utilización a nivel mundial y las ventajas de su utilización. Finalmente en el apartado 3.4 los antecedentes a nivel mundial y regional de la utilización de adiciones en mezclas cementicias.

### 3.1 Concepto

Según el reglamento CIRSOC 201 (2005) las adiciones para hormigón son materiales de naturaleza inorgánica que se destacan por sus características puzolánicas o hidráulicas; finamente molidos, que pueden ser añadidos al hormigón a fin de mejorar sus propiedades o dotarlo de especiales características. Estos materiales minerales que se incorporan al cemento, generalmente en molienda conjunta como ciertas rocas naturales o no (puzolanas, escoria granulada de alto horno, caliza, microsílíce) actúan o bien aumentando las propiedades hidráulicas del cemento o mejorando otras cualidades debido a una adecuada granulometría (aumento de la trabajabilidad y retención de agua, disminución de la porosidad y capacidad, reducción de la fisuración), etc.

Gonzáles de la Cotera (2006) explica que el empleo de adiciones minerales en los aglomerantes hidráulicos es de antigua data. Los romanos las utilizaron perennizando sus estructuras en base a morteros de cal y puzolana. En la década del cincuenta tuvieron importante desarrollo, en Europa incorporándose al cemento Portland, incrementándose rápidamente la capacidad instalada frente a los requerimientos de la reconstrucción de la post-guerra.

En la actualidad, una gran mayoría de países ha introducido en las normas de cemento, diferentes tipos de adiciones minerales. En los Estados Unidos una moderna norma de performance desregula la composición de los cementos adicionados especificando únicamente el comportamiento de las pastas. En Perú las adiciones puzolánicas se incorporan desde hace más de una década, significando aproximadamente algo más del 20% de los despachos de cemento. En Brasil, la norma NBR 5736 (1991), regula las exigencias para lo cementos puzolánicos.

Para Gonzáles de la Cotera (2006) un clinker de alta calidad, puede recibir adiciones de diferente tipo y porcentaje, para la producción de cementos normalizados que reúnan requisitos especiales. Inicialmente las adiciones minerales tuvieron el propósito de obtener cementos aptos para requerimientos especiales, en relación con la durabilidad. En la década del setenta actuó la cuestión del abono de energía, posteriormente las razones de medio ambiente, a las que se sumaron los avances técnicos en la industria.

En la Figura 3.1 se presenta el diagrama ternario CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> que establece la posición de los diferentes productos con relación a los óxidos y al cemento Portland. Para González de la Cotera (2006) las principales adiciones minerales pueden ser incluidas en dicho diagrama. La zeolita con la que se trabajó en esta tesis, se encuentra dentro de las puzolanas. Podemos encontrar a éstas sobre el lado SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al 30% en el esquema de la Figura 3.1.

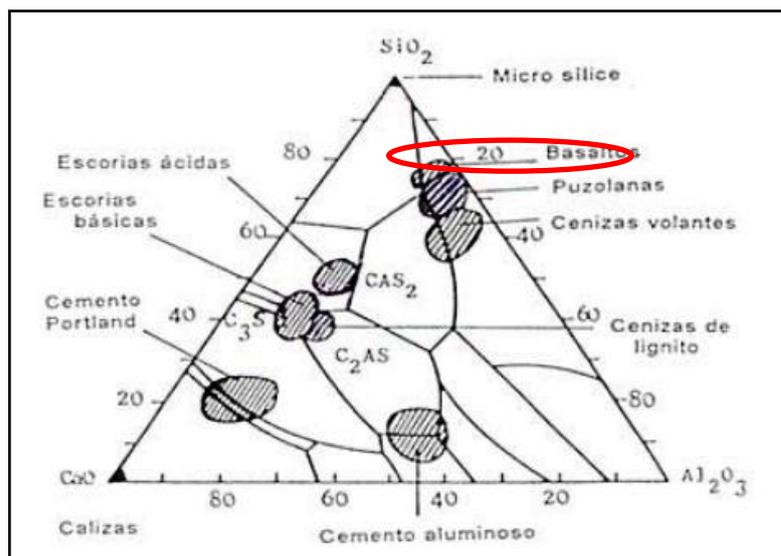
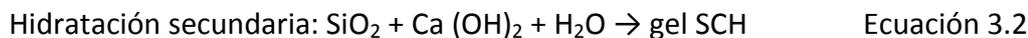


Figura 3.1 Esquema del diagrama ternario de fases CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

### 3.2 Clasificación

Una primera clasificación divide las adiciones minerales en activas e inactivas. Las adiciones activas son aquellas que tienen la capacidad de hidratarse y formar compuestos SCH de manera similar a los formados en la hidratación del clinker Portland. A su vez, estas pueden separarse en las que poseen hidraulicidad latente y las puzolánicas. En general, las adiciones minerales, de acuerdo con su acción físico-química, puede ser clasificada en tres grupos: material cementante, material puzolánico y filler. Mientras que los primeros tienen la capacidad de hidratarse por sí mismos en presencia de agua y un agente catalizador, los segundos se hidratan a través de una reacción secundaria (Ecuación 3.2) donde se combinan

con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante la hidratación primaria (Ecuación 3.1), resultando compuestos SCH:



Donde el  $\text{SiO}_2$  lo aporta la puzolana y el  $\text{Ca(OH)}_2$  es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de  $\text{Ca(OH)}_2$  por lo cual es de esperar que los cementos u hormigones que poseen estas adiciones presenten mayor resistencia final y durabilidad que los elaborados con cementos “puros” ya que el  $\text{Ca(OH)}_2$  tiene muy baja resistencia estructural.

### 3.2.1 Material Cementante

El material cementante no necesita del hidróxido de calcio presente en el cemento Portland para formar productos cementantes como el SCH. Sin embargo, su auto hidratación es normalmente lenta, y las cantidades de productos cementantes formados es insuficiente para la aplicación del material con fines estructurales. Cuando es usado como adición o sustitución en cemento Portland, la presencia de hidróxido de calcio y gypsite acelera su hidratación, como en el caso de la escoria granulada de alta horno. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005)

### 3.2.2 Material Puzolánico

El material puzolánico es definido por la ASTM C618 (2003) como un material silicio o sílico aluminoso que por sí solo posee poca o ninguna propiedad cementicia, pero, cuando es finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente, para formar compuestos con propiedades cementantes. La norma ASTM C618 (2003) establece una cantidad mínima de 70% de  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ ,

---

un máximo de 5% de  $\text{SO}_3$ , pérdida por ignición inferior a 12% y un máximo de álcalis disponible, en  $\text{Na}_2\text{O}$ , de 1.5%.

Como podrá estudiarse luego en el Capítulo 4: Zeolita, el material que se utiliza en esta tesis como adición responde a las características del material puzolánico.

Carpena Coitinho Dal Molin (2005) plantea que tanto los materiales naturales como los artificiales pueden necesitar de un proceso adicional (por ejemplo trituración y molienda) para adecuarse como material puzolánico para uso en cemento y hormigón.

Por su parte Bonavetti (2004), agrega que la forma, finura, distribución de partículas, densidad, composición química de la fase vítrea y grado de vitrificación de la puzolana natural tiene una marcada influencia sobre su actividad hidráulica y consecuentemente sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

Originalmente el término puzolana fue asociado con cenizas volcánicas naturales y tierras calcinadas las cuales reaccionan con la cal a temperatura ambiente, en ambiente húmedo. Actualmente el término ha sido extendido a todos los materiales silico-aluminosos, los cuales finamente molidos, en presencia de agua, pueden reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio (CH) para formar compuestos que poseen propiedades cementicias, clasificándolas en consecuencia como puzolanas naturales y artificiales.

Las puzolanas están, principalmente, constituidas por óxido de silicio, óxido de aluminio, de hierro y de calcio y anhídrido sulfúrico. Las técnicas utilizadas para la determinación de la composición química son, en general, la fluorescencia de rayos X y la termogravimetría.

### 3.2.3 Fíller

Carpena Coitinho Dal Molin (2005) define al fíller como una adición mineral finamente molida sin actividad química, o sea, su acción se reduce a un efecto físico de relleno granulométrico y acciona como punto de nucleación para la hidratación de los granos de cemento.

El fíller en general tiene un tamaño medio próximo al del cemento. En pequeñas cantidades, (normalmente menor al 15% sobre la masa del cemento), optimiza algunas propiedades en las mezclas; tales como, la trabajabilidad, la masa específica, la permeabilidad, la exudación y la tendencia a la figuración. (Neville, 2012).

Los fíller pueden ser materiales naturales u materiales inorgánicos procesados. Lo esencial es que posean uniformidad y, principalmente, sean finamente molidos.

### 3.3 Efectos químicos y físicos de las adiciones

Las adiciones empleadas en mezclas cementicias pueden producir efectos químicos y/o físicos en la microestructura de los hormigones.

El efecto químico hace referencia a la capacidad de reacción con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formado durante la hidratación del cemento Portland, para formar silicatos de calcio hidratado (SCH) adicional, que es el producto principal responsable de la resistencia de pastas de cemento hidratadas. Dependiendo de la superficie específica de las partículas y de su composición química, las reacciones puzolánicas pueden ser lentas o rápidas.

En cuanto al efecto físico, Carpena Coitinho Dal Molin (2005) describe que las adiciones pueden conseguir varios efectos; tales como:

- Efecto microfiller: aumenta la densidad de la mezcla resultante del llenado de los vacíos por las minúsculas partículas de las adiciones, cuyo diámetro medio debe ser semejante o menor que el diámetro medio de las partículas de cemento.
- Refinamiento de la estructura de poros y de los productos de hidratación del cemento: causado por las pequeñas partículas de las adiciones que pueden actuar como puntos de nucleación para los productos de hidratación. De esta manera, el crecimiento de los cristales ocurre no solamente a partir de la superficie de los granos de cemento, sino que también en los poros ocupados por la adición y por el agua, influenciando la cinética de hidratación (acelera las reacciones) y los tipos de productos de hidratación formados (la adición restringe los espacios en los cuales los

productos de hidratación pueden crecer, generando un gran número de pequeños cristales en lugar de pocos cristales de gran tamaño.

- Alteración de la microestructura de la zona de transición: la utilización de las adiciones finamente molidas en el hormigón interviene en el movimiento de las partículas de agua en relación a los sólidos de la mezcla, reduciendo o eliminando la acumulación del agua libre que normalmente queda retenida sobre los agregados. Más allá de contribuir para la disminución de la espesura de la zona de transición por la reducción de exudación, la adición puede rellenar los vacíos dejados por las partículas de cemento próximo a la superficie del agregado (efecto microfiller), interfiriendo en el crecimiento de los cristales, restringiendo sus tamaños y reduciendo el grado de orientación de los cristales de hidróxido de calcio junto al agregado (partículas de adición actuando con puntos de nucleación), y reduciendo la concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  (debido a las reacciones químicas puzolánicas). En resumen de todos esos efectos repercute una mejora significativa en la zona de transición, reflejando un aumento de desempeño del hormigón desde el punto de vista tanto mecánico como de durabilidad.

### 3.4 Hormigón con adiciones

En su forma básica el hormigón es una mezcla de cemento Portland, agregado fino, agregado grueso y agua. El principal elemento cementante en el hormigón es el cemento Portland. Hoy en día la mayoría de las mezclas de hormigón contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el hormigón. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural.

Actualmente, para Carpena Coitinho Dal Molin (2005) son muchas las obras de ingeniería y arquitectura en el mundo en las que para su construcción se utilizó algún hormigón especial con la incorporación de alguna adición. Las principales adiciones utilizadas han sido sin duda las puzolanas (ceniza volante y arcilla calcinada) y las escorias de alto horno. La sílica activa, también ha sido una de las mayores adiciones utilizadas; sobre todo en obras de gran envergadura como puentes, presas hidráulicas, edificios de alta resistencia, etc. Entre las obras que utilizaron sílica activa se pueden citar, la Estação de tratamento de Esgoto Alegria,

en Rio de Janeiro, la nueva sede de la Procuradoria Geral da República (proyecto del arquitecto Oscar Niemeyer, con 70.000 m<sup>2</sup>, terminado en 2002), entre otras.

### 3.4.1 ¿Por qué utilizar adiciones? Ventajas de su uso

El uso de adiciones en mezclas cementicias se ha extendido por varios motivos, entre ellos, razones económicas, pues la producción de clínker para la elaboración de cemento Portland resulta una actividad costosa por la gran cantidad de energía que demanda. Por lo que al utilizar adiciones se disminuye el consumo de cemento. Además, económicamente, el costo de muchas de las adiciones, en Argentina, es menor al del cemento.

Razones tecnológicas también estimulan el uso de algún tipo de adición, ya que, se ha demostrado en diversos estudios que la incorporación de adiciones modifican la estructura interna de la pasta de cemento hidratada, creando una estructura menos porosa y sensible al deterioro por agentes por cualquier medio de transporte, lo que conlleva a materiales cementicios con una pasta más compacta, resistente y durable. Es decir, las ventajas técnicas se dan a partir del hecho, que las adiciones mejoran en general la estructura de poros de la pasta de cemento en los hormigones teniendo como consecuencia hormigones más durables; pues la estructura de poros capilares interconectados del hormigón se minimiza logrando bajar la permeabilidad del material, logrando así un aumento de la resistencia al intemperismo o ingreso de sustancias agresivas.

Las reacciones puzolánicas dan lugar a un refinamiento del tamaño de poros y a un refinamiento del tamaño de grano. Rahhal y Eperjesi (2012) explican que el refinamiento del tamaño del poro se debe a la formación de productos de hidratación secundarios, principalmente silicatos de calcio hidratados de menor densidad que los formados en la hidratación del cemento, rellenas las grandes cavidades capilares, reduciendo el tamaño de los poros y cortando la comunicación entre ellos. El refinamiento del tamaño del grano se refiere a que la nucleación del CH alrededor de las finas y bien distribuidas partículas de puzolana permite, mediante la reacción puzolánica, reemplazar los grandes y orientados cristales de CH por pequeños, numerosos y bien distribuidos de SCH de baja cristalinidad,

---

dando lugar a la transformación de un sistema que contiene granos grandes en otro con granos pequeños.

Por su parte la durabilidad del hormigón está vinculada con la capacidad de transporte de soluciones a través de la red de capilares. Como las adiciones, en general, llevan a una reducción del tamaño de poros, se logra mediante la utilización de alguna adición en las mezclas cementicias una disminuyendo la porosidad (Raggiotti et al., 2012). La importancia de la incorporación de adiciones es la incidencia sobre la naturaleza y distribución de los poros de la masa del hormigón, teniendo efectos directos en los mecanismos de transporte en ella. (Raggiotti, Positieri & Oshiro, 2013)

Finalmente, en los últimos años, la evolución de la tecnología del hormigón, ha ido acompañando un movimiento ambiental que procura desarrollar materiales y tecnologías amigables con el ambiente, que sean sustentables. Por eso, el empleo de adiciones resulta una herramienta útil para este fin, pues en general las adiciones son materiales que no tienen otro uso industrial, por lo que serían acumuladas en grandes volúmenes con el consiguiente impacto ambiental que producirían. Además, la mejora ambiental se debe a que el uso de adiciones implica un menor consumo de cemento, es decir menor producción de clínker, lo que implica una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> en dicha producción.

### **3.4.2 Su uso a nivel mundial.**

A nivel mundial el uso de adiciones está regido por la factibilidad de disposición de la adición en cantidad y calidad para este fin, la reglamentación vigente en cuanto al uso en mezclas cementicias y fundamentalmente al grado de conocimiento del uso de éstas y su aplicación aceptada en el medio productivo.

Numerosos estudios e investigaciones se han realizado mundialmente con el uso de algún tipo de adición en hormigones, morteros o pastas cementicias. La cantidad y profundidad de estas investigaciones está relacionada con el tipo de adición que se estudia, con la facilidad de disposición de ésta, con la reglamentación vigente en el país respecto al uso de adiciones y al grado de desarrollo del país en cuanto a tecnología del hormigón.

En general en países que cuentan con yacimientos de grandes volúmenes de adiciones minerales y/o residuos industriales apropiados para ser utilizados como adición se fomenta la investigación sobre éstos para poder ser incorporados en hormigones.

En Cuba, por ejemplo, (Rosell, Galloso & Calvo, 2006), se encuentran varios estudios referentes a la incorporación de tobas zeolíticas en pastas, morteros y hormigones. Los estudios abarcan desde la caracterización físico-química del material hasta la evaluación mecánica de las mezclas ante parámetros de resistencia. Sin embargo no se encuentra en la bibliografía, aplicación industrial de la investigación y siempre los resultados dependen del yacimiento que se haya extraído el mineral por lo que no siempre es posible la generalización de los resultados alcanzados.

En otros países como China (Najimi et al, 2012), Irán (Ahmadi & Shekarchi, 2010), Israel, entre otros también es posible encontrar trabajos que investiguen el uso de zeolitas en mezclas cementicias, siendo también el caso de estudio solo a nivel laboratorio.

Una de las adiciones con mayor nivel de avance en cuanto a su grado de investigación en mezclas cementicias en general, y en hormigones en particular, es la ceniza volante. Según Baldo (2013) en Estados Unidos, Canadá, Gran Bretaña, Australia, Portugal y Alemania, las cenizas volantes producidas por la quema de carbón en las plantas generadoras de energía están autorizadas y homologadas por instituciones técnicas como producto no contaminante y beneficioso en la elaboración de hormigón, asfalto, membranas y ladrillos. Y se promueve su empleo por su contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Andrés A. Scarano, socio gerente de Matermix, expresa que en Argentina aproximadamente un 35 % de las empresas que integran la Asociación Argentina del Hormigón Elaborado utilizan en las mezclas cenizas volantes en reemplazo de una porción de cemento. La empresa Matermix tiene un convenio de exclusividad con la Central Térmica San Nicolás para comercializar toda la ceniza que produce la central (unas 10 mil toneladas al mes). El desecho de la combustión del carbón, que se conoce internacionalmente como fly ash, es compatible químicamente con las pastas cementicias. (Baldo, 2013).

El uso de las cenizas volantes en la industria de la construcción a nivel mundial se encuentra actualmente ampliamente difundida. A continuación se detallan en Tabla 3.1 datos de nivel de consumo y utilización en la industria del cemento y el hormigón. La información se

obtuvo de: The American Coal Ash Association, European Coal Combustion Products Association, Ash Development Association of Australia, Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash. (Giovanbattista, 2014)

Tabla 3.1 Datos estadísticos de consumo de CV en la industria de la construcción

País / Región	Año	Cenizas Volante (Millones de Tn)		Usos (%)	
		Producción	Consumo	Cemento	Hormigón
<b>Estados Unidos</b>	2012	50	23	10	50
<b>Comunidad Europea</b>	2009	34	15	32	35
<b>Canadá</b>	2009/2011	4	1	33	56
<b>Australia</b>	2012	11	5		37

Fuente: <http://www.matermixsrl.com.ar/>

Por otra parte, Shekarchi, Ahmadi y Najimi (2012) expresan que se ha utilizado la zeolita natural en la elaboración de cementos puzolánicos desde las primeras décadas del siglo XX y se ve una tendencia creciente en las décadas recientes. En la construcción del acueducto de Los Ángeles, que inicialmente, en 1912, tenía una longitud de 240 millas; aproximadamente el 25% del cemento fue reemplazado por toba zeolítica, lo que llevó a grandes beneficios económicos.

Pocos estudios muestran la incorporación de la zeolita en elevados niveles de reemplazo, esto puede ser atribuido a las dificultades prácticas por la baja trabajabilidad del hormigón en estado fresco. Este problema es más evidente cuando el nivel de reemplazo del cemento excede el 30%.

En el Capítulo 4: Zeolita, se abordará en detalle el estudio de zeolitas a nivel mundial y las experiencias locales realizadas.



## Capítulo 4

<b>ZEOLITA</b>
----------------

En este capítulo se presenta el análisis de la zeolita como material puzolánico en mezclas cementicias. El apartado 4.1 brinda la definición de zeolita, lo que implica su concepto. En el apartado 4.2 se estudia la zeolita desde un punto de vista químico. En el apartado 4.3 se presentan las investigaciones a nivel mundial realizados con el empleo de zeolitas naturales. En el punto 4.4 se presenta el trabajo nacional realizado con zeolitas y finalmente en el apartado 4.5 se describen las técnicas de caracterización de la zeolita utilizada en la presente investigación.

## 4.1 Concepto.

Las zeolitas naturales fueron descubiertas en 1756, por el famoso mineralogista sueco Axel A. F. Cronstedt. Fue el primer científico que describió las distintas propiedades de esta clase de mineral (Colella & Gualtieri, 2006). Cronstedt reconoció a las zeolitas como una nueva clase de minerales consistentes en aluminosilicatos hidratados conteniendo álcalis o especies alcalino - térreas. Desde esa fecha se han reportado numerosas investigaciones en las que están involucradas tanto zeolitas sintéticas como naturales. Actualmente se conocen unas cincuenta zeolitas naturales y más de ciento cincuenta se sintetizan para aplicaciones específicas. La Clinoptilolita es una zeolita natural formada por la desvitrificación de ceniza volcánica en lagos o aguas marinas hace millones de años. Este tipo es la más estudiada y considerada la de mayor utilidad por su actividad puzolánica en mezclas cementicias a nivel mundial. Sin embargo, en nuestro país, a pesar de haber yacimientos de este mineral, no hay investigaciones al respecto.

Se denomina zeolita o ceolita (del griego, zein, 'hervir', y lithos, 'piedra'), a un gran conjunto de minerales que comprenden silicatos aluminicos hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos. La etimología de la palabra zeolita hace referencia a que estas rocas cuando se calientan a altas temperaturas se hinchan y desprenden burbujas. Estos minerales se manifiestan en vetas de rocas ígneas básicas, particularmente basalto. Las zeolitas son aluminosilicatos con cavidades de dimensiones moleculares de 8 a 10 Angstrom. Contienen grandes iones y moléculas de agua con libertad de movimiento, para así poder permitir el intercambio iónico.

Las zeolitas naturales se encuentran distribuidas ampliamente en yacimientos alrededor del mundo, como por ejemplo en, Cuba, Grecia, Irán, China, entre otros. Las zeolitas naturales han sido consideradas, en general, como materiales de baja calidad, debido a su condición de mineral con una composición heterogénea y propiedades físicas y químicas diferentes entre sí. Fueron empleadas desde la antigüedad, especialmente como material de construcción como adiciones a las mezclas, pero posteriormente se utilizaron principalmente en procesos de control ambiental (accidentes en instalaciones nucleares para la retención de los desechos radiactivos, etc.) perdiendo su protagonismo en la industria de la construcción. Asimismo, en los últimos años se han comenzado a reutilizar en el área agronómica, así

---

como en medicina y farmacia (por ej. en la elaboración de fármacos) (Villavicencio, Molina, & Fernández, 2009).

Para Misaelides (2011), el uso de las zeolitas naturales y sus formas modificadas, tienen la ventaja del bajo costo, la amplia disponibilidad, las buenas propiedades mecánicas y térmicas y la combinación de una alta capacidad de adsorción con la habilidad de ajustar el pH del suelo y de los sistemas acuosos. Además, las zeolitas naturales, no introducen contaminación adicional en el medio ambiente.

Según Agosto (2012) las potenciales desventajas de la aplicación de las zeolitas naturales pueden ser atribuidas a que en general son mezclas minerales donde la fase zeolítica suele ser un constituyente variable. Sin embargo, en los depósitos de mayor pureza se ha logrado determinar la presencia de la fase zeolítica en una proporción del orden del 80 % o superior.

Hoy se reconoce que un gran número de ocurrencias o manifestaciones de zeolitas naturales (tobas zeolitizadas) se encuentran comúnmente en rocas sedimentarias, pero quedan condicionados por los ambientes geológicos o sistemas hidrológicos (lagos salinos alcalinos, suelos salinos alcalinos, sedimentos marinos profundos, sistemas hidrológicos abiertos, zonas de alteración hidrotermal, ambientes diagenéticos o metamórficos y flujos piroclásticos).

La Asociación Internacional de Zeolitas (IZA) ha reconocido más de 50 tipos diferentes de zeolitas naturales. En Latinoamérica se han encontrado manifestaciones de este tipo en varios países: Antillas, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, etc. En algunos casos estas manifestaciones son ya reconocidas como yacimientos, con reservas estimadas y aprobadas para su explotación industrial (Giannetto Pace, Montes Rendón & Rodríguez Fuentes, 2000).

Se ha señalado, que las zeolitas más abundantes en rocas sedimentarias son: analcima, clinoptilolita, heulandita, laumonita y philipsita.

Las zeolitas naturales sedimentarias se han formado por reacciones de materiales sólidos depositados, usualmente vidrio volcánico, en lagos, lagunas, pantanos, etc. de elevada concentración salina. La génesis de las especies formadas depende de las condiciones físico-químicas (temperatura, concentración de iones, presión parcial de CO<sub>2</sub>, etc.).

## 4.2 La zeolita desde un punto de vista químico

### 4.2.1 Definición

De acuerdo con la literatura (Smith, 1976), la zeolita es un alúmino-silicato que posee un esqueleto estructural conteniendo huecos ocupados por iones y moléculas de agua, los que manifiestan un considerable movimiento, que permite el intercambio iónico y la deshidratación reversible.

En estudios recientes se ha valorado esta definición de zeolita frente a una más reciente propuesta por la International Zeolite Association (IZA): "una zeolita está caracterizada por una estructura de tetraedros enlazados que contiene cavidades en forma de canales y cajas que comúnmente están ocupadas por moléculas de agua y cationes. La estructura puede estar interrumpida por grupos (OH<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>) que ocupan los vértices de los tetraedros los cuales no son compartidos con tetraedros adyacentes. Los canales son lo suficientemente largos para permitir el paso de especies huéspedes. En las fases hidratadas ocurre la deshidratación a temperaturas moderadas (fundamentalmente por debajo de 400°C) y esta es ampliamente reversible" (Vezzalini, 1997).

La fórmula general de una zeolita según Giannetto Pace, Montes Rendón y Rodríguez Fuentes (2000), es:



Donde:  $0.0 < x < 0.5z$ ,

$$0.0 < y < 0.25z,$$

$$0.12 < x+2y < 0.5z,$$

$$0.29 < n < 1.33z$$

Sin embargo, esta fórmula sólo describe a las zeolitas con Al y Si en el esqueleto estructural, es decir las especies minerales, sin reflejar el estado actual de las investigaciones en zeolitas sintéticas y naturales modificadas, donde diferentes átomos pueden sustituir isomórficamente al Si o al Al, o a los aluminofosfatos con estructura zeolítica.

#### 4.2.2 Clasificación de las zeolitas según el tamaño de poros

Una primera clasificación de las zeolitas puede establecerse a partir del número de átomos de oxígeno que forman los anillos o poros por los cuales se penetra al espacio intracrystalino. Así, como se presenta en la Tabla 4.1, pueden clasificarse en zeolitas de poro extragrande ( $\theta > 9 \text{ \AA}$ ), de poro grande ( $6 \text{ \AA} < \theta < 9 \text{ \AA}$ ), de poro mediano ( $5 \text{ \AA} < \theta < 6 \text{ \AA}$ ), y de poro pequeño ( $3 \text{ \AA} < \theta < 5 \text{ \AA}$ ), dependiendo de que el acceso al interior de los mismos se realice a través de anillos de 18, 12, 10 u 8 átomos de oxígeno.

Tabla 4.1 Clasificación de las zeolitas respecto al tamaño de poros. (Csicsery, 1984).

Zeolita	Átomo de O en la abertura	Diámetro de poro $\theta \text{ \AA}$	Ejemplos
Poro extra grande	$\geq 14$	$\theta > 9 \text{ \AA}$	AIPO4-8; VPI-5
Poro grande	12	$(6 \text{ \AA} < \theta < 9 \text{ \AA})$	Y; $\beta$ ; $\Omega$ ; mordenita
Poro mediano	10	$5 \text{ \AA} < \theta < 6 \text{ \AA}$	ZSM-5; ZSM-11, clinoptilolita
Poro pequeño	8	$3 \text{ \AA} < \theta < 5 \text{ \AA}$	Heroinita; A; SAPO-34

En la Tabla 4.2 se presentan las características generales de las zeolitas, las que dependen esencialmente de la estructura y de la composición química. (Whyte & Dalla Beta, 1982).

Tabla 4.2 características generales de las zeolitas. (Whyte & Dalla Betta, 1982).

Diámetro del poro	2 a 12 $\text{ \AA}$
Diámetro de cavidades	6 a 12 $\text{ \AA}$
Superficie interna	Varios cientos de $\text{m}^2/\text{g}$
Capacidad de intercambio catiónico	0 a 650 meq/100 g
Capacidad de adsorción	$< 0.35 \text{ cm}^2/\text{g}$
Estabilidad térmica	Desde 200°C hasta más de 1000°C

### 4.2.3 Estructura

El bloque de estructura primaria de las zeolitas, es un tetraedro, de hibridación  $sp^3$ , de átomos de  $Si^{4+}$  ó  $Al^{3+}$ , coordinados a cuatro átomos de oxígeno. En la estructura condensada, cada uno de estos átomos de oxígenos está compartido por dos tetraedros, formando una estructura continua tridimensional.

La sustitución de  $Si^{4+}$  por  $Al^{3+}$ , define las cargas negativas de la estructura, la cual es compensada por cationes mono y divalentes (de bajo potencial iónico), generalmente hidratados o asociados a moléculas de agua que se localizan en los canales y cavidades. Las propiedades de estos cationes (particularmente la relación carga/radio) determina que sean fácilmente sustituidos, y en última instancia definen la capacidad de intercambio catiónico de la muestra.

La relación Si/Al para las zeolitas varía entre 1 y 6. El límite inferior, está dado por las reglas de Löwenstein, en la cual un tetraedro de Al no puede estar unido a otro tetraedro de Al. El límite superior está dado por las zeolitas naturales (Clinoptilolita (CLI), Mordenita (MOR) y Ferrierita (FER)) que se encuentran entre 4 y 6 de acuerdo con la abundancia relativa del Si en la naturaleza (Gottardi & Alberti, 1988).

La característica más importante de las zeolitas y la que define sus propiedades específicas, es la presencia de huecos y canales en su estructura, que son de gran importancia para su aplicación en adsorción y catálisis.

La transferencia de materia entre el espacio intracrystalino de los canales y cavidades y el medio que rodea a la zeolita, está limitada por el diámetro de los poros de la misma ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor crítico, el cual varía de una zeolita a otra (Chen & Garwood, 1986; Ruiz-Serrano et al, 2010).

### 4.2.4 Clasificación estructural de las zeolitas

Las propiedades de las zeolitas como materiales de aplicación quedan definidas no sólo por su composición química, sino también por su estructura cristalina, por lo que resulta

---

importante recordar que de forma general, "una estructura cristalina se define como el arreglo espacial de los átomos en la celda unitaria y su relación entre ellos", es decir las distancias y los ángulos interatómicos.

Para Alonso (2012), clasificar desde el punto de vista cristalográfico a las zeolitas ha sido una tarea en la que se ha trabajado desde hace muchas décadas. Sin embargo, la primera clasificación de las zeolitas atendiendo a su estructura cristalina fue introducida por W. L. Bragg en 1937, quien las dividió en tres grupos de acuerdo a su hábito cristalino:

- Estructura tridimensional con enlace uniforme en cada dirección.
- Estructura laminar con capas de aluminosilicato débilmente enlazadas entre sí.
- Estructura fibrosa con enlaces débiles entre las cadenas.

Alonso (2012) explica que si bien en las zeolitas la unidad estructural básica o "unidad primaria de construcción" es la configuración tetraédrica de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central, generalmente de Si y Al ( $TO_4$ ), esta distribución es insuficiente para describir los diferentes tipos estructurales. A pesar de las pequeñas diferencias de energías libres entre los diversos aluminosilicatos susceptibles de formarse, las diversas zeolitas son obtenidas de manera reproducible y con purezas cercanas al 100%. Ello hace difícil concebir la construcción de una estructura espacial continua, sumamente compleja a través de una simple combinación de tetraedros de  $SiO_4$  y  $AlO_4$ . La formación de las mismas puede visualizarse más fácilmente a través de la existencia, en el gel de síntesis, de unidades estructurales comunes denominadas "unidades de construcción secundarias" (SBU) originadas por la unión de tetraedros. La combinación sencilla de estas unidades finitas, conducirá a las diferentes estructuras cristalinas de las zeolitas.

La Tabla 4.3 presenta la clasificación estructural de las zeolitas basada en una primera etapa de existencia de 8 unidades de construcción secundarias o SBU. Posteriormente, se amplió el número de unidades de construcción secundarias, pudiendo presentar hasta 16 átomos T.

En la Tabla 4.3 se observa como el tipo de zeolita utilizada para esta investigación pertenece al grupo de la Heulandita, tiene 36 tetraedros por celda unitaria y presenta una relación Si/Al entre 2.5-5.0.

Tabla 4.3 Clasificación estructural de las zeolitas según Meier, Olson & Baerlocher (1996).

ZEOLITA	TO <sub>4</sub>	Si/Al	ZEOLITA	TO <sub>4</sub>	Si/Al	ZEOLITA	TO <sub>4</sub>	Si/Al
<b>Grupo de la Filipsita</b>			<b>Grupo de la Modernita</b>			<b>Grupo de la Faujasita</b>		
Li-ABW	8	1-3	Bikitaita	9	4-7	Linde	24	1-3
Filipsita	16		Deschiardita	24		Rho	46	
Harmotona	16		Epistilbita	24	< 20	ZK5	96	
Gismondita	16		Ferrierita	36		Faujasita	192	
Na-P	16		Mordenita	48		Paulingita	672	
Amicita	16		ZSM-5	96		Linde N	768	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlinoita	32							
<b>Grupo de la Analcita</b>			<b>Grupo de la Chabazita</b>			<b>Grupo de la Heulandita</b>		
Analcita	48	1-3	Sodalita	12	2.5-4.0	Brewsterita	16	2.5-5.0
Leucita	48		Cancriñita	12		Heulandita	36	
Wairakita	48		Ofretita	18		Clinoptilonita	36	
Pallucita	48		Losod	24		Stilbita	72	
A	192		Gmelinita	36		Stellerita	72	
			Liotita	36		Barretita	72	
			Chabazita	36				
<b>Grupo de la Natrolita</b>			Mazzita	36		<b>Grupo de la Laumonita</b>		
			Heroinita	36				
			Aghanita	48				
Edingtonita	10	1-2	Levynita	54		Laumonita	24	1-2
Gonnardita	20							
Thomsonita	40							
Natrolita	40							
Scolecita	40							
Mesolita	120							

Ref: Si/Al: rango de la relación Si/Al en el grupo estructural; TO<sub>4</sub>: Número de tetraedros por celda unitaria.

Actualmente la IZA (International Zeolite Association), es el organismo encargado de asignar un código de tres letras a todas las estructuras zeolíticas que se van descubriendo. Por el momento se tiene una base de datos compuesta por 201 estructuras diferentes. La Comisión de Estructuras de la IZA para describir tales estructuras recurre a las SBU. (Margarit Benavent, 2013). Las estructuras aparecen en el “Atlas of Zeolite framework types” de la IZA

---

(2007) ordenadas alfabéticamente en base a las 3 letras. El código consiste generalmente en las primeras 3 letras del nombre del mineral.

### 4.3 Estudios realizados a nivel mundial

Simultáneamente con el crecimiento en la aplicación de zeolitas naturales en el cemento o en mezclas cementicias, se han desarrollado en el ámbito internacional investigaciones conducidas a estudiar el efecto en las propiedades del hormigón y comparar esta puzolana natural con otros materiales puzolanicos; sin embargo en Argentina son escasas las publicaciones científicas que aborden estos temas.

La información comercial de las zeolitas naturales como material para construcción es que pueden utilizarse en la preparación de hormigón liviano. Su estructura de silicato poroso hace que sean mucho más livianos que la arena y dan más volumen por tonelada de producto con una dureza y resistencia similares. La zeolita no contiene limo que disminuye la resistencia de la mezcla y su estructura porosa retiene la humedad lo que facilita que la mezcla cure más rápidamente, hidratando el cemento, y creando nuevos SCH a partir de la reacción del  $\text{Ca(OH)}_2$  sin hidratar con el silicato de la zeolita.

Con carácter científico, a nivel mundial debido al crecimiento en la aplicación de zeolitas naturales en el cemento o en mezclas cementicias, se han desarrollado investigaciones conducidas a estudiar el efecto en las propiedades del hormigón y comparar esta puzolana natural con otros materiales puzolánicos. La mayoría de ellas se han realizado en lugares donde el mineral se encuentra en abundancia en la naturaleza y permite ser explotado; este es el caso de Cuba donde el Dr. Arquitecto Regino Gayoso Blanco es un referente en el tema. Se pueden encontrar varios de sus trabajos presentados en congresos abordando la temática. Sin embargo su estudio no contempla el comportamiento en hormigones especiales. También en Cuba se han realizado estudios sobre el efecto de la adición del mineral cal-zeolita en la resistencia a compresión y durabilidad del hormigón por Dopico Montes de Oca et al. (2009).

Otra experiencia en el tema, aunque con resultados parciales, es la desarrollada en Ecuador donde se realizó el estudio del empleo de zeolitas en mezclas de cemento donde el principal objeto de estudio es el comportamiento mecánico de dichas mezclas (Pindo & Célleri Montoya, 2008).

En Estados Unidos existen antecedentes de estudios realizados en Greensburg, Pensilvania, donde se analizó la zeolita de un yacimiento en Bear River - Preston, Idaho y su comportamiento dentro de mezclas de hormigón. La investigación abarcó análisis físico-químico del mineral, resistencia a compresión del hormigón, permeabilidad, reacción álcali-sílice, entre otros (Jana, 2007), pero sólo en hormigones convencionales.

Mundialmente hay varios estudios realizados al material zeolítico como material en mezclas de cemento Portland o como puzolana en el proceso de fabricación del cemento Portland. Según un relevamiento realizado por Najimi et al. (2012), se han utilizado tobas zeolíticas como material puzolánico en algunas plantas cementeras de Rusia, Alemania, Eslovenia, Cuba, Serbia y España.

Se ha investigado principalmente en países que cuentan con yacimientos de zeolitas naturales hormigones y morteros con diferentes contenidos de estas en propiedades de resistencia, reacción álcali-sílice y transporte de sustancias.

No obstante, no se ha encontrado, con esta frecuencia estudios relacionados con aspectos de durabilidad, en particular carbonatación, congelamiento y deshielo, y, prestaciones como ataque de sulfatos y ácidos, corrosión inducida por cloruro en hormigón armado y contracción por secado. En este trabajo se pretende analizar los hormigones a parámetros indicadores de durabilidad, sobre todo a aquellos que involucran algún medio de transporte de sustancias, tales como absorción, succión capilar, permeabilidad al aire, carbonatación.

En Irán (Shekarchi, Ahmadi, & Najimi, 2012) se ha avanzado significativamente en el estudio de hormigones convencionales con la incorporación de zeolita natural como suplemento del material cementicio. Los porcentajes de reemplazo de la zeolita en las mezclas han sido desde un 0% a un 20%. Se ha evaluado resistencia a compresión y reactividad puzolánica del material. Los resultados de reactividad indican que la zeolita presenta valores comprendidos entre los alcanzados por el humo de sílice y la ceniza volante.

En Cuba, Rosell y Galloso (2001) han dirigido sus investigaciones al empleo de las zeolitas naturales procedentes del yacimiento de zeolita cubano de Tasajeras, Provincia de Villa Clara, como material de construcción, principalmente en la producción de cementos y otros aglomerantes, como aditivos o agregados ligeros, para la producción de hormigones de altas prestaciones con excelentes cualidades técnicas (impermeabilidad y durabilidad).

En la Tabla 4.4 se presenta un resumen de las investigaciones realizadas a nivel mundial en el campo de la tecnología del hormigón con la incorporación de zeolitas naturales. (Najimi, Sobhani, Ahmadi & Shekarchi, 2012).

Tabla 4.4. Investigaciones previas de la utilización de zeolita natural en el cemento y compuestos de hormigón.

Investigaciones previas usando zeolitas naturales en cementos y hormigones.					
Ensayos	Porcentaje de reemplazo de zeolitas naturales (%)				
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50
Propiedades de resistencia	Chan & Ji (1999)	Poon et al. (1999)	Poon et al (1999)	Campolat et al (2004)	Kaakurt & Topku (2011)
	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Chan & Ji (1999)	Chan & Ji (1999)	Yilmaz et al (2007)	Uzal et al (2007)
	Ahmadi (2007)	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Pargar et al (2010)	Karakurt & Topcu (2011)	
	Shekarchi et al (2008)	Ahmadi (2007)	Canpolat et al (20)	Jana (2007)	
	Najimi (2010)	Shekarchi et al (2008)	Kasai et al (1992)	Cioffi et al (2006)	
	Pargar et al (2010)	Fragoulis et al (1997)	Yilmaz et al (2007)		
	Feng et al (1990)	Perraki at al (2003)	Bilim (2011)		
	Fragoulis et al (1997)	Canpolat et al (2004)	Karakurt & Topcu (2011)		
	Perraki et al (2003)	Kasai et al (1992)	Jana (2007)		
	Campolat et al (2004)	Yilmaz et al (2007)	Tokushine et al (2009)		
	Kasai et al (1992)	Bilim (2011)	Fu et al (1996)		
	Ikotun & Ekolu (2010)	Karakurt & Topcu (2011)	Janotka & Stevula (1998)		
	Ikotun (2009)	Jana (2007)			
	Ikotun et al (2008)	Tokushige et al (2009)			
	Yilmaz et al (2007)	Ding et al (1995)			
	Bilim (2011)	Fu et al (1996)			
Karakurt & Topcu (2011)					
Reacción alcali-silice	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Ahmadi & Shekarchi (2010)	-
	Ahmadi (2007)	Ahmadi (2007)	Ahmadi (2007)	Ahmadi (2007)	
	Shekarchi et al (2008)	Shekarchi et al (2008)	Shekarchi et al (2008)	Shekarchi et al (2008)	
	Ikotun (2009)	Karakurt & Topcu (2011)	Karakurt & Topcu (2011)	Karakurt & Topcu (2011)	
	Karakurt & Topcu (2011)	Sersale & Prigione (1987)	Jana (2007)	Sersale & Prigione (35)	
	Jana (2007)	Feng et al (1998)	Feng et al (1998)	Feng et al (1998)	
	Sersale & Prigione (1987)	Feng & Hao (1998)	Feng & Hao (1998)	Feng & Hao (1998)	
	Feng et al (1998)	Pei-wei et al (2004)	Feng et al (1992)	Pei-wei et al (2004)	
	Feng & Hao (1998)			Jana (2007)	

Tabla 4.4. Investigaciones previas de la utilización de zeolita natural en el cemento y compuestos de hormigón. (Continuación)

Investigaciones previas usando zeolitas naturales en cementos y hormigones.					
Ensayos	Porcentaje de reemplazo de zeolitas naturales (%)				
	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50
Propiedades de transporte	Chan & Ji (9)	Poon et al (1999)	Poon et al (1999)	Jana (2007)	Uzal et al (2007)
	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Chan & Ji (9)	Chan & Ji (9)		
	Ahmadi (2007)	Ahmadi & Shekarchi (2010)	Pargar et al (2010)		
	Shekarchi et al (2008)	Ahmadi (2007)	Bilim (2011)		
	Najimi (2010)	Shekarchi et al (2008)	Jana (2007)		
	Pargar et al (2010)	Najimi (2010)			
	Feng et al (15-16)	Pargar et al (2010)			
	Ikotun & Ekolu (2010)	Bilim (2011)			
	Ikotun (2009)	Jana (2007)			
	Ikotun et al (2008)	Feng et al (2002)			
	Bilim (2011)				
	Jana (2007)				
	Feng et al (2002)				
Resistencia a sulfatos y ácidos	Ikotun (2009)	Karakurt & Topcu (2011)	Karakurt & Topcu (2011)	Karakurt & Topcu (2011)	Karakurt & Topcu (2011)
	Ikotun et al (2008)	Janotka et al (2003)	Jana (2007)	Janotka et al (2003)	Janotka et al (2003)
	Karakurt & Topcu (2011)		Janotka & Stevula (1998)		
	Jana (2007)		Janotka et al (2003)		
Resistencia al congelamiento y deshielo	Bilim (2011)	Bilim (2011)	Bilim (2011)	-	-
Carbonatación	Bilim (2011)	Bilim (2011)	Bilim (2011)	-	-
Corrosión de armaduras	-	-	-	-	-
Contracción por secado	Kasai et al (1992)	Kasai et al (1992)	Kasai et al (1992)	-	-
	Jana (2007)	Jana (2007)	Jana (2007)	-	-
Calor de hidratación	Krolo et al (2005)				
Actividad puzolánica	Poon et al (1999), Ahmadi & Shekarchi (2010), Ahmadi (2007), Shekarchi et al (2008), Jana (2007), Varela et al (2006), Snellings et al (2009), Mertens et al (2009), Burriesci et al (1985), Perraki et al (2010), Caputo et al (2008), Liguori et al (2004), Sersale (1980), Malquori et al (1962)				

(Fuente: Najimi, Sobhani, Ahmadi & Shekarchi, 2012)

#### 4.4 Antecedentes nacionales

En el ámbito nacional no hay un estudio profundo y abarcativo del empleo de este mineral como adición en hormigones especiales que incluyan el estudio del mineral en sí, de sus propiedades, sus ventajas, sus debilidades como material de construcción y de las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones especiales. Es por este motivo

---

que dada la disponibilidad del material en el país y sus posibles ventajas como material constituyente de mezclas cementicias se plantea la investigación que le da origen a esta tesis.

En el CINTEMAC (Centro de investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad), lugar donde se desarrolló esta tesis, se inició con una investigación previa y a la vez paralela a esta tesis en morteros con incorporación de zeolita como material aislante térmico. Conocida es la menor capacidad térmica de la zeolita en relación a otros materiales de construcción, esto tiene que ver con la microestructura, que presenta espacios vacíos en su red cristalina (Tiburcio-Munive, 2008), por lo cual se evaluó su conductividad térmica en morteros para construcción.

En el trabajo de laboratorio realizado sobre morteros se sustituyó el 20% del aglomerante por zeolita natural. En esta investigación se concluyó que la zeolita demostró sus propiedades puzolánicas, pues los valores de resistencia mecánica a la compresión de los morteros con sustitución fueron similares a los morteros patrón. Se evidenciaron las propiedades térmicas de la adición pues se comprobó mediante ensayo de conductividad térmica que los morteros con sustitución 20% del aglomerante por zeolita natural presentaron conductividades menores que los morteros patrón.

En cuanto al comportamiento logrado en morteros con zeolita respecto los sin fue que los morteros con sustitución muestran similares características y trabajabilidad de que los morteros patrón. Los morteros con sustitución presentan mejores valores de tiempos de utilización en estado fresco y no demandan mayor cantidad de agua de mezclado.

Como conclusión general de la investigación es posible disminuir la cantidad de cemento en morteros sustituyendo por 20% de zeolita natural y lograr una disminución en el coeficiente de conductividad térmica. El uso de zeolita natural en la elaboración de morteros trae aparejado un beneficio económico y ambiental. (Andrada, 2012)

## 4.5 Yacimientos de las zeolitas naturales.

Las zeolitas naturales se encuentran entre los minerales autógenos más comunes en las rocas sedimentarias; no obstante, debe decirse que se forman en un amplio rango de rocas de diferentes orígenes, edad y ambiente geológico de deposición, siendo su presencia en estos medios, precisamente, lo que ha constituido un criterio directo y moderno para su clasificación (Pérez, D. et al. 1997). A pesar de ello, todavía ciertos aspectos genéticos encuentran un punto de controversia entre los científicos versados en este tema, fundamentalmente en lo relacionado con el ambiente de formación hidrotermal. (Costafreda Mustelier, 2008).

Las clinoptilolitas utilizadas en esta investigación se obtuvieron en un yacimiento de zeolita en la zona de la Cuenca de Pagancillo, departamento de Independencia, centro oeste de la provincia de La Rioja, Argentina. Correspondieron a clinoptilolitas sódicas, de origen vulcanoclástico, con alta capacidad de intercambio catiónico (Chelischehev, Volodin & Kryukov, 1988).

## 4.6 Caracterización del material zeolítico

La American Mineralogist Special Feature, en su versión Nº 2 del año 1998, y a través de la "Recommended Nomenclature for Zeolites Minerals: Report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names", instituye algunas normas específicas para la caracterización de las zeolitas naturales, estableciendo un criterio único en la definición, así como seis reglas a tener en cuenta a la hora de evaluar la composición química, mineralógica y cristalográfica de una zeolita determinada. (Costafreda Mustelier, 2008).

La International Zeolite Association, publicó en el año 2001 la "Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites" (cuarta edición), para las especies zeolíticas conocidas en sus fases puras. El trabajo está provisto de tablas de identificación de modelos de difractogramas, relación de datos de difracción previamente calculados para las especies conocidas, modelos fijos de simulación de difracción de especies normales y para los cálculos

---

de los desórdenes intracristalinos de las zeolitas; también incorpora reglas que orientan en la determinación de cambios en los parámetros de composición, efectos de orientación y evaluación del soporte y el estudio de fases de silicatos densos, que facilita su detección en la síntesis de fases mixtas. Ha incorporado hasta la fecha más de 3.000 nuevos tipos de estructuras zeolíticas desde el año 1995. (Costafreda Mustelier, 2008).

En el año 2003 se publica el “Handbook of Zeolite Science and Technology”, que recoge 25 importantes trabajos enmarcados en 5 temáticas generales fundamentales: zeolitas, síntesis y estructura, caracterización, fotoquímica orgánica y aplicaciones. (Auerbach, Carrado & Dutta, 2003).

A continuación se exponen las técnicas de caracterización empleadas en la investigación de esta tesis.

#### **4.6.1 Espectroscopia por fluorescencia de rayos X**

La espectroscopia por fluorescencia de rayos X es una técnica analítica relativamente simple, en general, no destructiva, usada en la determinación cualitativa y cuantitativa de elementos que componen una muestra. Mediante este análisis, se obtienen datos de los elementos principales componentes del material analizado.

#### **4.6.2 Determinación de densidad según picnómetro**

La densidad,  $\rho$ , de un cuerpo se define como la masa por unidad de volumen. Similarmente el peso específico se define como el peso por unidad de volumen. Para un cuerpo homogéneo (es decir, aquel para el cual sus propiedades son iguales en todas sus partes), la densidad es una característica de la sustancia de la que el mismo está compuesto. La densidad es una típica magnitud intensiva, es decir, una magnitud que no depende de la cantidad de materia que compone al cuerpo, sino sólo de su composición.

Una técnica muy útil y simple para medir densidades consiste en usar un picnómetro.

### 4.6.3 Determinación del área superficial

La importancia de conocer el área superficial de un material es porque la superficie es la parte por donde un sólido interacciona con lo que le rodea, ya sea gas, un líquido u otros sólidos.

A medida que el tamaño de partícula disminuye, el área superficial por unidad de masas aumenta. La adición de porosidad, especialmente si se trata de poros muy pequeños hace que la superficie aumente mucho más. Polvos muy gruesos pueden tener áreas superficiales de unos pocos metros cuadrados por gramo. Mientras que materiales porosos pueden tener áreas mayores que un campo de futbol (varios miles de metros cuadrados por gramo).

El área superficial está relacionada con la velocidad de disolución de un sólido y con otros fenómenos como la actividad de un catalizador, las propiedades electrostáticas de materiales en polvo, la dispersión de luz, la opacidad, las propiedades de sinterización, la cristalización, la retención de humedad, la caducidad y muchas otras propiedades que pueden influir en el procesado y comportamiento de polvos y sólidos porosos.

Por tanto, la medida del área superficial es una de las más utilizadas para la caracterización de materiales porosos. Dado que el área superficial corresponde a la rugosidad del exterior de la partícula y a su interior poroso, la técnica más usada es la adsorción de gases.

Para medir el área superficial se usó el método BET, que consiste en la medida de la cantidad de gas adsorbido requerida para cubrir la superficie libre del adsorbato, con una capa del espesor de una molécula, volumen de monocapa ( $V_m$ ). Pese a que el modelo de BET ha sufrido varias críticas debido a que las superficies reales de los sólidos no siguen todas las aproximaciones del modelo (Gregg & Sing, 1982) es el método más ampliamente usado para determinar área superficial de sólidos. En el rango de presiones relativas 0.05-0.35 es capaz de interpolar los datos experimentales para la mayoría de los sólidos. En el caso de sólidos microporosos, el  $V_m$  computado por la ecuación de BET corresponde al volumen de microporos más el volumen de la monocapa sobre la superficie externa de los microporos (Leofanti, Padovan, Tozzola & Venturelli, 1998). En este caso es recomendable utilizar el término "área aparente".

---

#### 4.6.4 Distribución Granulométrica

La distribución granulométrica del material es muy importante pues no da una referencia del tamaño medio de las partículas del material y su distribución por tamaño.

Por ser la zeolita a trabajar heterogénea a simple vista en tamaño de partículas, se utilizaron dos métodos para evaluar la granulometría.

La distribución granulométrica de la fracción gruesa, aproximadamente el 40.62% de la muestra total, de partículas de tamaño mayor a 1000  $\mu\text{m}$  se determinó por medio de tamices con aberturas de malla estandarizadas.

La fracción fina de la muestra zeolítica, el 59.38% del total, corresponde a partículas que pasan el tamiz nº 18 ( $\emptyset \leq 1000 \mu\text{m}$ ), se evaluaron mediante un analizador de distribución del tamaño de partículas por difracción láser (Partica IA- 950V2, HORIBA).

#### 4.6.5 Caracterización mediante Difractometría de Rayos X (DRX)

Este método se utiliza para conocer la composición de un material. Se trata de una técnica que permite identificar los minerales cristalinos presentes en la muestra siempre que se encuentren en un porcentaje superior a 1%. La difracción de rayos X es utilizada para obtener información sobre la estructura, composición y estado de materiales policristalinos.

#### 4.6.6 Análisis por espectroscopia IR

La espectroscopia de infrarrojo puede ser usada para identificar un compuesto, determinar la composición de las mezclas, monitorear las reacciones y proporcionar información útil para deducir la estructura molecular. Es una de las mejores herramientas para obtener información relativa a la estructura de las moléculas. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

La espectroscopia de infrarrojo es un tipo de espectroscopia de absorción la cual usa una región del espectro electromagnético infrarrojo. La técnica se basa en el hecho de que las

uniones químicas de las sustancias poseen frecuencias de vibración específica, las cuales corresponden a niveles de energía de las moléculas (llamados en este caso niveles de vibración). Tales frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, de la geometría molecular, de las masas de los átomos y, eventualmente, el acoplamiento vibracional.

La identificación de una sustancia es posible porque diferentes materiales poseen diferentes vibraciones y producen espectros infrarrojos diferentes. Además de esto, de las frecuencias de las absorciones es posible determinar los distintos grupos químicos que están o no presentes en una estructura química. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

#### **4.6.7 Microscopia electrónica de barrido (SEM).**

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un equipamiento versátil que permite la obtención de información estructural y química de muestras diversas. Determina la composición semicuantitativa y cualitativa de los materiales de la muestra.

La imagen electrónica de barrido está formada por la incidencia de un haz fino de electrones de alta energía en la superficie de la muestra, sobre condiciones de vacío. Del choque de los electrones con la muestra, parte del haz es reflejado y recogido por detectores que convierten la señal en imagen de electrones retrodifundidos, electrones "Auger" son los electrones secundarios. Ocurre también la emisión de rayos X, que brindan la composición química elemental de un punto o región de la superficie, posibilitando la identificación de cualquier elemento presente. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

Estas radiaciones cuando son captadas correctamente, brindan información característica sobre la muestra (topografía de la superficie, composición cristalográfica, entre otras). En la microscopia electrónica de barrido los signos de mayor interés para la formación de imagen son los electrones secundarios o retrodifundidos. El SEM tiene su potencial aún más desarrollado con la adaptación de detectores de rayos X, permitiendo la realización de análisis químicos en la muestra en observación. Por medio de la captación de los detectores y del análisis de los rayos X característicos emitidos por la muestra, resultado de la interacción de los electrones primarios con la superficie, es posible obtener información

---

cuantitativa y cualitativa de la composición de la muestra en la región submicrométrica de incidencia del haz de electrones. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

#### **4.6.8 Microanálisis Semicuantitativo por Sonda de electrones (EDS).**

El microanálisis por sonda de electrones consiste en analizar los rayos X generados por una muestra que ha sido bombardeada con un haz de electrones. Los valores de longitud de onda e intensidad de las líneas del espectro característico emitido, permiten realizar análisis químico en áreas muy pequeñas. El análisis cualitativo consiste en la identificación de los elementos presentes a partir de su correspondiente longitud de onda, mientras que en el análisis semi-cuantitativo las intensidades son comparadas, en general, con las muestras patrones de composición conocida. Las intensidades medidas deben ser corregidas por efecto del instrumento utilizado, como así también por el fondo, cuya fuente principal es el espectro continuo de rayos X.

El análisis de los rayos X implica medir muy precisamente sus longitudes de onda o energías y las correspondientes intensidades.

#### **4.6.9 Microscopia electrónica de barrido por electrones secundarios (SEM-ES)**

Los electrones secundarios son electrones eyectados de átomos de la muestra debido a la interacción inelástica de los electrones energéticos del haz primario con electrones poco energéticos de la banda de conducción en los metales o de valencia en los semiconductores y aislantes. La SEM-ES brinda imágenes de mejor resolución, con gran profundidad de campo, permitiendo observar la morfología de los cristales a través del aspecto tridimensional de la muestra analizada.

#### **4.6.10 Microscopia electrónica de barrido acoplada a un sistema de Espectroscopia de energía dispersiva (EDS: Energy Dispersive Spectroscopy)**

El SEM-EDS posibilita la determinación de la composición cualitativa y semcuantitativa de las muestras, a partir de la emisión de rayos X característicos. Es posible identificar la composición de regiones de hasta un  $\mu\text{m}$  de diámetro. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

#### **4.6.11 Análisis térmicos**

Los métodos de análisis térmicos se basan en la medida de la relación entre la temperatura y alguna propiedad de un sistema, como la masa o el calor de reacción.

Los métodos térmicos más utilizados son; el análisis termogravimétrico, TGA, el análisis térmico diferencial, DTA, y la Calorimetría diferencial de barrido, DSC. Estos análisis utilizan métodos destructivos.

##### **Análisis termogravimétrico (TGA)**

La Termogravimetría (TG) se basa en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando es sometida a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. La variación de masa puede ser una pérdida de masa o una ganancia de masa. Los cambios de masa pueden resultar de transformaciones físicas o químicas.

En el análisis termogravimétrico se registra de forma continua, en atmósfera controlada, la masa de una muestra a medida que aumenta su temperatura en forma lineal desde la temperatura ambiente hasta temperaturas del orden de  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La gráfica de la masa en función de la temperatura se denomina termograma y proporciona información cualitativa y cuantitativa de las muestras.

Los métodos termogravimétricos están limitados por las reacciones de descomposición y de oxidación y por procesos tales como la vaporización, la sublimación y la desorción.

---

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica esencialmente cuantitativa ya que los cambios que se producen en la muestra derivan en variaciones de peso que son registradas directamente. El análisis de la masa de la muestra en una atmósfera controlada es medido como función de la temperatura o del tiempo, trazándose así el termograma respectivo.

Este método es útil para determinar la pureza y el agua en la muestra, los contenidos de carbonato y orgánicos y para el estudio de reacciones de descomposición.

### **Análisis térmico diferencial (DTA)**

En el Análisis Térmico Diferencial (DTA) mide la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia (térmica, física y químicamente inerte) en función del tiempo o de la temperatura cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. Es una técnica cualitativa que indica la temperatura a la cual tiene lugar el cambio energético en estudio y si el proceso es endotérmico o exotérmico. Sin embargo, con un adecuado calibrado es posible convertirla en semicuantitativa y obtener información del calor involucrado en el proceso. El análisis térmico diferencial proporciona información como la temperatura de fusión y cristalización, las reacciones de descomposición, los cambios de fase, la oxidación, entre otros.

### **Calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

El Calorimetría diferencial de barrido es el método de análisis térmico que más se utiliza. La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, por sus siglas en inglés Differential Scanning Calorimeter) es una técnica que se utiliza para analizar las transiciones térmicas de una sustancia, cuando ésta es calentada.

La DSC es una técnica cuantitativa que permite obtener información de la temperatura a la cual tiene lugar el cambio energético en estudio y del calor involucrado en el proceso.

La Calorimetría diferencial de barrido (DSC) brinda información cuantitativa sobre los cambios que ocurren en la muestra analizada con el aumento o disminución de la temperatura. La técnica DSC mide la diferencia de energía brindada a la muestra y a un

material de referencia, en función de la temperatura, en tanto la muestra y el material son sometidos a un programa controlado de temperatura. O sea, mide las cantidades de calor involucradas en las transformaciones endotérmicas o exotérmicas que la muestra sufre durante las alteraciones de temperatura. Usualmente, la franja de temperaturas de trabajo del DSC es más estricta que la del DTA. (Carpena Coitinho Dal Molin, 2005).

## Capítulo 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL. MATERIALES, DOSIFICACIONES Y METODOLOGÍA
---

En este capítulo, en el apartado 5.1 se presenta una introducción del programa experimental realizado en el desarrollo de esta tesis; en el apartado 5.2 se describen los materiales seleccionados para la dosificación y fabricación del hormigón, así como su caracterización. En el apartado 5.3 se presentan las mezclas, la metodología y las dosificaciones.

## 5.1 Introducción

En este capítulo se aborda en lineamientos generales el programa experimental llevado a cabo durante el desarrollo de la tesis. Se describen las propiedades de los materiales componentes, la metodología de trabajo y los procedimientos de ensayo. Se presentan las dosificaciones, la nomenclatura utilizada para la designación de las mezclas.

Se analizaron hormigones con contenidos altos ( $450\text{kg/m}^3$ ) de cemento a los que se les fue reemplazando, en peso, porcentajes graduales del contenido de cemento por la adición zeolita, principal variable en estudio.

Se plantearon dos series de hormigones, una para cada tipo de cemento utilizado, Cemento Portland Normal (CPN) y Cemento Portland Compuesto (CPC), ambos de resistencia del cemento medido en mortero normalizado ( $a/c= 0,50$ ) de 40 MPa según ensayo de norma IRAM 1622 (2006) y norma IRAM 50000 (2010).

En total se elaboraron finalmente diez mezclas que resultaron de un trabajo previo de corrección de dosificaciones, utilización de varias adiciones minerales, estudios de compatibilidad de aditivos y cementos, influencia de la relación  $a/c$ , entre otras. En la sección 5.3.2.2 se indica la composición final de las mezclas ensayadas.

## 5.2 Materiales

### 5.2.1 Cemento

En esta investigación se emplearon dos tipos de cementos. Un Cemento Portland Normal designado CPN proveniente de la provincia de Catamarca, Argentina, y un Cemento Portland Compuesto, designado CPC, procedente de la provincia de Córdoba, Argentina.

En la Tabla 5.1 se presenta la designación, la densidad (norma IRAM 1624, 2005) y la superficie específica de los cementos empleados medida por el método de ensayo de finura por determinación de la superficie específica por permeametría (Método de Blaine), norma IRAM 1623 (2004).

Tabla 5.1 Características de los cementos utilizados.

Designación	CPN	CPC
Denominación IRAM 50.000	CPN40	CPC40
Densidad [g/ cm <sup>3</sup> ]	3.15	3.10
Superficie específica [cm <sup>2</sup> /g]	3869	4008
Retenido Tamiz #200 [%]	0,0	0,6
Pérdida por calcinación [%]	3,74	4,00
Residuo insoluble [%]	2,00	2,50
SO <sub>3</sub> [%]	1,65	2,64
MgO [%]	2,43	5,50

De acuerdo a norma IRAM 50000 (2010), en la Tabla 5.2 se brinda información sobre la composición de los cementos utilizados según datos aportados por fabricantes.

Tabla 5.2 Composición de los cementos utilizados

Tipo de cemento	Nomenclatura	Composición [g/100g]			
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	Fíller calcáreo
Cemento Portland normal	CPN	100-90		0-10	
Cemento Portland compuesto	CPC	98-65	2 ó más, con P + E + F ≤ 35		

### 5.2.2 Aditivo

Se utilizó un aditivo plastificante para hormigón de base química de lignosulfonatos. La dosis utilizada fue de 0.35% de peso de material aglomerante (cemento más zeolita), es decir que

para todos los hormigones se utilizó igual cantidad de aditivo. El aditivo cumple con norma IRAM 1663 (2002) y con los requisitos ASTM C494 (1999) para aditivos tipo A, reductores de agua.

Este tipo de aditivo se recomienda en hormigones de pavimentos, construcciones industriales, estructuras en general, hormigón elaborado, premoldeados, y hormigones bombeables. En general, se recomienda en estructuras donde es necesario facilitar la trabajabilidad y en casos especiales en donde se requiera dejar un hormigón a la vista, pues el aditivo ofrece una buena terminación superficial del hormigón. El aditivo, también, permite compensar los efectos perjudiciales que en las mezclas originan las inadecuadas granulometrías de los agregados.

En la Tabla 5.3 se presentan las características del aditivo empleado.

Tabla 5.3 Características del aditivo plastificante

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad a 20°C [Kg/l]</b>	1,20
<b>pH</b>	6,5 – 8,5
<b>Apariencia</b>	Líquido
<b>Color</b>	Marrón oscuro
<b>Dosis recomendada</b>	0.2% - 0.5% del peso del cemento
<b>Dosis óptima</b>	0.35% del peso del cemento

Fuente: Hoja técnica de producto. Plastiment® BV.  
N° de identificación: 01 13 03 01 100 0 000050.

### 5.2.3 Agua

Se utilizó agua de red que cumple con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201 y en la norma IRAM 1601 (2012).

### 5.2.4 Agregado grueso

Se utilizó un agregado grueso triturado de origen local. En Tabla 5.4 se presenta los resultados de caracterización del agregado.

Tabla 5.4 Características del agregado grueso

Tamaño máximo [mm] IRAM 1505:2003	Densidad relativa aparente del agregado saturado y superficie seca IRAM 1533: 2002	Absorción [%] IRAM 1533:2002
19	2,73	1,15

En la Figura 5.1 se presenta la distribución granulométrica del agregado grueso y las curvas límites según norma IRAM 1627 (1997).

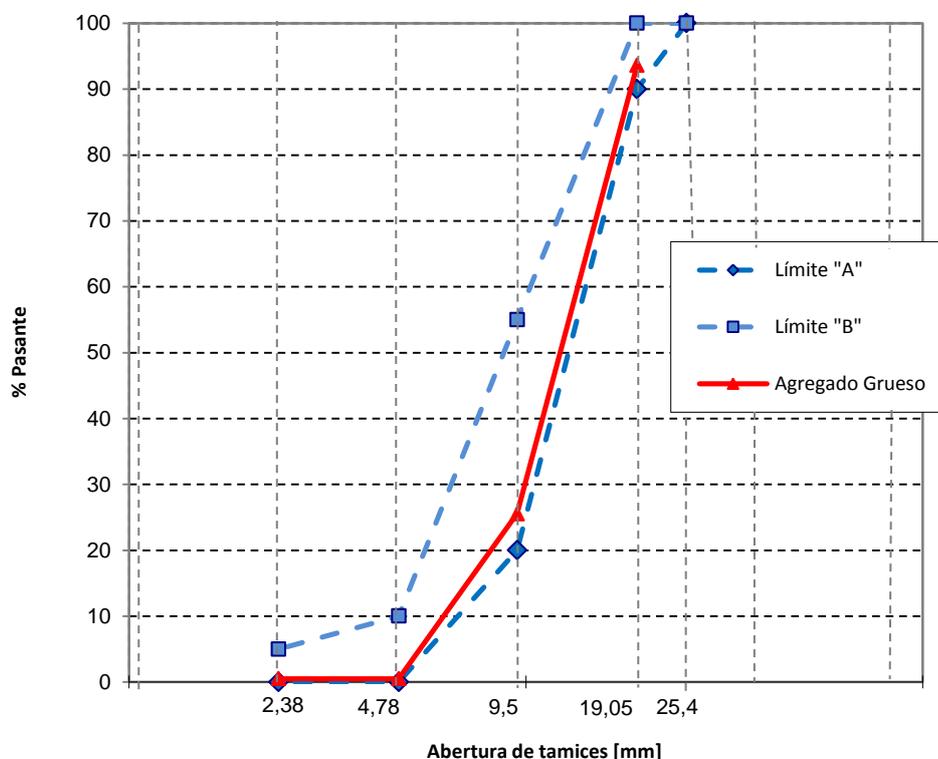


Figura 5.1 Granulometría del agregado grueso

El agregado tiene una granulometría continua y dentro de curvas límites, según normativa IRAM 1627 (1997).

El agregado cumple con las exigencias generales que establece el Reglamento CIRSOC 201 (2005) en cuanto a los agregados de densidad normal, considerando sus características, las sustancias perjudiciales y los requisitos de granulometría.

Además el Reglamento CIRSOC 201 (2005) hace referencia que los agregados pétreos, de densidad relativa comprendida entre  $2.000 \text{ kg/m}^3$  y  $3.000 \text{ kg/m}^3$ , procedentes de la desintegración natural o de la trituración de rocas no deben contener sustancias que afecten la resistencia y la durabilidad del hormigón o que ataquen al acero. Los resultados de ensayos químicos indican que los agregados utilizados en la investigación no poseen sustancias nocivas ni perjudiciales que puedan afectar al hormigón.

### 5.2.5 Agregado fino

Se utilizó como agregado fino una arena del paleocauce del río Suquia. En Tabla 5.5 se presentan los resultados de caracterización del agregado fino.

Tabla 5.5 Características del agregado fino

<b>Módulo de finura IRAM 1505:2003</b>	<b>Densidad relativa aparente del agregado saturado y superficie seca IRAM 1533: 2002</b>	<b>Absorción [%] IRAM 1533:2002</b>
3.15	2,66	0,86

En la Figura 5.2 se presenta la distribución granulométrica del agregado fino y las curvas límites según norma IRAM 1627 (1997).

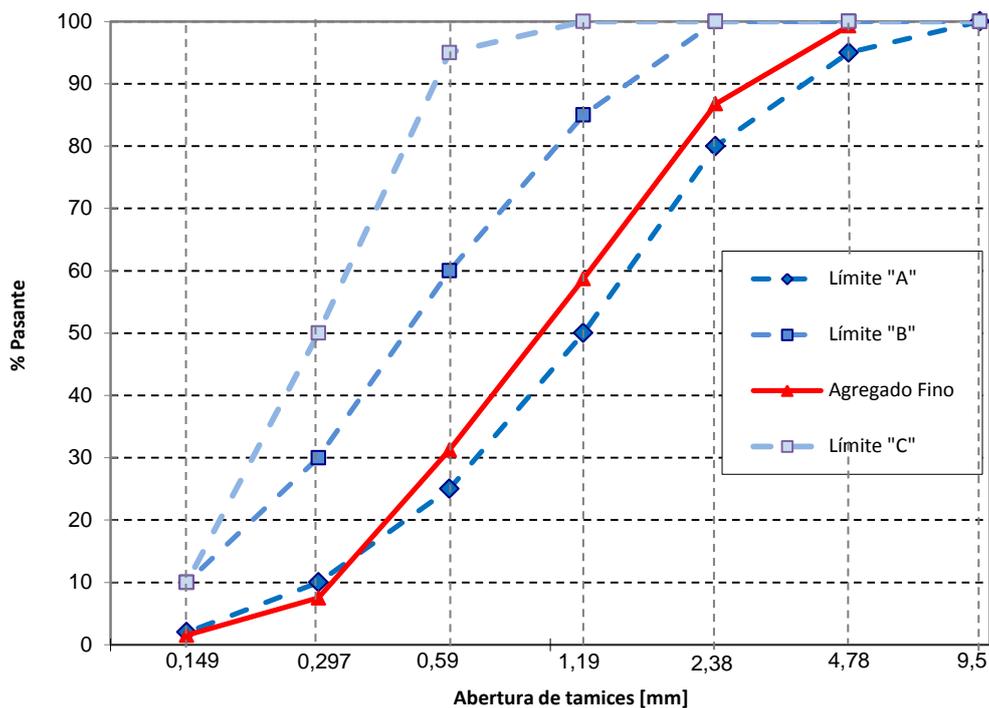


Figura 5.2 Granulometría del agregado fino

El agregado fino es un agregado típico de la zona de Córdoba, con falta de material fino en el tamiz N°100.

Al igual que el agregado grueso, el agregado fino cumple con las exigencias generales que establece el Reglamento CIRSOC 201 (2005) en cuanto a los agregados de densidad normal.

### 5.2.6 Zeolita

La zeolita utilizada se obtuvo de un yacimiento de zeolita en la zona de la Cuenca de Pagancillo, departamento de Independencia, centro oeste de la provincia de La Rioja, Argentina.

Se trabajó con una clinoptilolita que pertenece al grupo de la Heulandita. Según clasificación de la IZA de código de tres letras es HEU.

La clinoptilolita de este trabajo es una zeolita de tamaño de poro medio, es decir entre 5 y 6Å según Jordán Hernández, Betancourt-Riera, Re., Betancourt-Riera, Ri., Cabrera Galdo, y Cabrera, (2013).

### **5.3 Mezclas y metodología**

En este apartado se presentan los criterios de diseño de las mezclas, los materiales empleados y las dosificaciones realizadas.

En el diseño de las mezclas se emplearon los criterios y conceptos del Reglamento CIRSOC 201 y los conceptos de empaquetamiento granular.

#### **5.3.1 Variables**

Las variables en estudio son:

- Zeolita: se reemplazó el cemento en peso por distintos porcentajes de ésta adición. Es la principal variable a analizar.
- Cemento Portland: Tipo de cemento según su composición. Cemento Portland Normal y Cemento Portland Compuesto.

#### **5.3.2 Dosificaciones**

Para el diseño de las mezclas en lo que se refiere a niveles de resistencia a compresión se siguieron las recomendaciones del Reglamento CIRSOC 201 (2005); en el capítulo 2, establece las clases de hormigón según su resistencia especificada a compresión y define su uso según sea su aplicación en estructuras simples (sin armar), para estructuras simples y armadas y para estructuras simples, armadas y pretensadas que se presenta en la Tabla 5.6

Tabla 5.6 Clases de resistencia de hormigón según CIRSOC 201 (2005)

Clase de hormigón	Resistencia especificada a compresión $f'_c$ (MPa)	A utilizar en hormigones
H-15	15	Simples
H-20	20	Simples y armados
H-25	25	
H-30	30	
H-35	35	
H-40	40	Simples, armados y pretensados
H-45	45	
H-50	50	
H-60	60	

En el ámbito local, los hormigones habitualmente utilizados en las obras de arquitectura son de las clases H-15 a H-30, con un tamaño máximo de agregado grueso de 19 mm. En las obras viales, en los pavimentos de hormigón, en los drenes y también en la industria de la prefabricación se utilizan hormigones de clases H-30 y H-35, con tamaños máximos de 13 a 19 mm. Se decidió entonces en función de esto trabajar con un hormigón clase H-35, con tamaño máximo de agregado de 19 mm.

Otro concepto utilizado en la optimización de las mezclas de hormigón es el del empaquetamiento granular; la incorporación de partículas redondeadas y lisas tiende a disminuir el porcentaje de vacíos del esqueleto granular, y en consecuencia se incrementa el factor de empaque. Este factor es un parámetro que depende de la forma, la textura y la distribución de tamaños del agregado, y se define como la razón entre la densidad por unidad de volumen y la densidad absoluta del agregado. Este concepto tiene un efecto importante sobre propiedades del hormigón tales como, porosidad, permeabilidad, e indirectamente, sobre la trabajabilidad y la compactabilidad del hormigón fresco y su resistencia a compresión (Cabrera, 2013) coincidiendo con la exigencia del Reglamento

CIRSOC 201 (2005) en lo que se refiere al contenido de material pulverulento que pasa el tamiz IRAM 300  $\mu\text{m}$ .

Este Reglamento especifica que se debe computar como material pulverulento de un hormigón, a la suma, en masa, de las partículas del cemento, las adiciones minerales pulverulentas, ya sean activas o no, y la fracción de los agregados que pasan el tamiz IRAM 300  $\mu\text{m}$  (N° 50). El contenido de material pulverulento debe ser el indispensable para permitir que el hormigón fresco tenga adecuada cohesión que impida su segregación y excesiva exudación. Los contenidos mínimos se indican en la Tabla 5.7 en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso empleado en el hormigón.

Tabla 5.7 Contenido mínimo de material que pasa por el tamiz IRAM 300  $\mu\text{m}$  en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso (CIRSOC 201, 2005)

<b>Tamaño máximo nominal del agregado grueso</b>	<b>Contenido mínimo de material que pasa por el tamiz IRAM 300 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>(mm)</b>	<b>(kg por metro cúbico de hormigón)</b>
<b>13,2</b>	480
<b>19,0</b>	440
<b>26,5</b>	410
<b>37,5</b>	380
<b>53,0</b>	350

Los contenidos mínimos de material pulverulento indicados en la Tabla 5.7 no son de aplicación para los hormigones de clase igual o menor que H-20, que no sean transportados por bombeo, cuya consistencia no supere la consistencia muy plástica y que en la etapa de hormigón endurecido no estén en contacto con medios agresivos según lo establecido en el Capítulo 2 del Reglamento CIRSOC 201 (2005). Con estas consideraciones se decidió trabajar con dos tipos de cemento, cemento Portland normal y cemento Portland compuesto, reemplazar porcentajes de cemento del 5, 10, 15 y 20 % en peso del cemento, mantener un

contenido de cemento de 450 Kg por metro cúbico de hormigón y la relación a/ma (agua – material aglomerante) constante en 0,41.

A continuación se presentan las dosificaciones realizadas. Se designó cada mezcla con dos letras y un número. La primera letra en todos los hormigones es la “Z” que corresponde a zeolita, la segunda letra hace referencia al cemento empleado, “N” para cemento normal y “C” para cemento compuesto. El número indica el porcentaje de reemplazo en peso de cemento por zeolita en la mezcla. Los números son el “0” para la mezcla patrón, el 5, 10, 15 y 20. Así un hormigón designado como ZC15 significa que es un hormigón realizado con cemento compuesto y al que se le ha reemplazado la cantidad de cemento, en peso, en un 15% por zeolita.

La trabajabilidad se consiguió con el empleo de un aditivo plastificante. Después de varias pruebas se adoptó utilizar la misma dosis de aditivo para todas las mezclas. La dosis empleada fue 0,35% del peso del material aglomerante, esto es cemento más zeolita.

En la Tabla 5.8 se presentan las dosificaciones de las series con cemento Portland normal y con cemento Portland compuesto

Tabla 5.8 Dosificación para hormigones para un m<sup>3</sup> de mezcla

Material / Hormigones	ZN0	ZN5	ZN10	ZN15	ZN20	ZC0	ZC5	ZC10	ZC15	ZC20
Cemento CPN40 [Kg.]	450,0	427,5	405,0	382,5	360,0	-	-	-	-	-
Cemento CPC40 [Kg.]	-	-	-	-	-	450,0	427,5	405,0	382,5	360,0
Agua [Kg.]	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
Adición (Zeolita) [Kg.]		22,5	45,0	67,5	90,0		22,5	45,0	67,5	90,0
Agregado grueso [Kg.]	973	968	963	958	953	973	968	963	958	953
Agregado Fino [Kg.]	840	836	832	827	823	840	836	832	827	823
Aditivo Plastificante [Kg.]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Relacion a/c	0,41	0,43	0,46	0,48	0,51	0,41	0,43	0,46	0,48	0,51
Relacion a/ma	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41

Se fabricaron dos tipos de probetas: ambas cilíndricas pero de diferente tamaño. Probetas pequeñas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y probetas grandes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Las probetas pequeñas con un volumen de 0,00157 m<sup>3</sup> y las grandes de 0,00530m<sup>3</sup>.

Todas las probetas se moldearon según procedimientos de la norma IRAM 1534 (2004).

Una vez preparadas las probetas, se mantuvieron en sus moldes en el laboratorio durante 24 horas cubiertas para no perder humedad. A las 24 horas se desmoldaron e introdujeron en una pileta de curado, hasta la edad de ensayo correspondiente.

En la Figura 5.3 se observan los moldes utilizados para las probetas de 10 x 20.



Figura 5.3 Moldes para probetas

### 5.3.3 Procedimiento de mezclado

El hormigón se amasó en una hormigonera de eje vertical de 60 litros de capacidad del siguiente procedimiento: se introdujo en primer lugar el agregado grueso, luego se colocó el agregado fino ambos en condición de saturado superficie seca. Luego se agregó un tercio del agua de mezclado y se mezcló por unos minutos hasta lograr que se unificaran.

Posteriormente se agregó el cemento y la adición, en caso de corresponder, y se mezcló para homogeneizar la mezcla durante un minuto. A continuación se añadió el agua de mezclado restante en dos etapas. Una primera, aproximadamente 60% del agua de dosificación y una segunda (20%) junto con el aditivo plastificante. Se amasó todo durante 3 minutos aproximadamente, se verificó la homogeneidad de la mezcla, y finalmente se mezcló durante 2 minutos más.

Luego se realizó la medida del asentamiento del cono de Abrams, IRAM 1536 (1978).

#### 5.3.4 Metodología

A 7, 28, 90 y 180 días se evaluó la resistencia a compresión axial (norma IRAM 1546, 2013). A 90 y 180 días se determinó esta resistencia, pues es muy importante la evolución de ésta característica en mezclas con adiciones dado la actividad puzolánica de la adición.

A los 28 días se determinó resistencia a tracción por compresión diametral (Norma IRAM 1658, 1995) y determinación de módulo elástico (Norma ASTM C469-94). A los 90 días se evaluó indicadores de durabilidad tales como: absorción (Norma ASTM C642, 2013), succión y velocidad de succión capilar (Norma IRAM 1871, 2004), permeabilidad al aire (Norma Suiza SIA 262/1-E, 2003) y determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido (Norma IRAM 1554, 1983).

#### **Resistencia a compresión axial**

Se determinó la resistencia a compresión axial según norma IRAM 1546 (2013). Se ensayaron probetas cilíndricas de 10 cm. de diámetro y 20 cm. de altura. Las probetas permanecieron en cámara de curado húmeda hasta tres horas antes de ser ensayadas para todas las edades, salvo a 180 días. Estas probetas fueron sacadas del curado a los 90 días y permanecieron dentro del laboratorio hasta el momento de ser ensayadas.

Se ensayaron con prensa hidráulica con carga máxima de 100 Tn. En la Figura 5.4 se muestra una probeta durante el ensayo y la forma de rotura de la misma.



Figura 5.4 Probeta ensayada a compresión axial

### **Resistencia a tracción por compresión diametral**

La resistencia a tracción por compresión diametral se realizó según norma IRAM 1658 (1995). El ensayo se efectuó a los 90 días de moldeadas las probetas. Las probetas utilizadas fueron cilíndricas de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura. Permanecieron en cámara húmeda de curado hasta 3 horas antes de ser ensayadas.

En la Figura 5.5 se observa una probeta ensayada a tracción por compresión diametral, el equipamiento utilizado para la realización del ensayo y la forma de rotura.



Figura 5.5 Probeta ensayada a tracción por compresión diametral.

### **Determinación de módulo elástico**

El modulo elástico se determinó según establece la norma ASTM C469 (2014) a los 28 y a los 90 días.

En la Figura 5.6 se presenta una probeta durante la determinación del módulo elástico y el comparador utilizado para la medición de la deformación.



Figura 5.6 Determinación del módulo elástico

---

### **Determinación de absorción de agua**

La absorción como parámetro, implica la capacidad que tiene el material de retener agua. La absorción de agua es una propiedad importante de ser considerada en hormigones, pues al ser el hormigón un material poroso; tanto el volumen, tamaño y distribución de los poros y sus características, regulan la rapidez con que el hormigón absorbe agua y otros líquidos o gases, y su permanencia en los mismos.

La absorción de agua, se ve influenciada por la permeabilidad-absorción de la pasta, los agregados y la interface entre ellos. La permeabilidad de la pasta, depende de la relación agua/cemento, del grado de hidratación del cemento, de la duración y calidad del curado y de la presencia o no de adiciones.

La existencia de adiciones en hormigones modifica la pasta de cemento, pues la actividad puzolánica de éstas hacen que reaccionen con la portlandita producto de la hidratación del cemento formando nuevos silicatos de calcio hidratados, y en consecuencia modificando la porosidad de la pasta (Raggiotti et al., 2012). Esta modificación resulta de importancia pues incide en la naturaleza y distribución de los poros de la masa del hormigón, teniendo efectos directos en los mecanismos de transporte en ella. (Raggiotti, Positieri & Oshiro, 2013).

En esta tesis, debido a la incorporación de zeolita en distintos porcentajes de reemplazo del cemento en los hormigones estudiados, se considera importante evaluar la absorción de agua como parámetro.

Se determinó la absorción de agua de los hormigones endurecidos según norma ASTM C642 (2013) a los 90 días. Se consideró esta edad de ensayo para poder observar como afectaba esta propiedad la incorporación de zeolita cuando los hormigones ya hubieran desarrollado el efecto puzolánica de esta adición.

### **Determinación de la capacidad de succión y velocidad de succión capilar**

Para Naber (2012), la capacidad y la velocidad de succión del hormigón, y particularmente del hormigón de recubrimiento, son parámetros asociados con la durabilidad de las estructuras de hormigón.

La succión capilar se produce como consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los poros en el hormigón y otros materiales porosos.

Este mecanismo de transporte puede favorecer el ingreso de agentes agresivos, por lo que se procura obtener valores de succión capilar bajos para disminuir el ingreso de estos agentes, y en consecuencia disminuir el ataque del hormigón mediante este mecanismo.

La succión capilar es un parámetro indirecto de otras propiedades de transporte del hormigón más relacionado con cada agresividad ambiental en particular, velocidad de ingreso de cloruro en ambientes marinos, carbonatación en ambientes industriales, ingreso de sulfato en ambientes con sulfato, ingreso de agua en ambientes con ciclos de congelamiento y deshielo.

Una baja velocidad de succión indica, en general, un hormigón con propiedades de transporte satisfactorias para asegurar una vida útil aceptable de la estructura. (Naber, 2012).

Para Irassar (2001) la succión capilar es un parámetro afectado por la presencia de adiciones en los hormigones. Las adiciones modifican la estructura de poros de la pasta, y como consecuencia de esto se modifica la red de poros libres e interconectados, alterando el mecanismo de transporte mediante succión capilar.

A razón de lo anteriormente expuesto, es que en esta tesis se considera de importancia evaluar la influencia de la zeolita en los hormigones mediante la evolución de parámetros de capacidad de succión capilar y velocidad de succión capilar.

El método de ensayo de la norma IRAM 1871 (2004) establece los procedimientos para la determinación de la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. La norma establece un método gravimétrico que permite calcular tanto la capacidad como la velocidad de succión capilar.

El Reglamento CIRSOC 201 (2005) establece como criterio prescriptivo para asegurar la durabilidad que los hormigones de estructuras que estarán sometidos a cualquier clase de exposición correspondiente a un medio agresivo, deben tener una velocidad de succión capilar menor o igual a  $4\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ , medida con el ensayo de la norma IRAM 1871 (2004).

Se determinó, según la norma IRAM 1871 (2004), la capacidad de succión y velocidad de succión capilar de las muestras a 90 días en rodajas de 5 cm de espesor extraídas de probetas cilíndricas. Se determinó este parámetro a esta edad de ensayo para poder observar como afectaba esta propiedad la incorporación de zeolita cuando los hormigones ya hubieran desarrollado el efecto puzolánica de esta adición.

A continuación en la Figura 5.7 se observan algunas de las probetas evaluadas.



Figura 5.7 Probetas durante la determinación de la capacidad de succión capilar.

### **Determinación de permeabilidad al aire**

La permeabilidad al aire mide el aire presente en los poros del hormigón. Una medida de permeabilidad al aire alta implica una gran cantidad de aire en los poros, es decir un gran volumen de poros. Por lo tanto, la permeabilidad al aire en hormigones nos brinda información sobre la porosidad de esos hormigones; esto hace importante medir este parámetro como indicador de la durabilidad del material.

Como la presencia de adiciones en hormigones modifica su porosidad, se determinó la permeabilidad al aire según norma Suiza SIA 262/1-E (2003) en los hormigones estudiados en esta tesis con el objeto de ver como se afecta esta propiedad con la presencia de zeolita.

La norma Suiza SIA 262 (2003) establece que la permeabilidad del hormigón de recubrimiento debe verificarse mediante ensayos de permeabilidad, por ejemplo, midiendo la permeabilidad al aire.

Para la medición de la permeabilidad al aire se utilizó el Permea-TORR, que es un instrumento diseñado precisamente con este fin. El equipo mide de manera no destructiva el aire presente en los poros de hormigón a través de un mecanismo de válvulas que se cierran y abren, un sistema de doble cámara y una bomba que genera vacío. Mediante la medición de los cambios de presión que se generan en ambas cámaras se determina un coeficiente de permeabilidad al aire “kT” que tiene en cuenta, el área de la cámara interna, la viscosidad del aire, el coeficiente de rugosidad del hormigón, la presión atmosférica, el aumento en la presión en la celda interna al finalizar el ensayo, los tiempos de ensayo y la profundidad aproximada de hormigón afectada por el ensayo.

La norma Suiza SIA 262/1-E (2003) establece la clasificación de la permeabilidad al aire según el parámetro kT. En la Tabla 5.7 se presenta dicha clasificación.

Tabla 5.7 Clasificación de la Permeabilidad al aire según parámetro kT

Clase	kT ( $10^{-16} \text{ m}^2$ )	Permeabilidad
PK1	< 0,01	Muy baja
PK2	0,01 - 0,1	Baja
PK3	0,1 - 1,0	Moderada
PK4	1,0 - 10	Alta
PK5	> 10	Muy alta

En la Figura 5.8 se presentan las zonas con las distintas clases de permeabilidad en un gráfico característico de la determinación de permeabilidad al aire en hormigones.

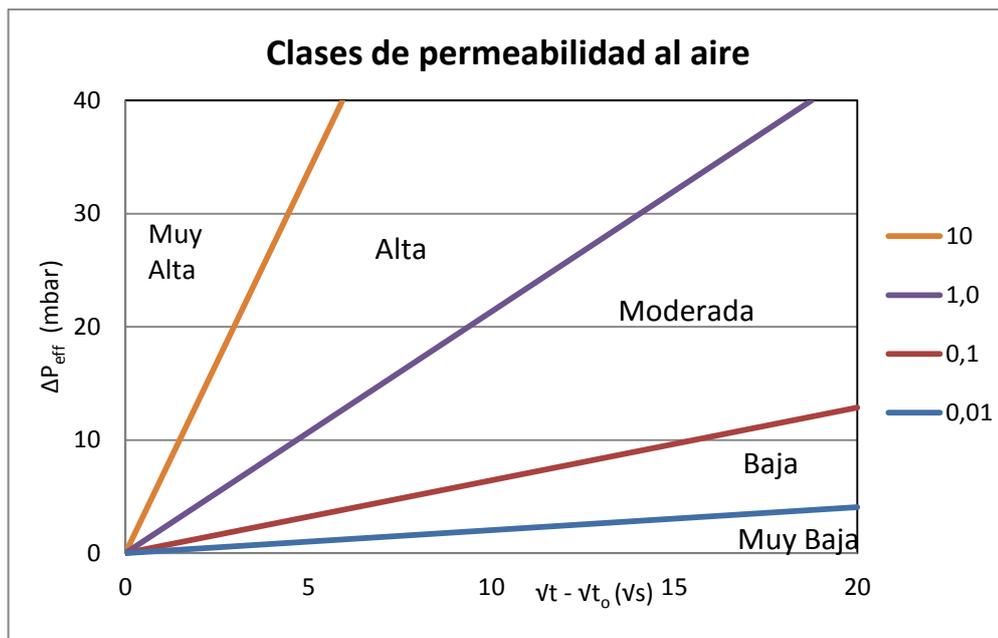


Figura 5.8 Zonas con distinta clase de permeabilidad al aire

La determinación de la permeabilidad al aire se realizó según norma Suiza SIA 262/1-E (2003) a los 90 días de edad en rodajas de 5 cm. de espesor extraídas de probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.

En la Figura 5.9 se aprecia el equipo Permea-TORR, y su aplicación en una probeta.



Figura 5.9 Medición de la permeabilidad al aire con equipo PermeaTORR™

### Determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido

La determinación de la penetración del agua sometida a presión en el hormigón endurecido es un parámetro indirecto de la durabilidad del material. Pues indica la permeabilidad de éste.

Se determinó la resistencia a la penetración de agua a presión según norma IRAM 1554 (1983). El método de la norma somete a las muestras a una secuencia y tiempo de mantenimiento de presiones de agua, finalizado el último ciclo la probeta se divide en dos mitades lo que permite:

- medir la penetración máxima del agua en milímetros
- el cálculo de la media aritmética de la penetración de agua en milímetros

El Reglamento CIRSOC 201 (2005) establece como criterio prescriptivo para asegurar la durabilidad que los hormigones de estructuras que estarán sometidos a cualquier clase de exposición correspondiente a un medio agresivo, tener una profundidad de penetración promedio menor a 30 mm. y una profundidad de penetración máxima menor a 50 mm. medida con el ensayo de la norma IRAM 1554 (1983).

En la Figura 5.10 se presentan probetas siendo ensayadas con el equipo de penetración de agua a presión.



Figura 5.10 Resistencia a penetración de agua a presión

Se evaluó la resistencia a la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido según norma IRAM 1554 (1983). La medición se realizó en probetas de 15 cm de altura y 15 cm de diámetro extraídas y aserradas de probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.

### **Determinación de la profundidad de carbonatación**

La determinación de la profundidad de carbonatación fue realizada con una solución de fenolftaleína al 1% que indica la diferencia de pH entre el hormigón no carbonatado y el frente de carbonatación. Se rociaron con ésta solución las superficies de las probetas recién fracturadas, antes que la superficie expuesta pudiese carbonatar por contacto con el aire, y luego se midió el frente carbonatado.

Si la zona impregnada mantiene su color original, indica que esa zona ya está carbonatada; por el contrario, en las zonas en que se produce un cambio en la coloración, tornándose violeta, indica que el hormigón aún no está carbonatado. Con este procedimiento es posible determinar la profundidad del frente de carbonatación.

Se midió la profundidad de carbonatación en probetas expuestas durante un año a ambiente natural. Se utilizaron probetas cilíndricas de 20 cm de alto y 10 cm de diámetro.

En la Figura 5.11 se presenta una imagen de las probetas rociadas con una solución de fenolftaleína al 1%.

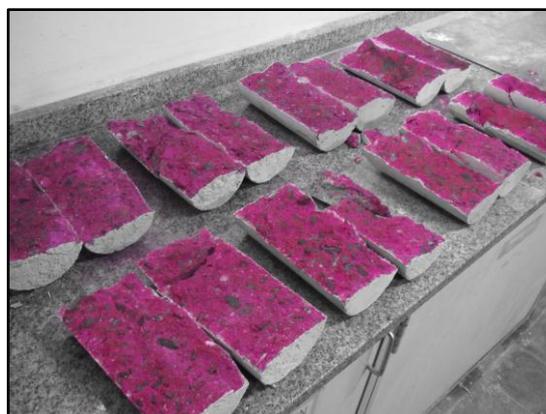


Figura 5.11 Probetas rociadas con fenolftaleína para determinación de carbonatación



## Capítulo 6

<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>
-------------------------------

Este capítulo reúne los resultados del trabajo experimental donde en el apartado 6.1 se presentan los resultados correspondientes a la caracterización físico química del material zeolítico. En el apartado 6.2 se presentan los resultados de los hormigones en estado fresco y en el apartado 6.3 los resultados en estado endurecido. En estado endurecido se analizan y discuten la influencia del porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita y el tipo de cemento en la resistencia mecánica del hormigón: resistencia a compresión, módulo elástico y resistencia a tracción por compresión diametral, y en los parámetros indicadores de durabilidad, tales como absorción, succión y velocidad de succión capilar, permeabilidad al aire, resistencia a la penetración de agua a presión y carbonatación.

## 6.1 Caracterización físico química de la zeolita

A continuación se presenta la caracterización del material zeolítico según distintas técnicas físico químicas.

### 6.1.1 Espectroscopia por fluorescencia de rayos X

A partir de la espectroscopia por fluorescencia de rayos X con un equipo Rigaku FX2000, se obtuvieron datos de los elementos principales componentes del material zeolítico.

La Tabla 6.1 muestra la composición química de la mezcla según esta técnica

Tabla 6.1 Composición química (%) del material puzolánico determinada por FRX (LOI: Pérdida de ignición)

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	S	total
59.81	0.19	14.32	1.04	0.01	0.83	5.50	5.76	1.36	0.02	7.47	3.36	99.67

Según la clasificación de la norma ASTM C618 (2003), y de acuerdo sólo a los requerimientos químicos, corresponde a una puzolana clase F, aunque con una mayor pérdida por ignición (7,47%) y SO<sub>3</sub> (~ 8%) valores.

Según la composición química mediante espectroscopia por fluorescencia de rayos X, los óxidos presentes en la muestra no sólo están dentro de rangos contemplados en la norma ASTM C618 (2003), sino que presentan valores similares a los encontrados en zeolitas estudiadas por otros autores como Blanco Varela et al. (2005), Caputo, Liguori, y Colella, (2008); Najimi et al. (2012), Vejmelková et al. (2015) entre otros.

### 6.1.2 Densidad

La densidad se determinó con picnómetro. El picnómetro es un frasco de reducidas dimensiones (de 10 a 100 ml) con un tapón esmerilado y hueco, que permite mantener dentro del mismo un volumen de líquido constante. El ensayo se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación y Tecnología Química (CITeQ), UTN, Facultad Regional Córdoba.

Para medir la densidad de la zeolita se realizó el siguiente procedimiento:

- I. Se pesó el picnómetro vacío. ( $m_{\text{picnómetro}}$ )
- II. Se pesó el picnómetro lleno de agua (destilada), y así se obtuvo: ( $m_{\text{picnómetro} + \text{agua}}$ )
- III. Se pesó la muestra en el picnómetro. ( $m_{\text{picnómetro} + \text{muestra}}$ )
- IV. Se determinó el peso de la muestra como la diferencia entre el peso de muestra en el picnómetro y el peso del picnómetro vacío. ( $m_{\text{muestra}}$ )
- V. Se pesó la muestra en el interior del picnómetro lleno de agua hasta el enrase. ( $m_{\text{picnómetro} + \text{agua} + \text{muestra}}$ )

Según pesos de Tabla 6.2 y en función de la Ecuación 6.1 se tiene:

$$\rho = \frac{m_{\text{muestra}}}{\frac{m_{\text{pic+agua}} - (m_{\text{pic+agua}} - m_{\text{muestra}})}{\rho_{\text{agua}}}} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

$$\rho = 2,13 \text{ g/cm}^3$$

Para Anicua Sánchez et al. (2009) la densidad de las zeolitas depende del tamaño de las partículas, pues el grado de comprensión y el arreglo de partículas son afectados por el tamaño de partículas.

Tabla 6.2 Pesos en gramos para la determinación de densidad según picnómetro de la zeolita

Pesos	
Peso picnómetro	19,9609
Peso pic + muestra	20,8013
Peso pic + agua	48,1952
Peso muestra	0,8404
Peso pic + agua + muestra	48,6420
densidad del agua a 18°C [g/cm <sup>3</sup> ]	0,99868

A continuación se muestra en el Figura 6.1 el picnómetro utilizado



Figura 6.1 Picnómetro con agua destilada a la izquierda y con agua y la muestra a la derecha

### 6.1.3 Área superficial

El área superficial específica de las muestras sólidas (SBET) fue determinada con el equipo Micromeritics PulseChemisorb 2700, con una desgasificación previa de 60 min a 390°C. El

equipo pertenece al CITEQ, de la Facultad Regional Córdoba, UTN. En esta institución se realizó la medición del área específica.

El área superficial es igual al  $V_m$  (volumen de monocapa) multiplicada por el área cubierta por el volumen unitario del gas utilizado. Usando  $N_2$ , el área superficial se obtiene mediante la Ecuación 6.2:

$$SBET \text{ (m}^2\text{/g)} = 4,35 V_m \text{ (cm}^3 \text{ (CNTP)/g)} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde: 4,35 es una constante que involucra el área cubierta por una molécula de  $N_2$ .

El área superficial obtenida para la zeolita fue de  $11 \text{ m}^2\text{/g}$ .

#### 6.1.4 Granulometría

La muestra es granulométricamente heterogénea con 40.62% de partículas de tamaño mayor a  $1000 \mu\text{m}$ , y 59.38% de partículas con tamaño menor o igual a  $1000 \mu\text{m}$ . La zeolita en estudio no cumplimentó el requerimiento físico de la norma ASTM C618 (2003) de finura que limita a un máximo de 34% el material retenido en tamizado húmedo en tamiz #325 ( $45 \mu\text{m}$ ). Esto se debe a su granulometría heterogénea, y al alto porcentaje de partículas de tamaño superior a  $1000 \mu\text{m}$ .

La distribución granulométrica de la fracción gruesa y fina se presentan en la Tabla 6.3 y en la Figura 6.2 respectivamente.

La granulometría se determinó por tamizado de la fracción gruesa ( $\emptyset > 1000 \mu\text{m}$ ), y mediante un analizador de distribución del tamaño de partículas por difracción láser (Partica IA- 950V2, HORIBA) la fracción fina que pasa el tamiz n ° 18 ( $\emptyset \leq 1000 \mu\text{m}$ ). El acondicionamiento de la muestra y la granulometría de la fracción gruesa se realizaron en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA), de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC y del CONICET. La granulometría de la fracción fina se llevó a cabo en la Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FAMAF) de la UNC.

Tabla 6.3 Granulometría de fracción más gruesa del material puzolánico.

Tamiz	Material retenido (%)
#7 (2830 $\mu\text{m}$ )	4.92
#8 (2380 $\mu\text{m}$ )	3.94
#14 (1410 $\mu\text{m}$ )	19.38
#16 (1190 $\mu\text{m}$ )	7.64
#18 (1000 $\mu\text{m}$ )	4.74

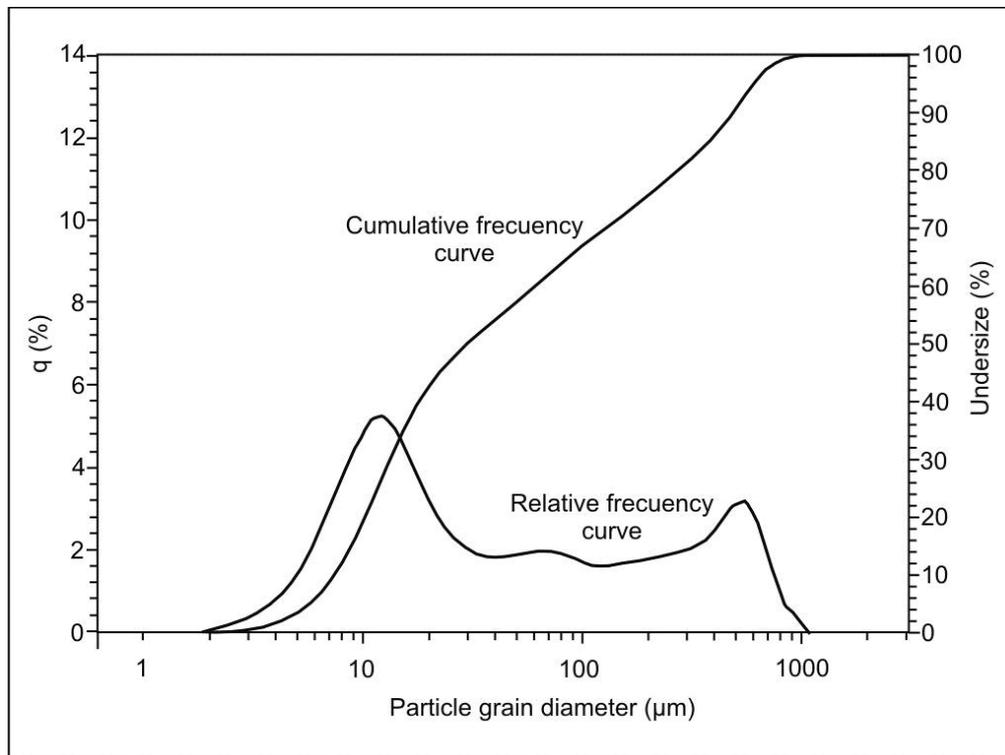


Figura 6.2 Curvas de frecuencia acumulada y relativa para el material puzolánico que pasa el tamiz #18 (1000 micras).

Anicua Sánchez et al. (2009) señalan que en partículas de 1 y 0,50 mm (de 1000 a 500  $\mu\text{m}$ ) se presentan formaciones de mesoporos o poros cavidad en las partículas, y fisuras en partículas menores de 0,25 mm. Brady y Weil (1999) indican que las fisuras se generan

---

como resultado de la pérdida de humedad en las partículas. Cuando las partículas pierden humedad, tienen a contraerse y formar las grietas.

### 6.1.5 Difractometría de Rayos X (DRX)

El estudio de difracción de rayos X se realizó con un difractómetro Rigaku D-Max III - C , que trabaja en 35 kV y 15 mA , utilizando Cu  $K\alpha_{1,2}$  radiación ( $\lambda= 1,541840 \text{ \AA}$ ) filtrada con un monocromador de grafito en el haz difractado, entre 3 y 60  $^{\circ}2\theta$ , en 0.03  $^{\circ}2\theta$  incrementos con un segundo de tiempo de recuento por incremento. La cuantificación de las fracciones de masa de las fases minerales identificados por DRX se realizaron con el software de X'Pert High-Score (PANalytical) utilizando el factor de escala y la Relación de Intensidad de Referencia (RIR) a partir de la base de datos ICDD (Centro Internacional de Datos de Difracción). Se utilizaron los archivos ICDD 01-083-1260 (clinoptilolita-Na), 01-074-1433 (yeso), 01-071-1150 (albita), 01-073-1661 (biotita) y 01-075-0443 (cuarzo). El análisis del programa es semi-cuantitativo y utiliza el método RIR propuesto por Chung (1974).

La difracción de rayos X se realizó en el laboratorio del Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur.

El material corresponde a una mezcla de minerales, la zeolita es la fase predominante. De acuerdo con la identificación de minerales por DRX que se presentan en la Figura 6.3, y la determinación de porcentaje semi-cuantitativa de fases minerales por el método RIR propuesto por Chung (1974), la muestra se compone principalmente de zeolita de la serie de clinoptilolita-heulandita (51%), yeso (13%), albita (17%), biotita (10%) y cuarzo (9%).

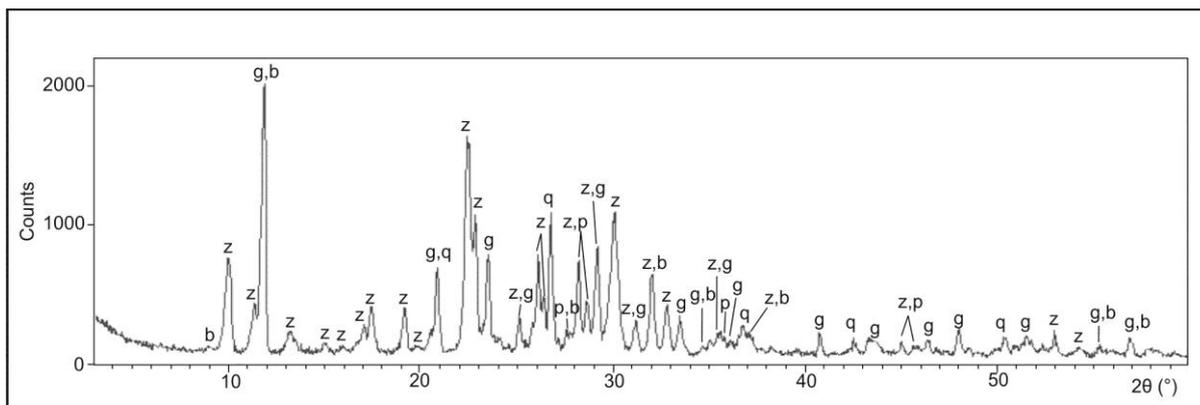


Figura 6.3 Patrón de difracción del material puzolánico. z: zeolita, g: yeso, p: plagioclasa, b: biotita, q: cuarzo.

### 6.1.6 Análisis por espectroscopia IR

Se analizó la muestra de material zeolítico mediante la técnica de pastillas de KBR al 1% con un Espectrómetro infrarrojo FTIR (Jasco-5300) cuyo registro comprende de 400 a 4600  $\text{cm}^{-1}$  con 16 barridos y una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ . El equipo pertenece al CITEQ, de la Facultad Regional Córdoba, UTN.

En la Figura 6.4 se presenta el espectro del material zeolítico analizado por FTIR.

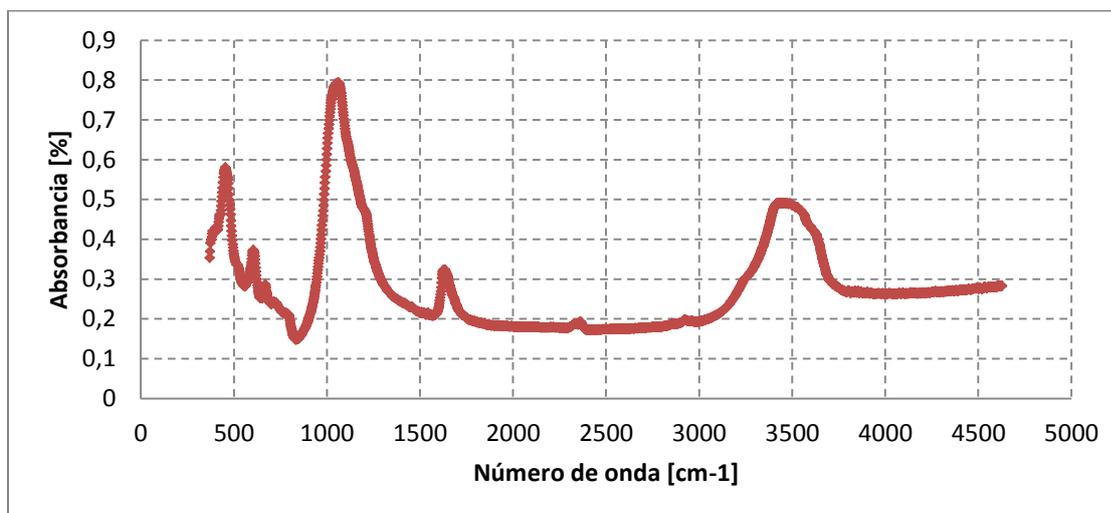


Figura 6.4 Espectro FTIR del material zeolítico en absorbancia

---

En la Figura 6.4 se observa a los  $3618\text{ cm}^{-1}$  el grupo aluminol (Al-OH) y a  $3448\text{ cm}^{-1}$  una banda ancha de vibración de tensión de OH de las moléculas de agua que dificultan la asignación en esa zona. A los  $1628\text{ cm}^{-1}$  se encuentran las flexiones y vibraciones de la molécula del agua. A los  $1021\text{ cm}^{-1}$  se encuentra una banda intensa debida a la vibración de los enlaces Si-O. La señal de  $520$  y  $480\text{ cm}^{-1}$  corresponde a alguna arcilla o esmectita sódica (montmorillonita o bedellita o nantronita).

### 6.1.7 Microanálisis Semicuantitativo por Sonda de electrones (SEM – EDS)

La obtención de imágenes SEM se realizó en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX) de la Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FAMAF) de la UNC. Según estas imágenes SEM la zeolita se presenta como pequeños cristales laminares agrupados en forma de rosetas agregadas. Esto puede observarse en la Figura 6.5.

De acuerdo a su composición semi-cuantitativa, la zeolita, corresponde a una clinoptilolita (Si: Al  $\geq$  4,0) rica en sodio, Clinoptilolita-Na. En la Tabla 6.4 se presenta la composición semicuantitativa.

Los mapas de composición (Si, Al, Na, K, Mg, S, Ca, Fe, Ti), las imágenes SEM y los análisis semi-cuantitativos se obtuvieron en muestras de polvo recubiertas con oro, con un Carl Zeiss FE (emisión de campo)-SEM Zigma microscopio de alta resolución equipada con un EDS. Se utilizaron alrededor de 30mg de muestra.

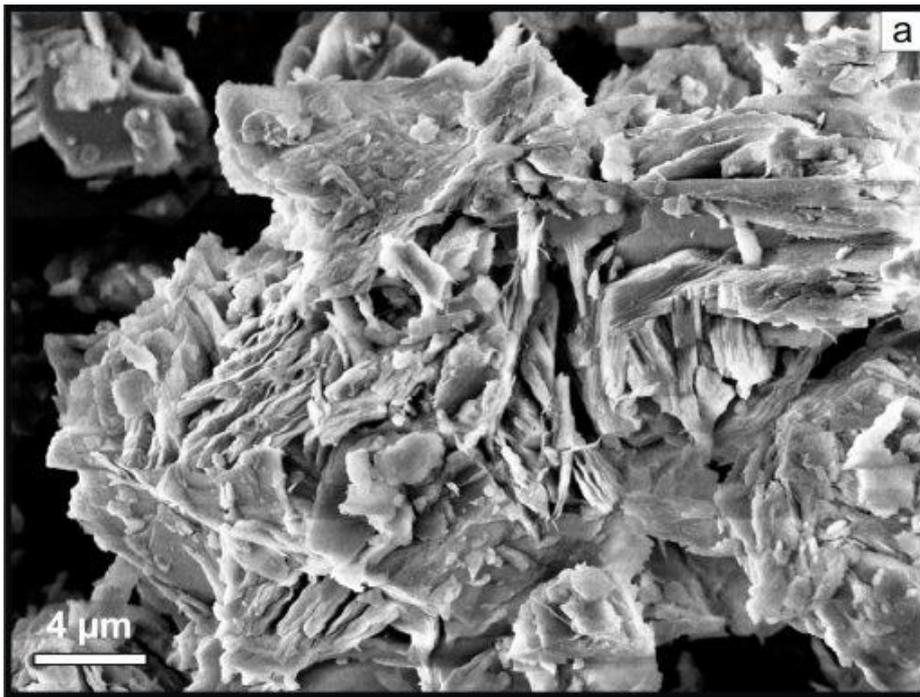


Figura 6.5 Imagen mediante SEM de los cristales laminares de clinoptilolita-Na.

Tabla 6.4 Composición semi-cuantitativa (EDS) de la clinoptilolite-Na. Recalculada al 100% considerando 13.5% de H<sub>2</sub>O (H<sub>2</sub>O promedio de cinco análisis de Sheppard & Gude 1969).

Composición química	(%)
SiO <sub>2</sub>	64.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.4
MgO	0.8
CaO	0.6
Na <sub>2</sub> O	5.9
K <sub>2</sub> O	1.9
H <sub>2</sub> O	13.5
Total	100.0

La zeolita es principalmente representada por la suma de mapas de Si, Al y Na con menor proporción de K, Mg y Ca. La Biotita es representada por la suma de los mapas de Si, Al, Fe, Mg y en menor medida Ti. La Plagioclasa es representada por la suma de mapas de Si, Al, Na y un poco de Ca, pero, como coincide con los principales elementos de zeolita, podría no ser reconocida en los mapas aunque fue identificada por EDS y DRX.

Aunque el cuarzo fue determinado por DRX podría no ser reconocido en los mapas composicionales porque el Si también es parte de las estructuras de los cristales de clinoptilonita, plagioclasa y biotita.

Con el fin de detectar las fases minerales adicionales, no identificadas por difracción de rayos X, y para evaluar la procedencia de azufre distinto de la fase de yeso, se obtuvieron mapas de composición por FE-SEM-EDS de la fracción fina ( $\leq 1,000 \mu\text{m}$ ) del material puzolánico. Esto se presenta en la Figura 6.6a.

En la Figura 6.6 y Figura 6.7 se presentan los mapas composicionales de los materiales presentes en la muestra del material puzolánicos de la fracción fina.

El yeso es representado por la suma de los mapas de S y Ca. Es importante mostrar que el azufre está totalmente ligado a la fase de yeso. Además, algunos óxidos de hierro / hidróxidos menores (no detectadas por DRX) pueden ser observados (por ejemplo, puntos brillantes en mapas de Fe). Esto puede observarse en la Figura 6.7i.

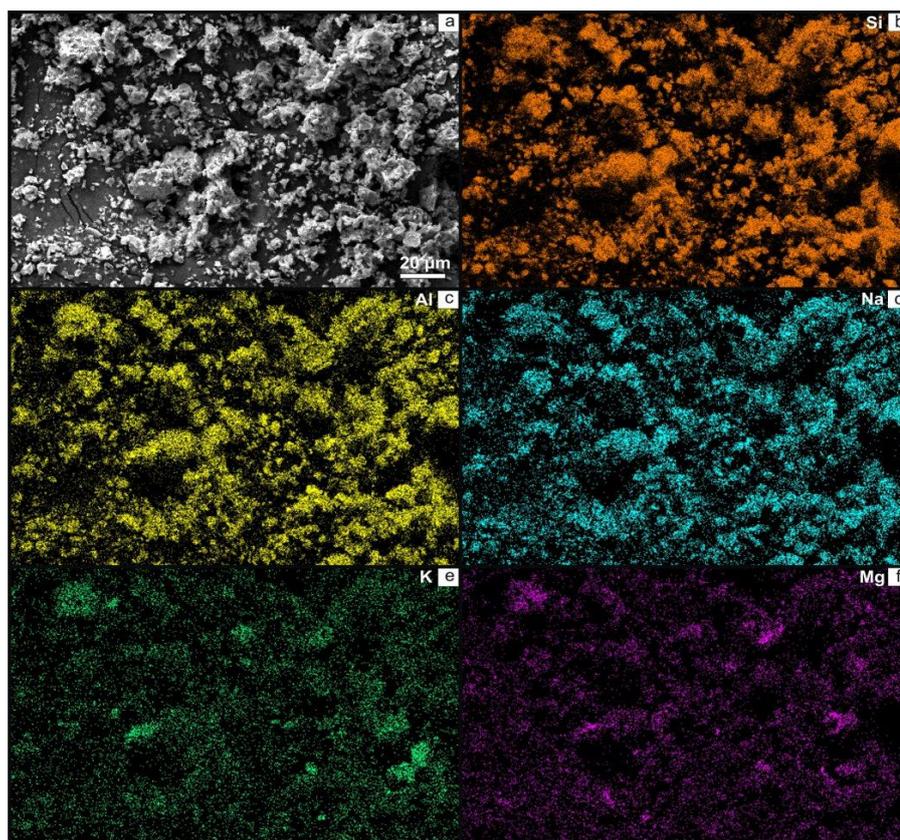


Figura 6.6 FE-SEM-EDS. a) Imagen de electrones secundarios del material puzolánico (18 kV). b-f) mapas de composición de Si (b), de Al (c), Na (d), K (e) y Mg (f), de un mismo sector

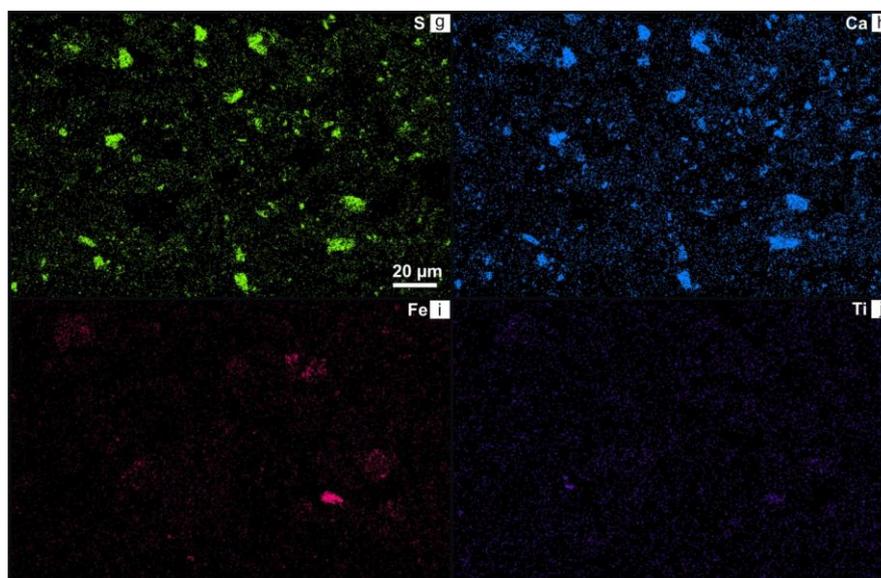


Figura 6.7 FE-SEM-EDS. g-j) Mapas composicionales de S (g), Ca (h), Fe (i) and Ti (j), del sector estudiado en la Figura 6.6a

---

### 6.1.8 Análisis térmicos

Para cuantificar el contenido de yeso (y para compararlo con el porcentaje determinado por el método RIR) se llevó a cabo un análisis DSC-TG. Se realizó simultáneamente los análisis DSC y TG con un equipo Q600 a una velocidad de calentamiento de 10 ° C / min bajo una atmósfera de nitrógeno (100 ml / min) desde temperatura ambiente hasta 1300 ° C.

En la Figura 6.8 se observa el diagrama DSC-TG del material puzolánico. En 1163,97°C un amplio pico endotérmico se pudo detectar que representa la pérdida de masa 6,5% de SO<sub>3</sub>. Se corresponde con 13,98% de yeso (de acuerdo con la fórmula CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O ideal), este valor es similar a la determinada por difracción de rayos X (13%). Después de la extracción de SO<sub>3</sub> y CaO porcentajes para calcular el contenido de yeso a partir del análisis de XRF, 0,95% de CaO y 1,88% de SO<sub>3</sub> (0,75% de S) siguen siendo, la primera posibilidad atribuirlo a la plagioclasa y clinoptilolita-Na, y una segunda como una fase de sulfuro (por ejemplo sulfuro de hierro).

También se analizó la muestra mediante DTA en el CITEQ de la FRC, UTN. El ensayo comenzó a los 20 °C y finalizó a los 870 °C. El peso inicial de la muestra fue 60mg. La rampa de calentamiento del equipo fue de 10 °C/minuto y como referencia se utilizó Alúmina Alfa.

En la Figura 6.9 se presenta la curva de DTA de la muestra zeolítica.

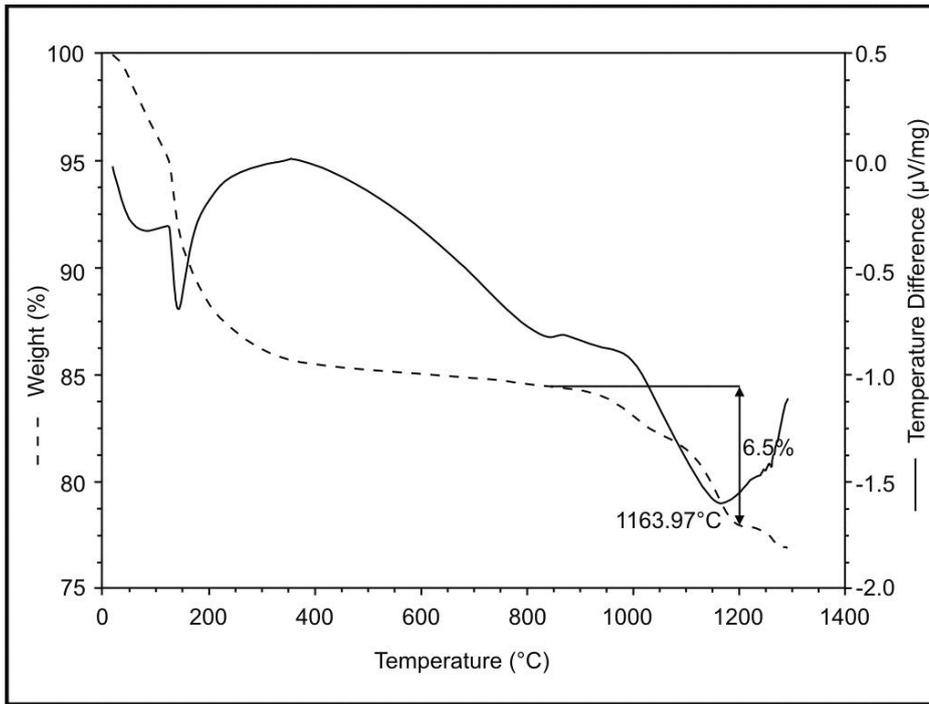


Figura 6.8 Diagrama DSC-TG del material puzolánico. La línea de trazos representa la pérdida de masa (%) determinada por TG y la línea continua representa la diferencia de temperatura ( $\mu\text{V} / \text{mg}$ ) determinada por DSC.

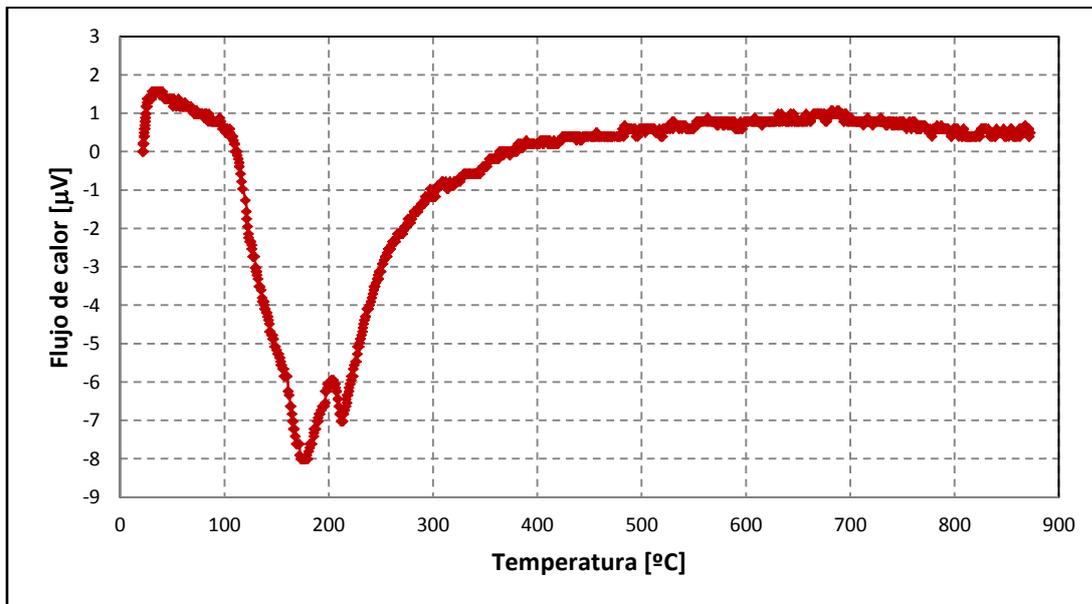


Figura 6.9 Curva DTA de la muestra zeolítica.

En la Figura 6.9 se observan dos picos próximos a una temperatura de 200°C el primer pico es por pérdida de humedad superficial de la muestra y el segundo por pérdida de agua por evaporación interlaminar de la muestra puzolánica, atribuible a la fase sódica.

## **6.2 Comportamiento en estado fresco**

El estado fresco de las mezclas comprende el período que va desde el momento que el cemento se pone en contacto con el agua, hasta que comienza el fraguado. Durante ese período el material debe tener un comportamiento reológico que permita la adecuada colocación y compactación, que evite la formación de nidos de abeja y de poros de aire atrapados, que logre el recubrimiento total de las armaduras, obtenga la mínima segregación y exudación, y una buena terminación superficial. Los defectos que el material pueda incorporar en este periodo, repercutirán de manera desfavorable sobre sus propiedades mecánicas y durables, siendo escasa o nula la posibilidad de revertirlos posteriormente. (Cabrera, 2013).

### **6.2.1 Consistencia**

Se determinó la consistencia a través de la medición del asentamiento mediante el tronco de cono según norma IRAM 1536 (1978). Se encontraron los resultados que se presentan en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Asentamientos de los hormigones

	Hormigón	Asentamiento [cm]
Cemento Normal	ZN0	20,0
	ZN5	7,5
	ZN10	6,0
	ZN15	6,0
	ZN20	4,5
Cemento Compuesto	ZC0	7,5
	ZC5	5,0
	ZC10	5,0
	ZC15	3,5
	ZC20	3,0

Para los dos tipos de cemento y todos los porcentajes de reemplazo de cemento por zeolita a medida que aumenta el contenido de reemplazo disminuye el asentamiento, mostrando la influencia de la adición en la consistencia de las mezclas en estado fresco. El fenómeno encuentra explicación en que la zeolita tiene menos densidad que el cemento que reemplaza, por lo que ocupa más volumen; en consecuencia hay un mayor volumen de pasta para igual contenido de agua. Además por las propiedades microestructurales de la zeolita al tener una estructura porosa y una gran área superficial debido a sus microporos, se convierte un material con gran capacidad de retención de agua.

Shekarchi, Ahmadi y Najimi (2012) encuentran que esta reducción en la trabajabilidad de los hormigones con zeolita es consecuencia de la gran cantidad de poros en la microestructura de la zeolita y a su gran área superficial, lo cual hace que requiere una demanda de agua mayor que el cemento.

A pesar de que se produjo una pérdida de consistencia a mayor reemplazo de cemento por zeolita traduciéndose en una pérdida de trabajabilidad de las mezclas, no se encontró

---

dificultad en el moldeo de probetas, no siendo necesario utilizar ningún tipo de metodología especial para la compactación de los hormigones.

### **6.3 Comportamiento en estado endurecido**

#### **Parámetros de resistencia mecánica**

La resistencia de un material puede ser definida como la capacidad de resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo. Resulta de importancia conocer parámetros de resistencia en el hormigón como la resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de elasticidad para evaluar su capacidad de respuesta mecánica ante solicitaciones.

A continuación, en esta tesis, se evalúa la influencia que tiene el tipo cemento y los distintos porcentajes de reemplazo de éste por la zeolita ante los parámetros de resistencia mecánica de resistencia a compresión (norma IRAM 1546, 2013), resistencia a tracción por compresión diametral (norma IRAM 1534, 2004) y modulo elástico (norma ASTM C469, 2014).

#### **6.3.1 Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión del hormigón es la propiedad más empleada para el cálculo de estructuras y el control de calidad por los proyectistas e ingenieros y es una referencia del material en la industria de la construcción.

Su notoriedad aumenta por la simplicidad para su determinación y el bajo costo de los ensayos de laboratorio. Además, es habitual estimar o correlacionar otras propiedades del hormigón, más complicadas de medir, con los resultados de resistencia a compresión. Esta propiedad también es muy utilizada para el control de la calidad en la producción de hormigones.

En la Tabla 6.6 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de compresión axial según norma IRAM 1546 (2013), realizados a distintas edades.

Tabla 6.6 Resistencia a compresión a distintas edades.

Hormigón	7 días	Diferencia con Hº referencia	28 días	Diferencia con Hº referencia	90 días	Diferencia con Hº referencia	180 días	Diferencia con Hº referencia
Designación	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
<b>ZN0</b>	40,5	0,0	46,0	0,0	53,3	0,0	65,7	0,0
<b>ZN5</b>	37,9	6,4	42,9	6,7	54,9	-3,0	61,6	6,2
<b>ZN10</b>	34,4	15,1	41,5	9,8	51,8	2,8	56,1	14,6
<b>ZN15</b>	34,6	14,6	45,5	1,1	53,1	0,4	62,4	5,0
<b>ZN20</b>	31,2	23,0	45,6	0,9	53,7	-0,8	60,3	8,2
<b>ZC0</b>	30,5	0,0	39,6	0,0	54,7	0,0	56,7	0,0
<b>ZC5</b>	28,3	7,2	40,4	-2,0	49,4	9,7	53,5	5,6
<b>ZC10</b>	32,0	-4,9	40,1	-1,3	50,0	8,6	50,9	10,2
<b>ZC15</b>	30,0	1,6	43,0	-8,6	48,0	12,2	49,0	13,6
<b>ZC20</b>	26,5	13,1	40,3	-1,8	48,1	12,1	58,5	-3,2

Analizando la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo en los hormigones con CPN es posible destacar que:

- A los 7 días la resistencia a compresión de todas las mezclas supera los 30 MPa, siendo el mínimo valor el de la mezcla ZN20 de 31,2 MPa y el valor máximo de 40,5 MPa (ZN0), es decir una diferencia del 23%
- A los 28 días la mínima resistencia es de 41,5 MPa para el ZN10 y la máxima de 46 MPa (ZN0), es decir, que sólo hay una diferencia entre valores máximo y mínimos de 10%.
- A los 90 días, la mínima resistencia es de 51,8 MPa (ZN10) y la máxima de 54,9 MPa (ZN5) con una diferencia de 5%.
- A los 180 días la mínima resistencia es de 56,1 (ZN10) y la máxima de 65,7 (ZN0), es decir una diferencia de 15%.

---

Es decir que la zeolita manifiesta actividad puzolánica con el CPN, por lo que hasta con un 20% de reemplazo de cemento por zeolita a los 180 días se alcanza prácticamente la misma resistencia que el hormigón de referencia.

Analizando la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo en los hormigones con CPC es posible destacar que:

- A los 7 días la resistencia a compresión de todas las mezclas supera los 25 MPa, siendo el mínimo valor el de la mezcla ZC20 de 26,5 MPa y el valor máximo el de la mezcla ZC10 de 32,0 MPa, es decir una diferencia de 17%.
- A los 28 días la mínima resistencia alcanzada es de 39,6 MPa por el ZC0 y la máxima de 43 MPa (ZC15), es decir, que sólo hay una diferencia entre valores máximo y mínimos de 8%.
- A los 90 días, la mínima resistencia es de 48 MPa (ZC15) y la máxima de 54,7 MPa (ZC0) con una diferencia de 13%.
- A los 180 días la mínima resistencia ganada es de 49 (ZNC15) y la máxima de 58,5 (ZC20), es decir una diferencia de 17%.

Con la utilización del CPC la actividad puzolánica de la zeolita produce un leve incremento de la resistencia a compresión a los 180 días del hormigón con 20% de reemplazo con respecto al hormigón de referencia.

En definitiva, tanto en las mezclas con CPN como las con CPC, se produce un aumento de la resistencia con el tiempo, como consecuencia del efecto puzolánico de la zeolita. Sin embargo es de destacar el comportamiento disímil entre mezclas con igual cantidad de zeolita y distinto tipo de cemento. Las mezclas con cemento normal alcanzan mayores resistencias que las de cemento compuesto para igual porcentaje de reemplazo a la misma edad. Por otra parte, el incremento en la resistencia entre los 90 y los 180 días en las mezclas con CPC es menor que en las de CPN para igual porcentaje de reemplazo.

### **Test de Duncan**

Se analizaron los resultados de resistencia a compresión de los hormigones a distintas edades con el test de Duncan. Este test es un procedimiento de comparación múltiple que

utiliza un rango de estudios estadísticos para comparar conjuntos de medias, determinando la diferencia entre esos pares de medias.

El resultado de esta prueba es un conjunto de subconjunto de medias, donde cada subconjunto es o no significativamente diferente con los otros.

Se realizó el test para cada serie de hormigón, para todas las edades de ensayo. Se evaluó la significancia de las medias de cada dosificación, analizando si la variación de contenido de zeolita presentaba significancia en los resultados de resistencia a compresión.

Así, por ejemplo, para la serie con CPN, a los 7 días se tiene cinco dosificaciones diferentes. Las medias de resistencia a compresión son:

- ZN0 = 40,5 MPa
- ZN5 = 37,9 MPa
- ZN10 = 34,4 MPa
- ZN15 = 34,6 MPa
- ZN20 = 31,2 MPa

Se obtiene los valores críticos de Duncan para  $\alpha = 0.05$ ,  $2 \leq p \leq 5$  y 5 grados de libertad

- $d_{0.05,5,5} = 3.89$
- $d_{0.05,4,5} = 3.79$
- $d_{0.05,3,5} = 3.74$
- $d_{0.05,2,5} = 3.64$

Los rangos de Duncan son:

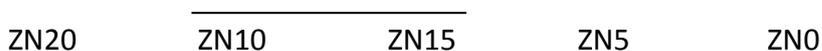
- $D_5 = 1.805$
- $D_4 = 1.759$
- $D_3 = 1.736$
- $D_2 = 1.689$

Comparando el rango entre las medias máxima y mínima con los rangos de Duncan se encuentra si hay diferencia significativa entre las resistencias de esos rangos (Tabla 6.7).

Tabla 6.7 Rangos de Duncan para las resistencia a compresión de la serie con CPN a los 7 días

$p$	$d_{\alpha,p,g,l,error}$	$Dp$	Dif min	Dif max > $Dp$
5	3,89	1,805	9,589	SI
4	3,79	1,759	6,144	SI
3	3,74	1,736	3,286	SI
2	3,64	1,689	0,158	NO

Los resultados se muestran gráficamente en la siguiente figura, donde las medias que están debajo de una línea no son significativamente diferentes.



Realizando el mismo procedimiento para el resto de las series y las distintas edades se tiene los siguientes resultados (Tabla 6.8):

Tabla 6.8 Resultados del test de Duncan para las resistencias a compresión

Serie	Edad	Significancia Duncan
<b>Cemento Portland Normal</b>	7	ZN0 ZN5 <u>ZN10 ZN15</u> ZN20
	28	ZN0 ZN5 <u>ZN10 ZN15</u> ZN20
	90	ZN0 ZN5 <u>ZN10 ZN15</u> ZN20
	180	ZN0 ZN5 <u>ZN10 ZN15</u> ZN20
<b>Cemento Portland Compuesto</b>	7	ZC0 ZC5 <u>ZC10 ZC15</u> ZC20
	28	ZC0 ZC5 <u>ZC10 ZC15</u> ZC20
	90	ZC0 ZC5 <u>ZC10 ZC15</u> ZC20
	180	ZC0 ZC5 <u>ZC10 ZC15</u> ZC20

Con los resultados del test de Duncan se pone de manifiesto que los hormigones con cemento Portland normal a los 7 días no tienen diferencias significativas; para reemplazos del 10 y 15%, a los 28 días no hay diferencias significativas entre el hormigón referencia y el de máximo reemplazo de cemento por zeolita (20%) y a los 90 días también se observa que no hay diferencia significativa entre las resistencias a compresión logradas entre el ZN0 y el ZN20; finalmente a los 180 días no hay diferencias significativas entre los resultados alcanzados por los distintos hormigones con zeolita.

En consecuencia, se puede decir que a partir de los 28 días en los hormigones de la serie CPN, se alcanzan resistencias similares entre todos ellos, y especialmente entre el hormigón referencia y el de máximo reemplazo de zeolita (20%).

Efectuando el mismo análisis con los resultados del test de Duncan en los hormigones con cemento Portland compuesto, se observa que a edades tempranas las resistencias no son significativamente diferentes, mientras que a 90 días las resistencias a compresión de las distintas dosificaciones son significativamente diferentes con respecto al hormigón patrón, pero no lo son entre sí. Para las resistencias a 180 días ya si son significativamente diferentes con respecto al patrón y también entre sí.

En las Figura 6.10, se presenta la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo para todos hormigones elaborados, mostrando que las mezclas con CPN presentan valores mayores de resistencia a compresión que las que contienen CPC, para todos los porcentajes de reemplazo de cemento por zeolita.

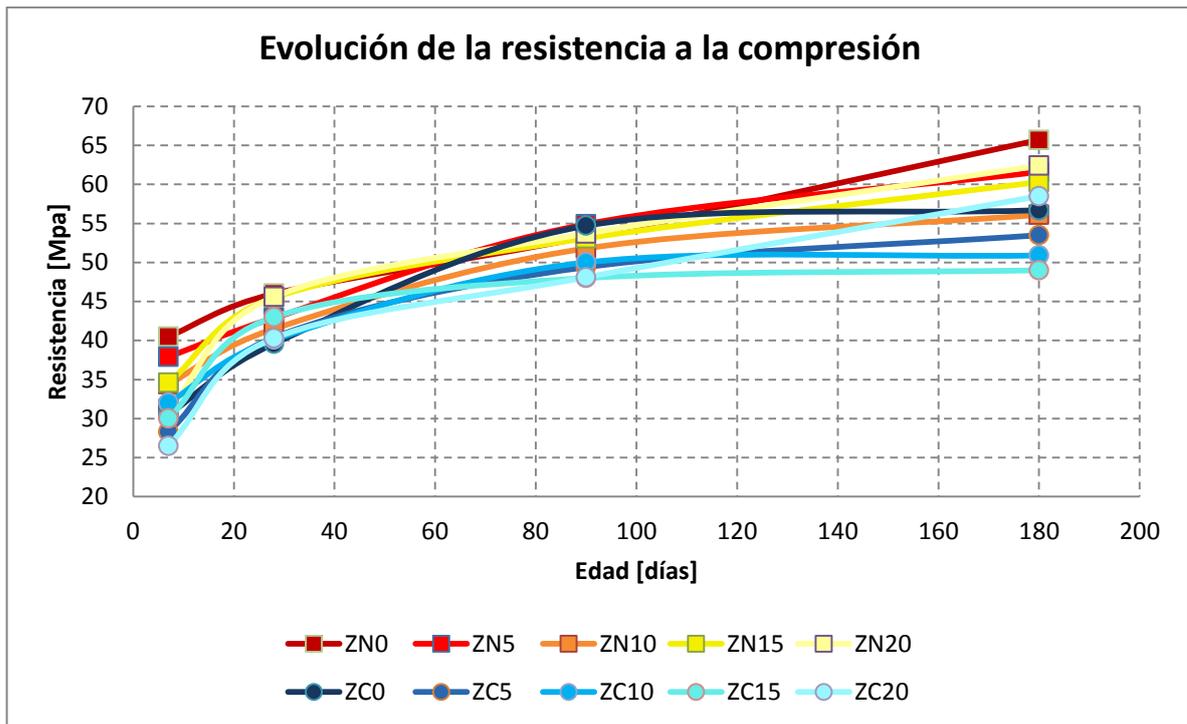


Figura 6.10 Evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo de todos los hormigones

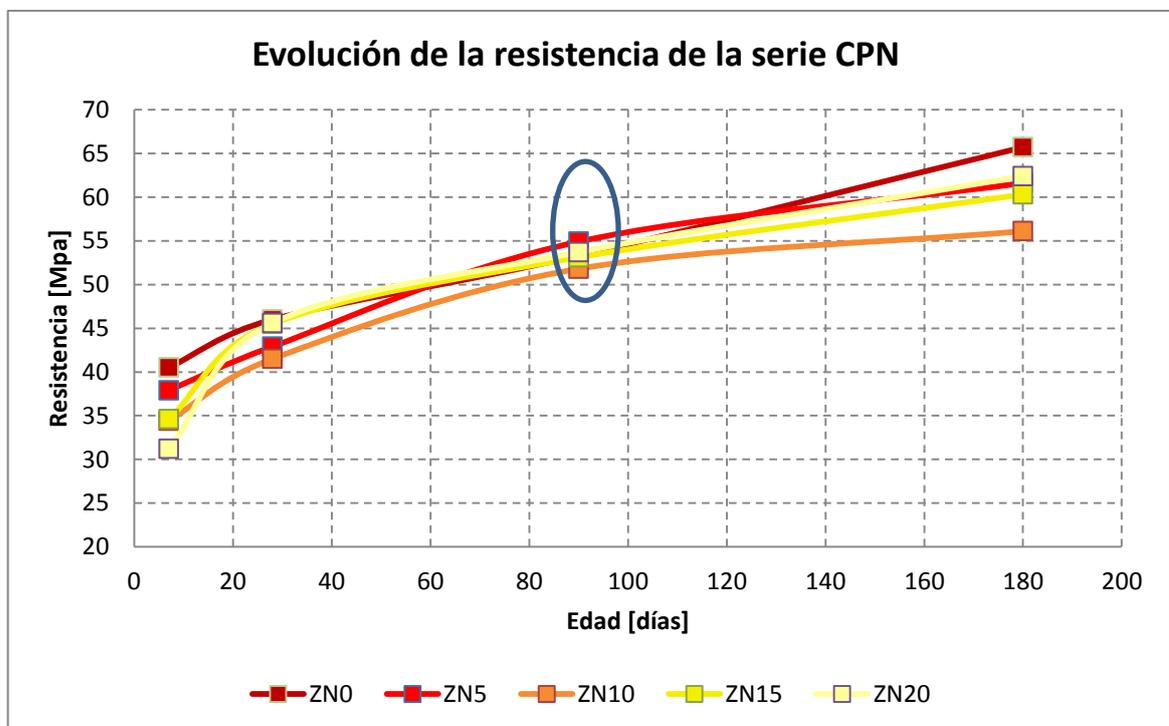


Figura 6.11 Evolución de resistencia a compresión, serie con CPN

En la Figura 6.11 para hormigones con CPN, se destacan dos aspectos:

- Si bien el desarrollo de resistencias con el tiempo varía para los distintos porcentajes de reemplazo de cemento por zeolita, a los 90 días todas las mezclas alcanzan prácticamente la misma resistencia a compresión, sólo con una diferencia entre valores máximo y mínimo de 5%.
- a los 180 días la mezcla referencia (Z0) y la mezcla con el máximo de reemplazo estudiado (Z20) alcanzan prácticamente la misma resistencia, sólo difieren en un 5%.

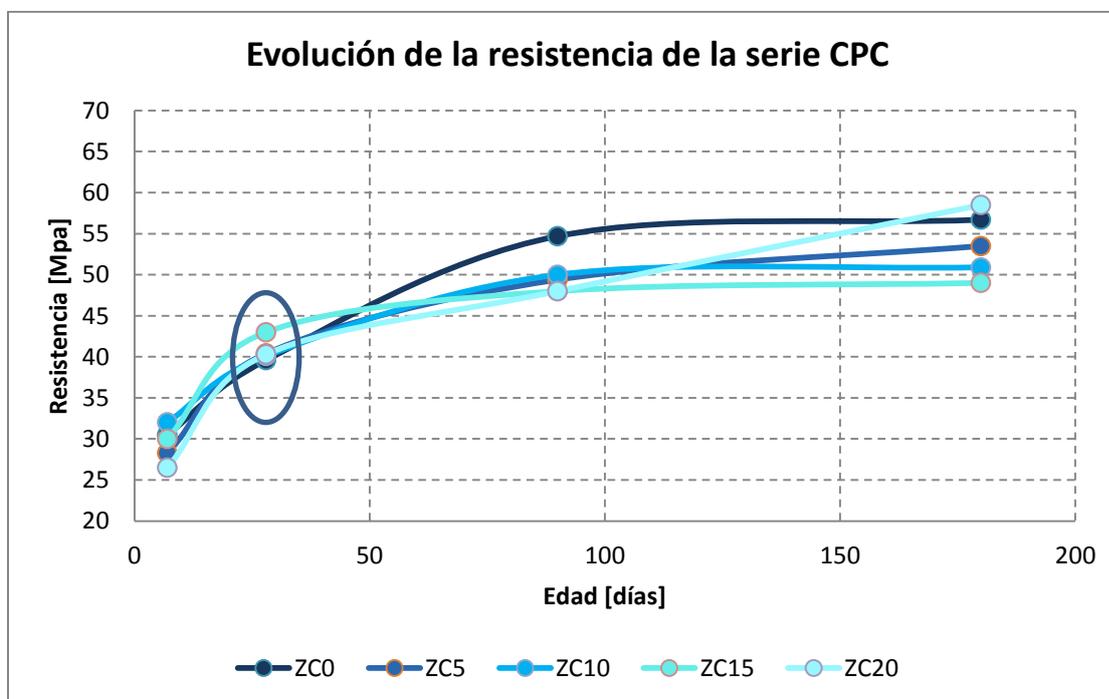


Figura 6.12 Evolución de resistencia a compresión, serie con CPC

En la Figura 6.12 para hormigones con CPC, los valores de resistencia a compresión son similares en todas las mezclas a los 28 días, con una diferencia entre máxima y mínima de 8% y a los 180 días la mezcla con el máximo de reemplazo estudiado (ZC20) supera la resistencia alcanzada por el hormigón referencia en un 3%.

El tipo de cemento influye en la evolución de la resistencia ya que mientras en la serie con CPC se alcanza prácticamente la igualdad de resistencia a los 28 días, en la serie con CPN esto se logra a los 90 días; este comportamiento posiblemente es como consecuencia de la mayor finura del cemento compuesto en relación al normal lo que favorece que las reacciones de hidratación sean más rápidas y por lo tanto a edades tempranas

En definitiva, para ambas series resulta correcto afirmar que es viable realizar el reemplazo del cemento por zeolita.

### 6.3.2 Resistencia a tracción por compresión diametral

En la Tabla 6.9 se presentan los resultados de la determinación de la resistencia a tracción por compresión diametral determinados según norma IRAM 1534 (2004).

Tabla 6.9 Resistencia a tracción por compresión diametral a 28 días

Hormigón	Resistencia a Tracción [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]
ZN0	4,5	0,0
ZN5	3,8	15,6
ZN10	3,8	16,0
ZN15	4,2	6,7
ZN20	4,6	-2,2
ZC0	3,9	0,0
ZC5	3,9	0,0
ZC10	3,2	17,9
ZC15	3,8	2,6
ZC20	3,8	2,6

Se observa de la Tabla 6.7 que existe una media de 4 MPa para la resistencia a tracción por compresión diametral. Estos resultados muestran que para esta propiedad no hay una influencia marcada del tipo de cemento ni del porcentaje de reemplazo del mismo por la zeolita.

En la Figura 6.13 se presenta la relación entre la resistencia a compresión y la tracción a 28 días. La relación entre estas resistencias es de aproximadamente 11, verificando el mismo comportamiento que en los hormigones convencionales, donde la resistencia a tracción es en general, aproximadamente, la décima parte de la resistencia a compresión a 28 días.

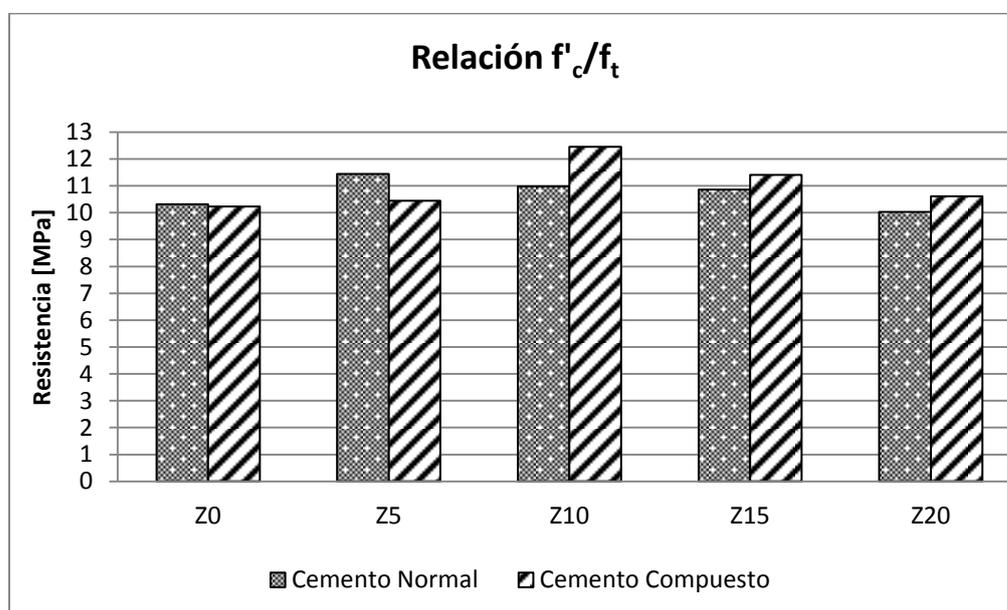


Figura 6.13 Relación entre resistencia a tracción y compresión a 28 días

### 6.3.3 Módulo elástico

El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo. Es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria; por lo tanto mide la resistencia del material a la deformación elástica.

Se determinó el módulo elástico de los hormigones a 28 y 90 días según norma ASTM C469 (2014). Los resultados se presentan en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Módulo elástico a 28 y 90 días

Hormigón	Módulo elástico a 28 días [GPa]	Diferencia con Hº referencia [%]	Módulo elástico a 90 días [GPa]	Diferencia con Hº referencia [%]
<b>ZN0</b>	38,2	0,0	46,7	0,0
<b>ZN5</b>	37,2	2,6	42,4	9,2
<b>ZN10</b>	35,8	6,3	38,7	17,1
<b>ZN15</b>	36,8	3,7	42,9	8,1
<b>ZN20</b>	37,2	2,6	44,0	5,8
<b>ZC0</b>	38,7	0,0	43,0	0,0
<b>ZC5</b>	37,9	2,1	42,0	2,3
<b>ZC10</b>	36,1	6,7	39,0	9,3
<b>ZC15</b>	35,6	8,0	39,2	8,8
<b>ZC20</b>	34,1	11,9	40,9	4,9

En las mezclas con cemento compuesto disminuye el módulo elástico a los 28 días a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita. Considerando que cuanto mayor es el módulo elástico, más rígido es el material, o sea menor es la deformación elástica que se origina cuando se aplica una determinada tensión (Callister, 1995), para la serie CPC al incrementarse la cantidad de zeolita, el material se torna más deformable, es decir, menor es el esfuerzo necesario de aplicar para obtener igual deformación.

En el caso de las mezclas con cemento normal hay una disminución del módulo hasta un porcentaje de reemplazo de 10% a partir del cual comienza a aumentar.

Los resultados del módulo elástico a 90 días, muestran que tanto para el cemento normal como para el cemento compuesto, se repite el comportamiento de los hormigones para los

28 días con el cemento normal. Es decir que, indistintamente del tipo de cemento, las mezclas disminuyen el valor del módulo hasta un reemplazo del 10% y luego comienzan a aumentar hasta el 20%. Este comportamiento también se observa cuando se analiza la resistencia a compresión en los hormigones.

En la Tabla 6.11 se presenta la relación entre resistencia a compresión y módulo elástico para 28 y 90 días respectivamente. Como puede observarse tanto a 28 como a 90 días la relación entre resistencia a compresión y módulo elástico tienden a valores próximos a 1, lo cual indica una buena correlación entre estos dos parámetros analizados.

Tabla 6.11 Relación entre la resistencia a compresión y el módulo elástico

Hormigón	28 días			90 días		
	Resistencia a compresión [MPa]	Módulo elástico [GPa]	Relación Ec/Fc	Resistencia a compresión [MPa]	Módulo elástico [GPa]	Relación Ec/Fc
<b>ZN0</b>	46,0	38,2	0,8	53,3	46,7	0,9
<b>ZN5</b>	42,9	37,2	0,9	54,9	42,4	0,8
<b>ZN10</b>	41,5	35,8	0,9	51,8	38,7	0,7
<b>ZN15</b>	45,5	36,8	0,8	53,1	42,9	0,8
<b>ZN20</b>	45,6	37,2	0,8	53,7	44,0	0,8
<b>ZC0</b>	39,6	38,7	1,0	54,7	43,0	0,8
<b>ZC5</b>	40,4	37,9	0,9	49,4	42,0	0,9
<b>ZC10</b>	40,1	36,1	0,9	50,0	39,0	0,8
<b>ZC15</b>	43,0	35,6	0,8	48,0	39,2	0,8
<b>ZC20</b>	40,3	34,1	0,8	48,1	40,9	0,9

En la Tabla 6.12 se presentan las ecuaciones para la determinación del módulo de elasticidad según distintos reglamentos internacionales.

Tabla 6.12 Expresiones del módulo de elasticidad según Reglamentos Internacionales

Reglamento técnico	Designación	Expresión	Ecuación
<b>CIRSOC 201 (2005)</b>	Método 1	$E = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$	Ecuación 5.1
<b>NBR 6118 (2014)</b>	Método 2	$E = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f'_c}^*$	Ecuación 5.2
<b>Código canadiense CAN 3-A23.3-M94 (1994)</b>	Método 3	$E = 5 \cdot \sqrt{f'_c}$	Ecuación 5.3
<b>Método del Comité Europeo del Concreto (CEC)</b>	Método 4	$E = 9,5 \cdot (f'_c + 8)^{1/3}$	Ecuación 5.4
<b>Método del American Concrete Institute (ACI): 318 (2004)</b>	Método 5	$E = W^{1.5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c}$	Ecuación 5.5
<b>Método del Turkish Standards Institution (TSI)</b>	Método 6	$E = 14000 + 3.25 \cdot \sqrt{f'_c}$	Ecuación 5.7

\*  $\alpha_E$ : depende del tipo de roca.  $\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabasa;  $\alpha_E = 1,0$  para granito e gneis;  $\alpha_E = 0,9$  para piedra caliza y  $\alpha_E = 0,7$  para arenisca.

En la Figura 6.14 se representa los resultados de estas ecuaciones y los valores de módulos de los hormigones a 28 días.

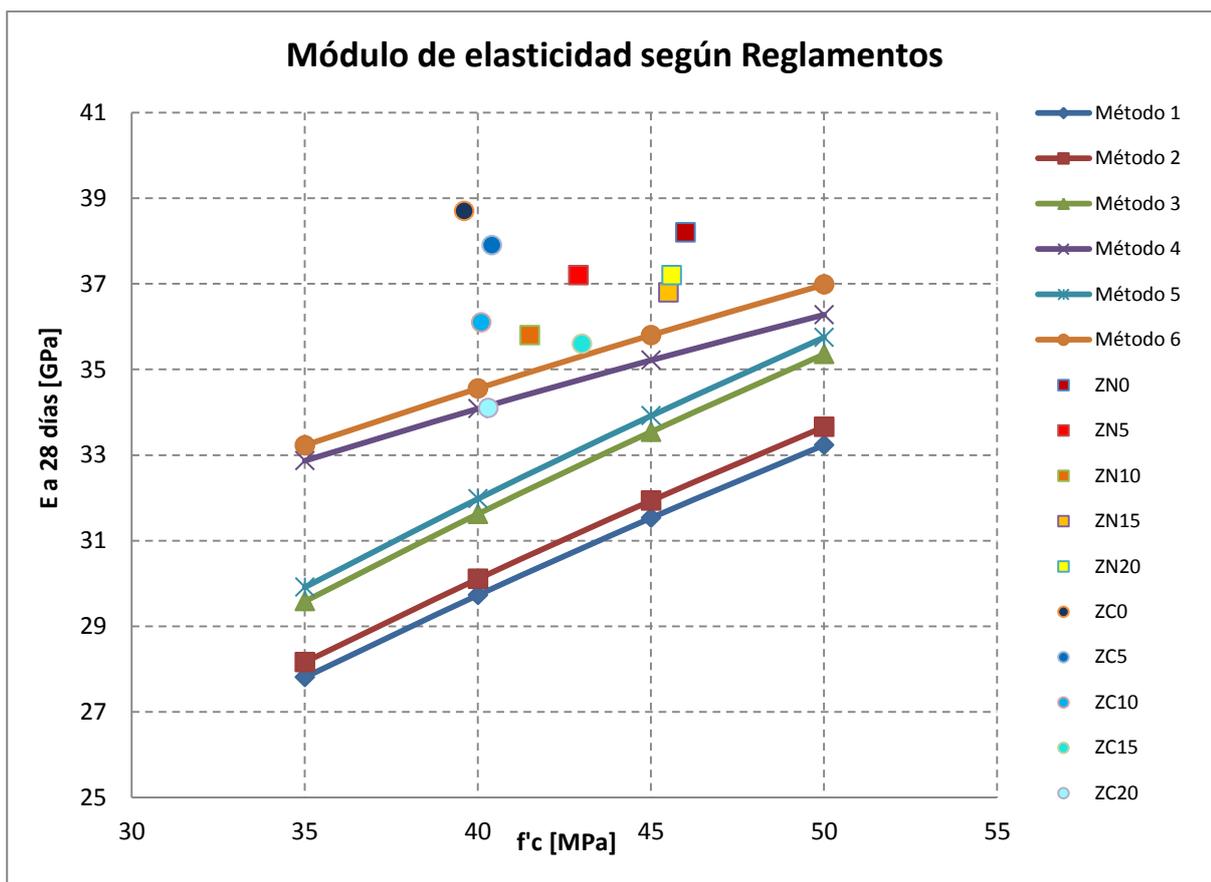


Figura 6.14 Módulo elástico según expresiones matemáticas de Reglamentos Internacionales

Los resultados de los módulos de elasticidad de todos los hormigones son superiores a los obtenidos por los Reglamentos citados. Los métodos del Comité Europeo del Concreto (Método 4) y el método del Turkish Standards Institution (Método 6) son los que presentan mejor relación con los resultados encontrados en los hormigones del plan experimental.

### Parámetros indicadores de durabilidad

A continuación se presentan los resultados de ensayos de absorción (norma ASTM C642, 2013), succión capilar (norma IRAM 1871, 2004), permeabilidad al aire (norma Suiza SIA 262/1-E, 2003), penetración de agua a presión (norma IRAM 1554, 1983) y carbonatación.

### 6.3.4 Absorción de agua

Se determinó la absorción de los hormigones endurecidos según norma ASTM C642 (2013) y se presentan los resultados alcanzados en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13 Absorción de agua a 90 días

Hormigón	Absorción 90 días [%]	Diferencia con H <sup>o</sup> referencia [%]
ZN0	1,9	0,0
ZN5	1,9	0,0
ZN10	1,9	0,0
ZN15	1,9	0,0
ZN20	2,1	-10,5
ZC0	1,6	0,0
ZC5	2,0	-25,0
ZC10	2,2	-37,5
ZC15	2,1	-31,3
ZC20	2,4	-50,0

Los valores obtenidos indican hormigones de baja absorción. Para las mezclas con cemento normal la incorporación de la zeolita no modifica de manera notoria la característica de absorción, sólo el hormigón ZN20 tiene una absorción superior al hormigón referencia en 10,5%.

Con el cemento compuesto hay un incremento de la absorción a mayor contenido de zeolita; las mezclas presentan un valor medio de 2% con una desviación estándar de 0,28. Todos los hormigones con zeolita presenta un incremento de la absorción respecto al hormigón

patrón. Así pues, el hormigón ZC5 tiene un incremento de 25%, el ZC10 del 37.5%, el ZC15 del 31.3% y el ZC20 del 50% todos respecto al ZC0.

En definitiva, se puede afirmar que la incorporación de zeolita hasta un porcentaje de 20% de reemplazo, independientemente del empleo de CPN o CPC, genera hormigones con valores de absorción similares y dentro de rangos bajos.

### 6.3.5 Succión capilar

En la Tabla 6.14 se presentan los resultados de succión capilar, velocidad de succión capilar y los coeficientes de correlación con funciones lineal y polinómica. Se empleó norma IRAM 1871 (2004) para la determinación de la capacidad de succión capilar y la velocidad de succión capilar.

Tabla 6.14 Resultados de succión y velocidad capilar

Hormigón	Succión 90 días	Diferencia con Hº referencia	Velocidad 90 días	Diferencia con Hº referencia	Lineal	Polinómica
Designación	[g/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>2</sup> *seg <sup>1/2</sup> ]	[%]	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
ZN0	1795	0,0	3,3	0,0	0,989	0,997
ZN5	1706	5,0	3,0	9,1	0,984	0,998
ZN10	1515	15,6	2,7	18,2	0,987	0,999
ZN15	1744	2,8	3,1	6,1	0,99	0,999
ZN20	1833	-2,1	3,2	3,0	0,987	0,998
ZC0	1375	0,0	2,4	0,0	0,991	0,999
ZC5	1579	-14,8	2,5	-4,2	0,985	0,999
ZC10	1808	-31,5	2,9	-20,8	0,98	0,999
ZC15	1719	-25,0	2,9	-20,8	0,993	0,999
ZC20	1935	-40,7	3,0	-25,0	0,986	0,998

---

Los hormigones presentan una velocidad de succión capilar menor a  $4\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}^{1/2}$  que es la establecida por el Reglamento CIRSOC 201 (2005); estos valores bajos garantizan una disminución del ingreso de posibles agentes agresivos. Las curvas de succión capilar se ajustan mejor a líneas de tendencia con aproximación polinómica con un alto coeficiente de correlación.

En la Figura 6.15 los hormigones con cemento normal con reemplazo de cemento por zeolita presentan una disminución de la succión capilar respecto al hormigón patrón, excepto para un porcentaje de reemplazo del 20%. Sin embargo, la diferencia de succión entre el valor del hormigón ZN0 y el ZN20 es de sólo el 2%.

Los hormigones con cemento compuesto presentan otro tipo de comportamiento. Se produce un incremento de la succión capilar a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita, destacándose la variación entre el hormigón ZC0 y el hormigón ZC20 que es del 40%.

En la Figura 6.15 se presentan los resultados de los hormigones con cemento normal, los cuales, independientemente del contenido de reemplazo del cemento por zeolita, presentan similar comportamiento ante la succión capilar, a excepción del hormigón ZN10 que presenta menores valores de succión que el resto. Estos valores de succión capilar se encuentran dentro de rango de valores normales y propios de hormigones con altos contenidos de cemento y baja relación a/c. (Mehta & Monteiro, 2008).

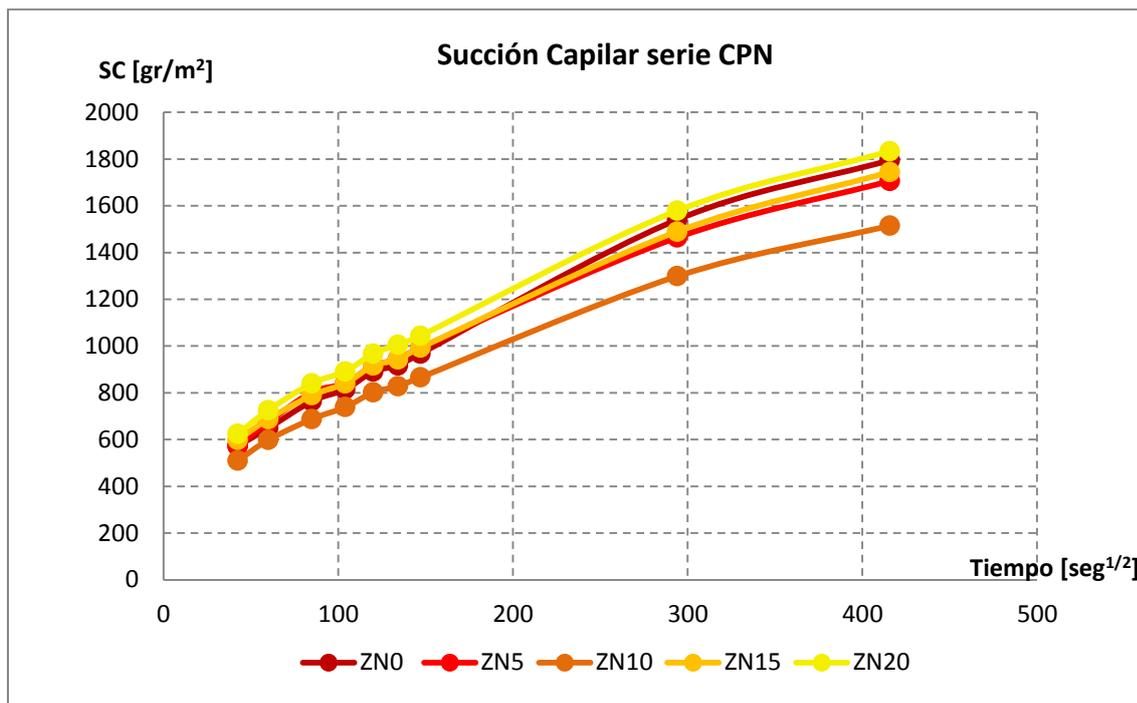


Figura 6.15 Succión capilar serie CPN

En la Figura 6.16 se presentan los resultados de los hormigones con cemento compuesto. Al igual que en los hormigones de la serie CPN, los valores de succión capilar de los hormigones de la serie CPC se encuentran dentro de rango de valores normales y propios de hormigones con altos contenidos de cemento y baja relación a/c. Sin embargo presentan una mayor dispersión de los valores de succión entre mezclas para distintos porcentajes de reemplazo de cemento por zeolita.

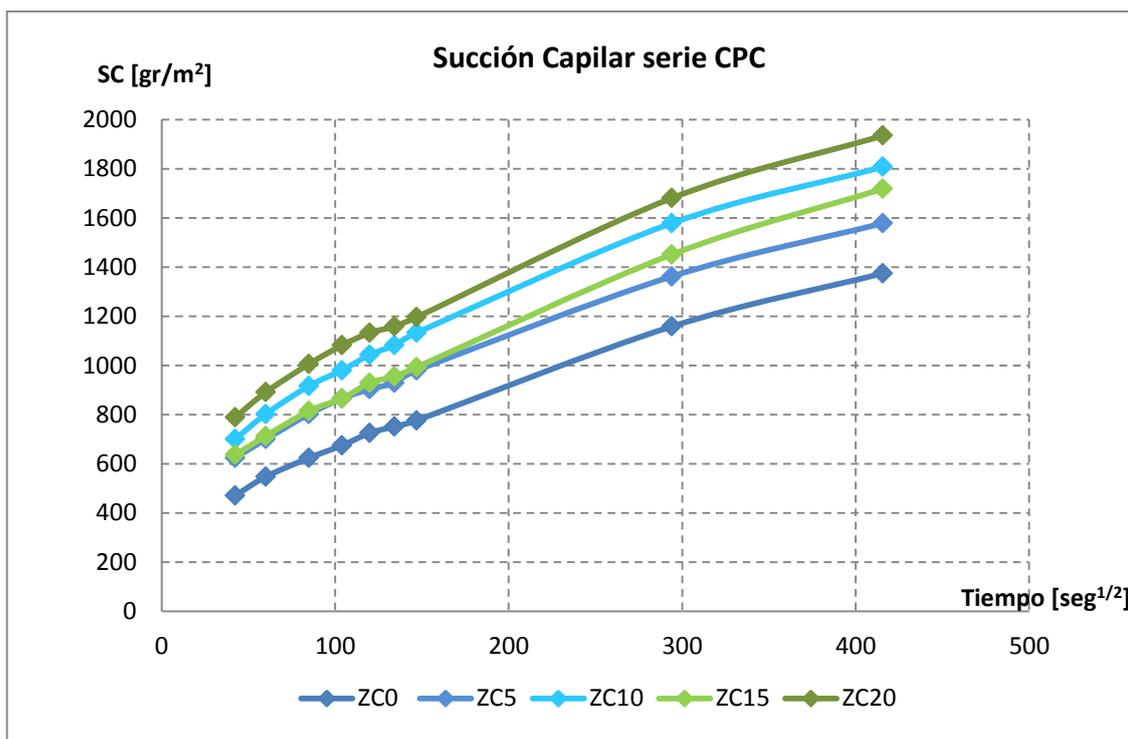


Figura 6.16 Succión capilar serie CPC

### 6.3.6 Permeabilidad al Aire

En la Tabla 6.15 se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad al aire de los hormigones y su clase de permeabilidad según la Norma Suiza SIA 262/1-E, 2003.

Tabla 6.15 Resultados de permeabilidad al aire

Hormigón	Permeabilidad kT [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]	Clase de permeabilidad
ZN0 450	0,59	PK3 Moderada
ZN5 450	1,5	PK4 Alta
ZN10 450	2,6	PK4 Alta
ZN15 450	0,72	PK3 Moderada
ZN20 450	0,67	PK3 Moderada

Tabla 6.15 Resultados de permeabilidad al aire. (Continuación)

Hormigón	Permeabilidad kT [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]	Clase de permeabilidad
ZC0 450	1,1	PK4 Alta
ZC5 450	1,5	PK4 Alta
ZC10 450	1	PK4 Alta
ZC15 450	1,4	PK4 Alta
ZC20 450	1,2	PK4 Alta

En las Figuras 6.17 y 6.18 se presentan las curvas limites que determinan zonas que corresponden a la clase de permeabilidad según el parámetro kT o sea zonas de permeabilidad muy baja, baja, moderada, alta y muy alta, como ya se presentó en el Capítulo 5.

En la Figura 6.17 se presentan las curvas de la permeabilidad al aire de los hormigones de la serie CPN a los 90 días, cuyos valores corresponden a permeabilidad alta y moderada. Los hormigones con reemplazo cemento por zeolita de 15% y 20% presentan porosidad similar a la del hormigón referencia.

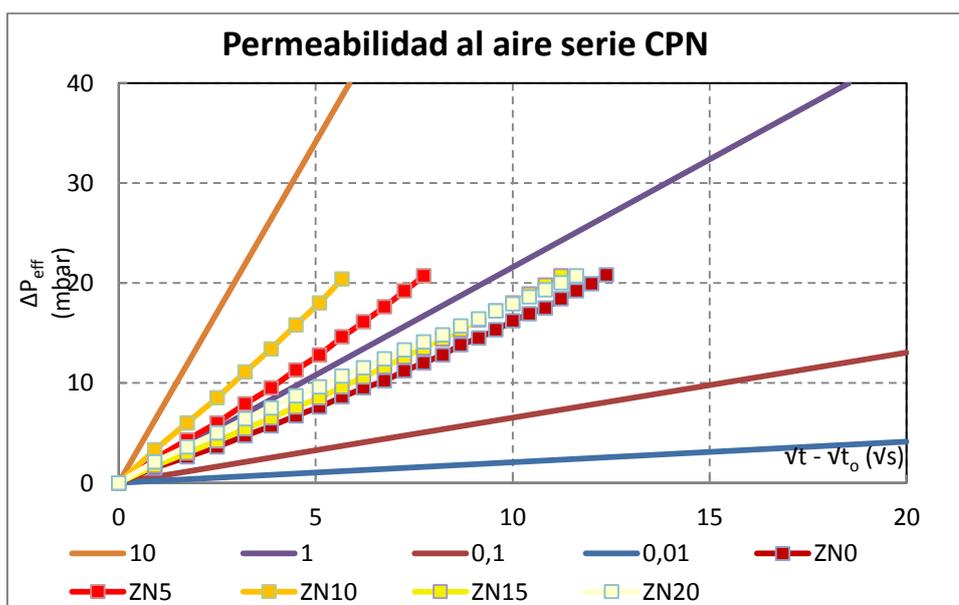


Figura 6.17 Permeabilidad al aire serie CPN

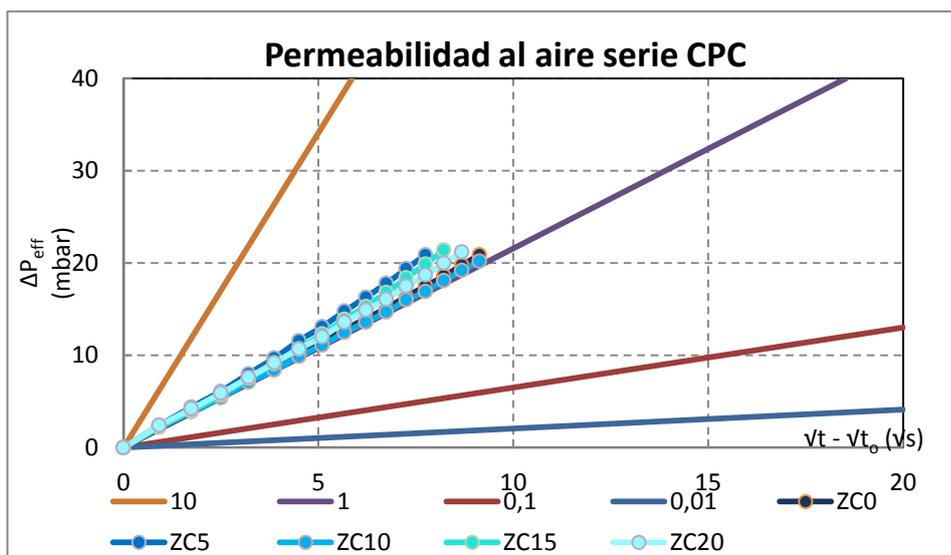


Figura 6.18 Permeabilidad al aire serie CPC

En la Figura 6.18 se presentan los resultados de permeabilidad al aire de los hormigones con cemento compuesto. Todos presentan igual clase de permeabilidad, siendo esta alta. El fenómeno encuentra explicación en la composición del cemento, que influye la estructura porosa del hormigón.

En la Figura 6.19 se presenta la relación entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad al aire de todos los hormigones.

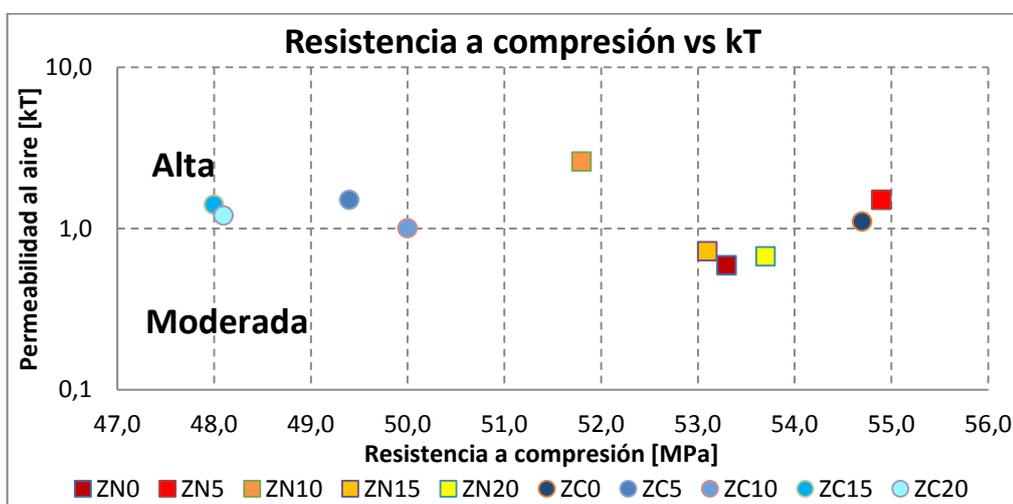


Figura 6.19 Relación entre la resistencia a compresión y la permeabilidad al aire a los 90 días.

De la Figura 6.19 se desprende que los valores de  $kT$  permiten la clasificación de los hormigones como de permeabilidad alta o moderada, independientemente del tipo de cemento empleado o el porcentaje de adición para el rango de variación de la resistencia a compresión entre 48 y 55 MPa.

En la Figuras 6.20 y 6.21 se presenta la relación entre la permeabilidad al aire y la absorción, y la succión capilar respectivamente para todos los hormigones.

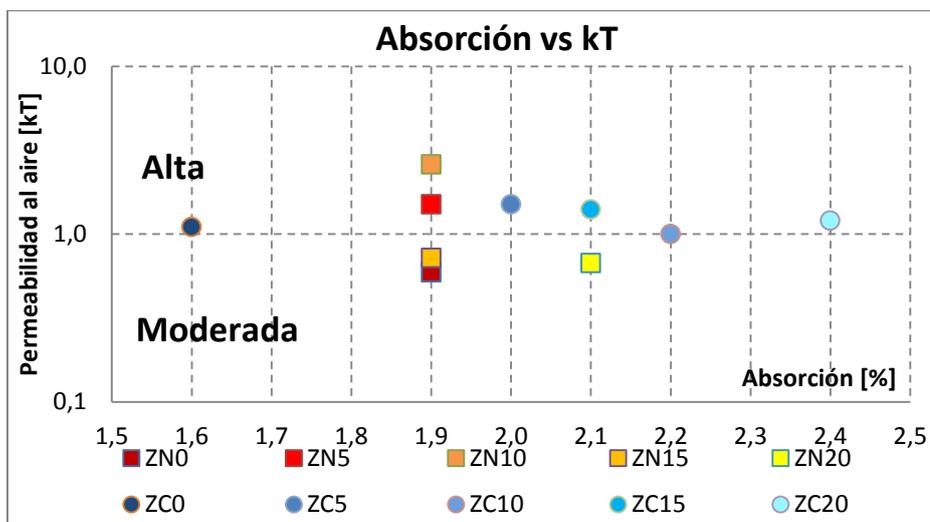


Figura 6.20 Relación entre la absorción y la permeabilidad al aire a los 90 días

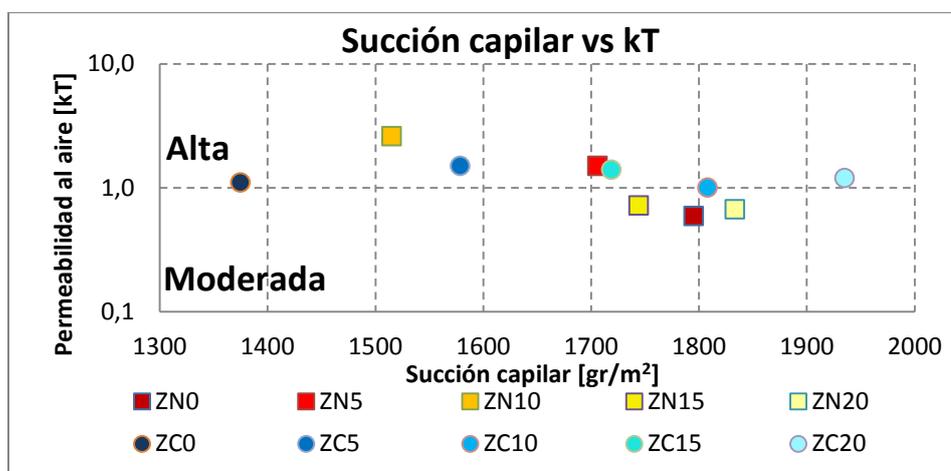


Figura 6.21 Relación entre la succión capilar y la permeabilidad al aire a los 90 días

El análisis de las Figuras 6.20 y 6.21 indica que el ensayo de permeabilidad al aire permite distinguir en clase de permeabilidad moderada o alta mientras que con los ensayos de absorción y succión capilar no hay una marcada diferencia entre los valores obtenidos. Por ejemplo el ZN10 tiene una absorción de 1,9%, succión capilar de 1515 gr/m<sup>2</sup> y permeabilidad al aire alta mientras que el ZN0 tiene una absorción de 1,9%, una succión capilar de 1795 gr/m<sup>2</sup> y permeabilidad al aire moderada. Esto coincide con lo afirmado por Ebensperger y Torrent (2014) quienes ponen de manifiesto la sensibilidad de la determinación de la permeabilidad al aire permitiendo detectar cambios en la microestructura del material.

### 6.3.7 Penetración de agua a presión

Se determinó la resistencia a la penetración de agua a presión según norma IRAM 1554 (1983). En la Tabla 6.16 se presentan los resultados del ensayo de determinación de la penetración de agua a presión en hormigón endurecido.

Tabla 6.16 Profundidad de la penetración de agua a presión

Hormigón	promedio [mm]	Diferencia con Hº referencia [%]	máxima [mm]	Diferencia con Hº referencia [%]
ZN0	30	0,0	38	0,0
ZN5	30	0,0	35	7,9
ZN10	32	-6,7	45	-18,4
ZN15	15	50,0	19	50,0
ZN20	14	53,3	19	50,0
ZC0	29	0,0	39	0,0
ZC5	13	55,2	16	59,0
ZC10	11	62,1	14	64,1
ZC15	8	72,4	14	64,1
ZC20	8	72,4	13	66,7

En los hormigones con CPN la penetración de agua para el hormigón con porcentaje de reemplazo del 10% se incrementa levemente con respecto al hormigón de referencia y luego la profundidad de penetración de agua disminuye para reemplazos del 15% y 20% alcanzando valores menores a la mezcla referencia.

En los hormigones con CPC los resultados de penetración al agua son menores que los obtenidos en los hormigones con CPN. Analizando el porcentaje de reemplazo de zeolita en los hormigones con cemento compuesto los resultados muestran una disminución de la penetración de agua al aumentar el porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita, esto se contrapone con el análisis de los resultados de absorción de agua y succión capilar presentados anteriormente. Sin embargo esto coincide con las experiencias de Najimi et al., (2012) quien explica que este fenómeno se puede relacionar con la diferente metodología de medición de estos ensayos. La penetración de agua está relacionada con la microestructura, por lo que las mezclas de hormigón que contienen zeolita natural tienen menos poros debido a la actividad puzolánica y el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mientras que por otro lado, la absorción de agua del hormigón está influenciada por la absorción de agua de los materiales utilizados, especialmente por la pasta en la superficie de hormigón. Por lo tanto, ya que la absorción de agua de la zeolita es significativamente mayor que el de cemento, más absorción de agua es inevitable.

### **6.3.8 Profundidad de carbonatación**

El ensayo de medición de la profundidad de carbonatación se realizó luego de un año de exposición de las probetas a ambiente natural.

En la Figura 6.22 se presenta la medición de la profundidad de carbonatación en una probeta de hormigón en la que se pone de manifiesto el cambio abrupto de pH por la aplicación de la solución de fenolftaleína; se aprecia una zona perimetral, no coloreada y la zona interior que ha cambiado de color, aún no carbonatada.



Figura 6.22 Medición de profundidad de carbonatación en probetas

Los resultados obtenidos del ensayo de medición de la penetración de CO<sub>2</sub>, se presentan en la Figura 6.23

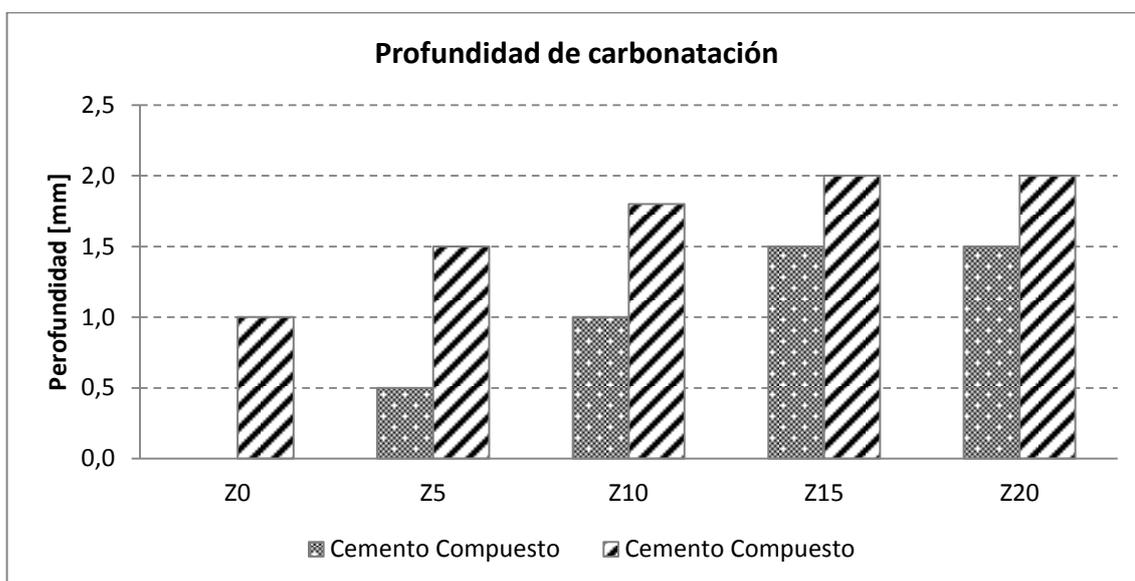


Figura 6.23 Profundidad de carbonatación a 365 días

Los hormigones de referencia para cada tipo de cemento presentan los menores valores de penetración de carbonatación ante la acción del CO<sub>2</sub> atmosférico. A medida que se incrementa el porcentaje de zeolita, aumenta el frente carbonatado. Dópico Montes de Oca

et al. (2009), explican que la presencia de la adición mineral, influye en la formación del frente de carbonatación que se incrementa con el aumento de los niveles de sustitución de la adición por cemento. La mayor penetración podría ser atribuida a la presencia de mayores cantidades de hidróxido de calcio en la adición, posible de reaccionar para formar el frente carbonatado.

## Capítulo 7

### CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan las principales conclusiones de esta tesis y las futuras líneas de investigación para desarrollar en función de los resultados obtenidos.

En el apartado 7.1 se presentan las condiciones generales de las que se obtienen las conclusiones. En el apartado 7.2 se presentan las conclusiones de la caracterización físico química de la zeolita. En el apartado 7.3 se mencionan las conclusiones en relación a las mezclas en estado fresco y en el apartado 7.4 las derivadas de los hormigones en estado endurecido. En el punto 7.5 se presentan las conclusiones finales. Finalmente en el apartado 7.6 se proponen las nuevas líneas de investigación.

## 7.1 Consideraciones generales

En este capítulo se presentan las conclusiones de la investigación de hormigones en los que se ha reemplazado parte del cemento en distintos porcentajes por una zeolita natural. Se presenta en primera instancia las conclusiones sobre la caracterización físico química de la zeolita utilizada.

Se emplearon dos tipos de cemento, cemento Portland normal y cemento Portland compuesto, con un contenido de 450 kg/m<sup>3</sup>. Los porcentajes de reemplazo del cemento por la zeolita fueron 0, 5, 10, 15 y 20% en peso. La relación a/ma fue mantenida constante en 0,41.

Los hormigones fueron evaluados en estado fresco y en estado endurecido con parámetros de resistencia mecánica e indicadores de durabilidad, ante la influencia del tipo de cemento empleado y el porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita en peso.

## 7.2 Conclusiones sobre la caracterización físico química de la zeolita

La caracterización del material zeolítico según las distintas técnicas físico químicas utilizadas permiten clasificarla como una mezcla de minerales, donde la zeolita es la fase predominante, que de acuerdo con su composición semi-cuantitativa, corresponde a una clinoptilolita sódica. Según código de la IZA es HEU, pues pertenece al grupo de la Heulanditas. En función de imágenes SEM la zeolita se presenta como pequeños cristales laminares agrupados en forma de rosetas agregadas. La muestra es granulométricamente heterogénea con 40.62% de partículas de tamaño mayor a 1000  $\mu\text{m}$ , y 59.38% de partículas con tamaño menor o igual a 1000  $\mu\text{m}$ , con un área superficial de 11 m<sup>2</sup>/g y una densidad de 2,13.

Según la clasificación de la norma ASTM C618 (2003), y de acuerdo sólo a los requerimientos químicos, corresponde a una puzolana clase F, aunque con una mayor pérdida por ignición (7,47%) y SO<sub>3</sub> (~ 8%) valores. No cumple con los requerimientos físicos de esta norma. Presenta un porcentaje mayor al límite máximo de 34% de material retenido en tamizado

húmedo en tamiz #325 (45  $\mu\text{m}$ ). Esto se debe a su granulometría heterogénea, y al alto porcentaje de partículas de tamaño superior a 1000  $\mu\text{m}$ .

### 7.3 Conclusiones sobre las mezclas en estado fresco

**Trabajabilidad y Asentamiento:** la medida de la consistencia de los hormigones determinada con el cono de Abrams permite determinar que las mezclas con reemplazo del cemento Portland normal por zeolita tuvieron mayores asentamientos en relación a las obtenidas con cemento Portland compuesto. El cemento Portland compuesto, al tener en su composición adiciones incorporadas y menor densidad que el cemento Portland normal, tiene para el mismo peso mayor volumen; en consecuencia para las dosificaciones empleadas en las que se mantiene el contenido de cemento en 450  $\text{kg}/\text{m}^3$  de hormigón, se obtiene mayor volumen de pasta.

En definitiva las mezclas con cemento Portland compuesto son más densas, con menor tendencia a fluir y asentarse.

En ambas series, a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita, se produce pérdida de consistencia; esto se debe a que la zeolita tiene una microestructura porosa y una gran área superficial debido a sus microporosos que la convierte en un material con gran capacidad de retención de agua; también se debe considerar que al tener menor densidad que el cemento que reemplaza ocupa más volumen; en consecuencia hay un mayor volumen de pasta para igual contenido de agua, lo que disminuye el valor del asentamiento a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo.

En definitiva, el porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita en peso influye de manera directa en la pérdida de consistencia de los hormigones. A mayor reemplazo mayor pérdida de consistencia. En cuanto al tipo de cemento, a mayor finura y mayor cantidad de adiciones en el cemento mayor es la pérdida de consistencia de los hormigones.

## 7.4 Conclusiones sobre los hormigones en estado endurecido

### 7.4.1 Resistencia mecánica

**Resistencia a compresión:** Tanto las mezclas con cemento Portland normal como las con cemento Portland compuesto presentan un aumento de la resistencia con el tiempo, como consecuencia de la ganancia natural de resistencia debido a los procesos de hidratación del cemento en el tiempo y a la contribución del efecto puzolánico de la adición en las mezclas que contienen zeolita. Sin embargo el comportamiento de las mezclas es diferente para ambos tipos de cementos. Las mezclas con cemento Portland normal alcanzan mayores resistencias que las de cemento Portland compuesto para igual porcentaje de reemplazo a la misma edad.

En los hormigones con cemento Portland normal, a los 28 días se alcanzan resistencias próximas a las del hormigón de referencia sin diferencias significativas, a los 90 días prácticamente todos los hormigones tienen la misma resistencia que el hormigón patrón y a los 180 días la mezcla referencia (ZN0) y la mezcla con el máximo de reemplazo estudiado (ZN20) no presentan diferencias significativas entre sus valores de resistencia a compresión

En los hormigones con cemento Portland compuesto similares resistencias en todas las mezclas se alcanzan a los 28 días no existiendo diferencias significativas entre ellas, a los 180 días la mezcla con el máximo porcentaje de reemplazo de zeolita (ZC20) supera la resistencia alcanzada por el hormigón referencia en un 3%.

El incremento en la resistencia entre los 90 y los 180 días en las mezclas con CPC es menor que las que tienen CPN, mientras que para los hormigones con CPC es en promedio 7% en los hormigones con CPN es de 13%.

El análisis de los resultados del test de Duncan en los hormigones con cemento Portland normal indica que a partir de los 28 días las resistencias a compresión son similares entre todos ellos inclusive entre el hormigón referencia y el de máximo reemplazo de zeolita (20%). En los hormigones con cemento Portland compuesto, a edades tempranas las resistencias no son significativamente diferentes, mientras que a 90 días las resistencias a compresión de las distintas dosificaciones son significativamente diferentes con respecto al

hormigón patrón, pero no lo son entre sí. Para las resistencias a 180 días sí son significativamente diferentes con respecto al patrón y también entre sí.

En general, a mayor contenido de reemplazo de cemento por zeolita disminuye la ganancia de resistencia en el tiempo, sin embargo, para el reemplazo máximo de 20%, la resistencia a compresión a 180 días es similar a la lograda por el hormigón referencia en cada tipo de cemento.

La ganancia de resistencia a largo plazo justifica que para ambas series resulte correcto afirmar que es viable y a la vez satisfactorio realizar el reemplazo del cemento por parte de zeolita con ambos tipos de cemento. Con esto se logra una importante contribución en el desarrollo de hormigones sustentables cuya producción genera menor impacto al ambiente que los hormigones realizados con materiales tradicionales con menores costos como consecuencia del menor consumo de cemento.

**Resistencia a tracción por compresión diametral:** los hormigones con cemento Portland normal presentan las mayores resistencias a tracción en relación a las resistencias obtenidas por los hormigones con cemento Portland compuesto para igualdad de contenido de zeolita. Sin embargo, no se presentan grandes diferencias en los valores alcanzados entre hormigones con cemento Portland normal y hormigones con cemento Portland compuesto. Las resistencias a tracción de todos los hormigones se encuentran entre 3,2 MPa y 4,5 MPa para resistencias a compresión entre 39,6 MPa y 46,0 MPa.

En todos los hormigones se verifica que la resistencia a tracción a los 28 días es aproximadamente la décima parte de la resistencia a compresión a los 28 días.

El porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita no afecta de manera importante la resistencia a tracción obtenida para los hormigones con cemento Portland normal y cemento Portland compuesto, los resultados son todos próximos y no difieren en más de un 10% entre ellos, independientemente del contenido de zeolita. Es de destacar que las mezclas con 20% de reemplazo de cemento por zeolita tienen similar comportamiento que el hormigón patrón tanto para la serie con CPN como para la serie con CPC.

**Módulo elástico longitudinal:** El comportamiento es similar al encontrado al evaluar la resistencia a tracción; los hormigones con reemplazo de cemento por zeolita presentan

módulos elásticos similares a las mezclas referencias para cada tipo de cemento. Los valores de módulos elásticos de todos los hormigones son similares y próximos a la media de 37 GPa.

Los hormigones con cemento Portland normal tienden a tener menor módulo de elasticidad que el hormigón de referencia a medida que se incrementa el porcentaje de adición hasta un 10% del reemplazo; luego, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita, los módulos de elasticidad comienzan a aumentar.

En los hormigones con cemento Portland compuesto el módulo elástico disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita, por lo que al incrementarse la cantidad de zeolita, el material se torna más deformable, es decir, menor es el esfuerzo necesario a aplicar para obtener igual deformación.

Por lo tanto, los resultados de los ensayos de resistencia mecánica en los hormigones con adición de zeolita han demostrado excelente comportamiento mecánico. Se presentan mejores resultados en los hormigones con cemento Portland normal, que en los encontrados en los hormigones con cemento Portland compuesto.

#### **7.4.2 Indicadores de durabilidad**

**Absorción de agua:** Los valores obtenidos para la absorción de agua indican que todos los hormigones son hormigones de baja absorción. Para las mezclas con cemento Portland normal se encuentran valores de absorción similares entre todas las mezclas. En los hormigones con cemento Portland compuesto la absorción varía según el contenido de zeolita.

En los hormigones con cemento Portland normal no se manifiesta una variación de la absorción de agua con la variación del reemplazo de cemento por zeolita; sin embargo en los hormigones con cemento Portland compuesto se manifiesta un incremento en la absorción, con un incremento del 50% de la absorción del hormigón con 20% de reemplazo de zeolita en referencia al hormigón patrón.

Independientemente del tipo de cemento y del contenido de reemplazo de cemento por zeolita todos los hormigones tienen valores de absorción en rango bajo.

**Succión capilar:** Las mezclas con cemento Portland normal presentan, en general, menor succión capilar que las con cemento Portland compuesto a igualdad de condiciones.

En los hormigones con cemento Portland normal se presenta una disminución de la succión capilar respecto al hormigón patrón a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita hasta un valor de reemplazo del 10%, luego se produce un incremento de la succión capilar para reemplazos de cemento por zeolita del 15 y 20%. Sin embargo, se encuentra una diferencia de succión capilar entre el valor del hormigón de referencia y el de máximo reemplazo de cemento por zeolita (20%) de sólo el 2%.

En los hormigones con cemento Portland compuesto, la succión capilar aumenta a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento por la zeolita. Se presenta una variación entre el hormigón referencia y el hormigón con el reemplazo del 20% del cemento por zeolita del 40%.

Se destaca que los resultados de succión capilar obtenidos para todos los hormigones se encuentran dentro de rango de valores normales de hormigones con altos contenidos de cemento y baja relación a/c, presentando una velocidad de succión capilar menor a la establecida por el reglamento CIRSOC 201 (2005), de  $4\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ . Esto es un indicador del buen comportamiento de los hormigones con reemplazo de zeolita frente a la durabilidad.

**Permeabilidad al aire:** Los hormigones con cemento Portland normal se enmarcan dentro de dos clases de permeabilidad, alta y moderada, mientras que los hormigones con cemento Portland compuesto tienen permeabilidad al aire alta; en este caso se manifiesta la influencia de la composición del cemento que ya tiene incorporada varias adiciones en la estructura porosa del hormigón.

La variación del porcentaje de reemplazo de cemento por la zeolita provoca en los hormigones con cemento Portland normal dos clases de permeabilidad al aire. Para hormigones con reemplazos del 15% y 20% del cemento por zeolita la permeabilidad al aire es moderada y es la misma que tiene el hormigón referencia. Para reemplazos del 5% y 10%

si bien el coeficiente  $kT$  permite clasificar los hormigones como de permeabilidad alta, estos valores se encuentran muy próximos al límite de permeabilidad moderada.

Para los hormigones con cemento Portland compuesto el contenido de zeolita no modifica la clase de permeabilidad al aire. El coeficiente  $kT$  en todos los hormigones los clasifica según la norma Suiza SIA 262/1-E (2003) en hormigones con permeabilidad alta.

**Penetración de agua a presión:** En los hormigones con cemento Portland compuesto los resultados de penetración al agua son menores que los obtenidos en los hormigones con cemento Portland normal.

En los hormigones con cemento Portland normal hay un aumento de la penetración de agua a presión del hormigón de referencia con respecto al hormigón con un porcentaje de reemplazo del cemento por zeolita del 10%, luego la profundidad de penetración de agua disminuye para reemplazos de cemento por zeolita del 15% y 20%, alcanzando valores similares a la mezcla referencia.

En los hormigones con cemento Portland compuesto disminuye la penetración de agua a presión a medida que aumenta el contenido de zeolita.

Todos los hormigones tienen penetraciones de agua menores a la media de 30mm y la máxima de 50mm fijadas por el Reglamento CIRSOC 201 (2005) como criterio prescriptivo para asegurar la durabilidad de los hormigones de estructuras.

**Profundidad de carbonatación:** Los hormigones con cemento Portland normal presentan menores profundidades de carbonatación que los hormigones con cemento Portland compuesto para igual porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita.

A medida que se incrementa el porcentaje de zeolita, aumenta la profundidad del frente carbonatado para hormigones con cemento Portland normal y cemento Portland compuesto. La presencia de la adición mineral, influye en la formación del frente de carbonatación. A mayor incremento del porcentaje de reemplazo de cemento por zeolita, mayor penetración de carbonatación; esto se debe a la presencia de mayor cantidad de hidróxido de calcio en la adición, posible de reaccionar para formar el frente carbonatado.

En definitiva, frente a los parámetros de durabilidad, los hormigones elaborados con cemento Portland normal presentan un mejor comportamiento que los hormigones con cemento Portland compuesto. Se observa una mejor interacción y reacción entre el cemento normal y la zeolita, derivada de la composición del cemento Portland normal que no contiene adiciones en su constitución.

## 7.5 Conclusiones finales

Después de la realización de este trabajo de tesis se puede expresar, como conclusión principal, que ante la adición de zeolita natural en distintos porcentajes de reemplazo del cemento en hormigones utilizando cemento Portland normal y cemento Portland compuesto, el tipo de cemento empleado en los hormigones es un factor de gran influencia en los resultados analizados. Los cementos Portland normal y Portland compuesto no reaccionan-interactúan de igual modo con la zeolita, repercutiendo esto en el comportamiento mecánico y durable de las mezclas. Los hormigones con cemento Portland normal presentan mejor comportamiento en general ante las características evaluadas.

También se concluye que los porcentajes de reemplazo del cemento por la zeolita influyen de manera directa en los resultados de ensayos como determinación de la consistencia, resistencia a compresión, absorción de agua, succión capilar, permeabilidad al aire, profundidad de penetración de agua a presión y carbonatación. En ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral y determinación del módulo elástico el porcentaje de zeolita no representa una variable significativa en los resultados.

Se destaca que la porosidad de los hormigones se ve modificada con la incorporación de zeolita. Cuando se presenta una porosidad elevada, es porque los poros capilares forman una red interconectada a través de toda la pasta de cemento, permitiendo la circulación libre de agua y en consecuencia aumentando mecanismos de transporte de sustancias. Cuando la porosidad es menor parte de los poros capilares se encuentran bloqueados por productos de la hidratación y por las nuevas estructuras de hidratación que se forman por la adición. La permeabilidad, en consecuencia depende de cómo y cuánto modifique los poros capilares la hidratación de la zeolita.

Se resalta el buen desempeño alcanzado por los hormigones con un reemplazo de 20% del cemento por zeolita con ambos tipos de cementos. Los resultados obtenidos fueron similares y comparables con los hormigones referencia con la ventaja de estar compuestos por menor cantidad de cemento, significando un aporte concreto a la conservación del ambiente.

A partir de los resultados obtenidos bajo las condiciones estudiadas podemos concluir que la zeolita, si bien no se ajusta a todos los requerimientos de la norma ASTM C618 (2003) para ser considerada una puzolana, constituye una adición activa que presenta acción puzolánica de disponibilidad local que presenta buen comportamiento ante parámetros de resistencia mecánica e indicadores de durabilidad en hormigones constituyendo una alternativa viable para ser usada en mezclas cementicias, con la ventaja del ahorro económico que implica un menor consumo de cemento acompañado de un menor impacto ambiental.

En definitiva, se puede desde la ciencia de materiales incorporar nuevos materiales en la tecnología del hormigón con el objeto de mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad, como una herramienta para contribuir al desarrollo sustentable del ambiente y revalorizar y darle otro uso a materiales que actualmente no se emplean con esa finalidad.

## **7.6 Trabajo futuro**

### **7.6.1 Líneas de investigación futuras**

De acuerdo con las conclusiones alentadoras presentadas en este trabajo de tesis en el empleo de zeolitas naturales en hormigones, se considera importante seguir profundizando algunas líneas de investigación derivadas de los resultados de esta tesis.

Es de relevancia seguir investigando el comportamiento de materiales cementicios con zeolitas naturales frente a otros indicadores de durabilidad no abarcados en esta tesis; se debería avanzar en investigaciones ante situaciones de deterioro físico-químicos como la corrosión de armaduras, reacción álcali-agregado y penetración de cloruros.

También se considera valioso ahondar en el enfoque del comportamiento de la microestructura del material como una herramienta de evaluación de los modelos de comportamiento de los hormigones con zeolita, estableciendo relaciones entre la microestructura de los hormigones con zeolita, sus propiedades mecánicas y de durabilidad.



## Anexo I

**ESTADIA EN LA UNIVERSIDADE ESTADUAL VALE DO ACARAÚ.  
PROYECTO: “DISEÑO DE MEZCLAS CEMENTICIAS ECOLÓGICAS CON EFICIENCIA  
ENERGÉTICA PARA UN AMBIENTE SUSTENTABLE”.  
TRABAJO EXPERIMENTAL CARNAÚBA**

En este anexo se presenta parte del trabajo de investigación realizado con polvo de carnaúba como estudio de una adición puzolánica potencial en hormigones. Este trabajo se desarrolló durante una pasantía en la Universidade Estadual Vale do Acaraú en la ciudad de Sobral, estado de Ceará, Brasil.

En el apartado 8.1 se presenta el marco institucional en el que se generó esta investigación. En el apartado 8.2 se brinda una introducción sobre el polvo de carnaúba, en el punto 8.3 se aborda el trabajo experimental realizado y finalmente en el apartado 8.4 se exponen las conclusiones alcanzadas.

## **8.1 Proyecto: Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable**

El proyecto titulado “Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable” se enmarca dentro de la convocatoria de Proyectos de fortalecimiento de redes interuniversitarias VI, promovido por la Secretaria de políticas Universitarias, dentro del El Programa de Promoción de la Universidad Argentina (PPUA), dependiente del Ministerio de Educación de la Nación.

El Plan de trabajo que se propuso se orientó fuertemente al intercambio de experiencias propias de cada una de las instituciones participantes del proyecto.

La hipótesis de trabajo planteó que se puede construir con materiales más ecológicos que los tradicionales, con calidad técnica y económica, utilizando “nuevos materiales” a partir del enfoque de la eficiencia energética.

En base a esta hipótesis se realizó una caracterización de los materiales locales con el objetivo desarrollar los modelos de comportamiento de materiales cementicios con las adiciones propias de cada lugar. Estas actividades experimentales propias del proyecto de investigación estuvieron acompañadas de una importante formación de los recursos humanos involucrados.

Se modificaron variables de a una por vez, se realizaron ensayos de laboratorio, se evaluaron resultados, se realizaron ajustes en base a conclusiones parciales y se transfirieron los resultados en cursos y seminarios de trabajo. Por último la producción se difundió en publicaciones elaboradas con los resultados que estos conocimientos aportarán desde el sector de ciencia y tecnología, alternativas para desarrollar nuevos productos, considerando que la construcción tiene un enorme potencial que involucra, por sus características, gran variedad de aplicaciones.

Las Instituciones participantes del proyecto fueron:

- UTN - Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Córdoba. Córdoba. Argentina.
- UVA - Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral. Ceará, Brasil.

- UNSA - Universidad Nacional de Salta. Salta. Argentina.

### 8.1.1 Objetivos del Proyecto

El objetivo general del Proyecto fue formar criterios para el diseño y uso racional de los materiales cementicios para realizar un aporte a la solución del déficit energético de los países participantes del proyecto compartiendo las realidades sociales de cada región.

Los objetivos específicos fueron:

- Desarrollar modelos de comportamiento de materiales cementicios que contengan un alto volumen de adiciones activas y no activas que contribuyan a la sustentabilidad del ambiente.
- Aportar una alternativa a otras tecnologías de construcción tradicionales, que consumen recursos no renovables o que producen impacto ambiental negativo.
- Transferir las nuevas tecnologías a las industrias de premoldeados, hormigón elaborado y otras para su aplicación desde los puntos de vista ecológico, técnico y económico.
- Fortalecer la formación de grado y especialmente la de posgrado en el área de materiales dictando cursos, intercambiando experiencias y resultados con los Centros de Investigación y Universidades participantes.
- Promover la formación de nuevas competencias en los integrantes de cada equipo potenciando sus perfiles propios.
- Realizar seminarios y encuentros orientados a promover la transferencia de conocimientos.
- Formalizar y potenciar las actividades de la Red entre las tres instituciones participantes.

### 8.1.2 Convocatoria: Proyectos de fortalecimiento de redes interuniversitarias VI

El proyecto de fortalecimiento de una red interuniversitaria se enmarca en tres ejes directrices:

La **formación de posgrado**. Es estratégica para el desarrollo de las universidades ya que posee una alta significación e impacto en los planos institucional y académico, en la formación y promoción de docentes e investigadores del más alto nivel, y el fortalecimiento de las actividades de investigación y desarrollo. El posgrado es una instancia sustancial de la formación académica si se lo entiende como un proceso orgánico y sistemático iniciado en el grado. Esta concepción implica su asociación imprescindible con la investigación y la extensión, que lo alimentan y proyectan.

La **formación de criterios**. En el marco de las necesidades de desarrollo nacional y regional, teniendo en cuenta las características particulares de estos procesos en los países de la región latinoamericana en general y de Argentina y Brasil en particular, se plantea en este proyecto el uso eficiente de la energía con la reducción de la emisión del CO<sub>2</sub> a través de la investigación en “materiales verdes” y su posible aplicación en las construcciones civiles.

La **transferencia de conocimientos**. En el marco anterior, en que se destaca la importancia de la formación de las personas en el desarrollo general, la ingeniería ocupa un papel de suma relevancia, tanto a nivel nacional como regional. El nivel de calidad y pertinencia social en la formación de sus graduados y la profundización de los procesos de transferencia de conocimientos tecnológicos al medio permiten anticipar cambios y necesidades del mercado y actuar con flexibilidad ante un mundo globalizado que cambia rápidamente.

## 8.2 Introducción: Polvo de Carnaúba

La carnaúba (*Copernicia prunifera*), también llamada carnaubeira e carnaíba, es un árbol de la familia Arecaceae originaria de la región del nordeste brasileiro. Es un árbol-símbolo del estado de Ceará, conocido “como árbol de la vida”, pues ofrece una infinidad de usos al hombre. Las raíces tienen uso medicinal como diurético, los frutos son un alimento rico para la alimentación animal, el tronco es de madera de calidad para la construcción de viviendas, las pajas son para la producción de artesanías, la fertilización y la extracción de cera (cera de carnaúba), un valioso producto que forma parte de la composición de varios productos industriales, tales como cosméticos, cápsulas de la medicina, electrónica, productos alimenticios, ceras para pulir y recubrimientos.

La investigación científica que implica su uso en la construcción, se inicia a partir del conocimiento del alto poder impermeabilizante que posee la cera de carnaúba. Sin embargo se necesita conocer el efecto de la incorporación del polvo de cera de carnaúba en el comportamiento mecánico del hormigón, que es el principal parámetro analizado por muchos proyectistas.

La carnaúba, palmera de la cual se extrae un polvo que da origen a la cera de carnaúba; crece en las áreas del Nordeste de Brasil, en las márgenes de ríos y lagos donde el suelo es oscuro y fértil. También puede ser encontrada en otras regiones de Brasil, en países de América del Sur y de África ecuatorial. En Brasil se encuentra en los estados de Ceará, Piauí, Rio grande do Norte, también es posible encontrarla en Maranhão, Bahía (en el Valle de São Francisco), Pernambuco y Paraíba. Entretanto, solamente en el Nordeste de Brasil la Copernicia Prunifera produce polvo de calidad, ya que en las otras regiones productoras las irregularidades de las lluvias no permiten la producción del polvo por el árbol.

El polvo de la carnaúba es extraído sin causar cualquier agresión a la palmera o al medio ambiente. Las hojas de la carnaúba que son retiradas para extracción del polvo son naturalmente repuestas en la cosecha, permitiendo la total recuperación del árbol un año después.

Fernandez Texeira Mesquita (2011) explica que la colecta del polvo se realiza de manera rudimentaria, en su mayoría todo el proceso de obtención del polvo de carnaúba es realizado artesanalmente. Inicialmente se realiza el corte de la paja de la Carnaúba, que contribuye a retrasar el envejecimiento de la palmera, y después la paja de la carnaúba es expuesta al sol para el secado. Después del secado el polvo es extraído y así se obtiene el polvo de la carnaúba.

La cultura de la Carnaúba es un perfecto ejemplo de la utilización sustentable de los recursos naturales. No agrede al medio ambiente en ninguna de las etapas del proceso. El corte de las hojas a través de la poda no perjudica a la palmera y además retarda su envejecimiento. El secado de las hojas es realizado a través de la luz solar. En la extracción del polvo, el resto de las hojas se transforma en abono orgánico. En la producción de la cera bruta el agua es utilizada como solvente. En las industrias el residuo de la filtración son reciclados produciendo cera y abono orgánico (bagana).

En la Figura 8.1 se observa la palmera de donde se extrae el polvo de carnaúba y en la Figura 8.2 como son secadas con exposición solar las hojas de la palmera para luego extraerse el polvo de carnaúba que es el material que se utiliza en esta investigación.



Figura 8.1. Copernicia prunifera



Figura 8.2 Secado de las hojas de carnaúba para la posterior extracción del polvo. Fuente: Fernandez Texeira Mesquita (2011)

Carvalho de Arruda Coelho y Fernandes Teixeira Mesquita (2010) explican que el polvo de carnaúba esta constituido principalmente por una combinación de ácidos melísicos y ácidos

queráticos (con una pequeña proporción en estado libre), una lactona, un hidrocarburo y tres alcoholes diferentes incluyendo el alcohol melísico.

### **8.2.1 Antecedentes carnaúba**

En la institución donde se llevó a cabo el trabajo experimental, el Instituto de Estudos de Materiais de Construção (IEMAC), perteneciente a la Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), contaba con antecedentes de trabajar con el polvo de carnaúba como adición en mezclas cementicias. Los trabajos desarrollados fueron en hormigones autocompactables, y el polvo de carnaúba fue incorporado como material fino necesario para lograr la consistencia y fluidez del hormigón autocompactable. Además se utilizó el polvo como mejorador de propiedades de durabilidad.

Algunos de los trabajos previos del laboratorio se han presentado en el Congreso Internacional IBRACON desde el año 2010 al 2012 inclusive, siendo sus principales autores el Profesor Dr. Francisco Carvalho de Arruda Coelho y el Ing. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

## **8.3 Trabajo experimental**

A continuación se presenta el trabajo experimental que se realizó para la investigación llevada a cabo durante la estadía en la UVA.

Se realizaron tres series de hormigones estructurales. Un hormigón referencia con  $350\text{kg/m}^3$  de cemento Portland, un hormigón con adición de polvo de carnaúba del 5% del cemento y un hormigón con reemplazo del 5% del polvo de carnaúba por el cemento. Se evaluó resistencia mecánica midiendo resistencia a compresión uniaxial a 7, 28, 90 y 180 días (norma NBR 5739, 1994); resistencia atracción por compresión diametral a 28, 90 y 180 días (norma NBR 7222, 1994) y modulo elástico (norma NBR 8522, 2004).

También se realizó el ensayo de absorción de agua por inmersión e índice de vacíos (norma NBR 9778, 2009).

### 8.3.1 Materiales y métodos

Se presentan los materiales utilizados y sus caracterizaciones según normas Brasileiras NBR o normas MERCOSUR NBR NM según corresponda.

#### Agregado Fino

En la Tabla 8.1 se presenta la caracterización física del agregado fino y en la Figura 8.3 la curva granulométrica del agregado junto a las curvas límites para agregado fino según norma IRAM 1627 (1997).

Tabla 8.1 Características del agregado fino

Módulo de finura Norma NBR 7217 (1987)	Masa específica Norma NBR NM 52 (2009)	Absorción [%] Norma NBR 9937 (1987)
2,99	2,67	0,8

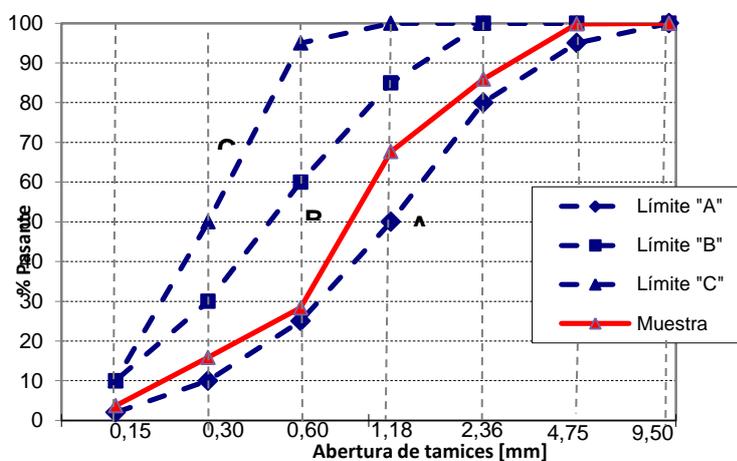


Figura 8.3 Curva granulométrica del agregado fino.

**Agregado Grueso**

A continuación se presenta en la Tabla 8.2 la caracterización física del agregado grueso y en la Figura 8.4 la curva granulométrica del agregado.

Tabla 8.2 Características del agregado grueso

Tamaño máximo [mm] Norma NBR 7217 (1987)	Masa específica Norma NBR NM 53 (2002)	Absorción [%] Norma NBR NM 53 (2002)
19	2,73	1,58

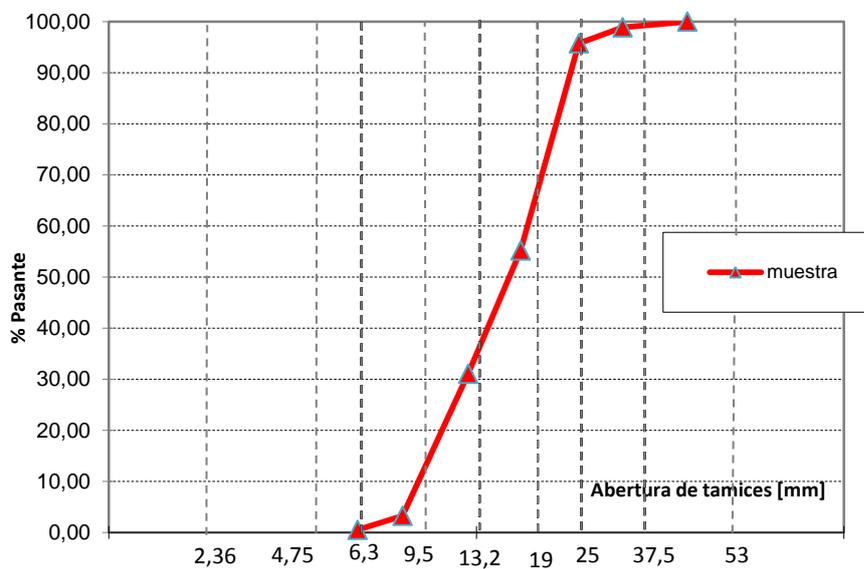


Figura 8.4 Curva granulométrica del agregado Grueso.

**Cemento**

Se utilizó un cemento Portland clase II, denominado CP II-Z-32 RS, de uso local. Es un cemento Portland compuesto con puzolana resistente a los sulfatos, con una resistencia a compresión a los 28 días mínima de 32 MPa. En la Tabla 8.3 se presenta la composición del cemento utilizado.

Tabla 8.3 Composición del cemento. Componentes en % de la masa total

Identificación	Clase <sup>(a)</sup>	Clinker + sulfatos de calcio	Escoria granulada <sup>(b)</sup>	Material puzolánica <sup>(c)</sup>	Material de carbonato <sup>(d)</sup>
CP II-Z	32	94-76	-	6-14	0-10

Fuente: Associação Brasileira de cimento Portland

Notas: (a) Resistencia a la compresión a los 28 días en MPa

(b) La composición debe obedecer a  $\frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2} > 1$

(c) La actividad puzolánica debe ser  $\geq 75\%$

(d) con un mínimo de 85% de  $CaCO_3$

### Aditivo

Se utilizó un aditivo superfluidificante tipo II con poder de reducción de agua y extraordinaria fluidez, densidad  $1,08 \text{ g/cm}^3$  y composición a base de policarboxilatos. Dosis recomendada entre 0,3 a 1,5% del peso del cemento. Se utilizó en todos los hormigones un 0,5%.

En la Figura 8.5 se presenta el aspecto del aditivo empleado



Figura 8.5 Aditivo empleado

## Carnaúba

Como se mencionó en el punto 8.2, el polvo de la carnaúba es un material que se obtiene de una palmera, la Copernicia prunifera, por lo tanto tiene un origen biológico, orgánico. Tiene una gran capacidad impermeabilizante y reacciona como puzolana en las mezclas cementicias según Fernandez Texeira Mesquita (2011).

Tiene una densidad de  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , por lo que resulta un material muy liviano en relación al cemento que va a reemplazar o adicionar en esta investigación.

En la Figura 8.6 se presentan los materiales finos utilizados en los hormigones.



Figura 8.6 Materiales finos de los hormigones

### 8.3.2 Dosificaciones

En la Tabla 8.4 se presenta las dosificaciones realizadas.

Tabla 8.4 Dosificación para hormigones para un m<sup>3</sup> de mezcla

Material / Hormigones	HP0	HR5	HA5
Cemento CPN40 [Kg.]	350	332,5	350
Agua [Kg.]	190	190	190
Adición (Carnaúba) [Kg.]	0	17,5	17,5
Agregado grueso [Kg.]	1003	984	975
Agregado Fino [Kg.]	870	853	846
Aditivo Plastificante [Kg.]	0,175	0,166	0,175
Relación a/c	0,54	0,57	0,54

### 8.3.3 Resultados y análisis

#### Asentamiento

Se presenta en la Tabla 8.5 los resultados del ensayo de determinación de consistencia con la medición del asentamiento mediante cono de Abram.

Tabla 8.5 Asentamiento

Asentamiento	HP0	HR5	HA5
Modulo elástico [cm]	17,0	7,5	5,5

Como puede observarse en los resultados de consistencia, el asentamiento disminuyó al aumentar la cantidad de material aglomerante en la mezcla, es decir, cantidad de cemento más polvo de carnaúba. Esto es como consecuencia de un aumento en el volumen de pasta. Si se comparan la mezcla HP0 y HR5, si bien tienen igual cantidad de material aglomerante, en el caso del HR5 al tener polvo de carnaúba, que tiene menor densidad que el cemento, se tiene mayor cantidad de volumen de material, en consecuencia, mayor cantidad de pasta.

### Resistencia a compresión

Se determinó la resistencia a compresión a 7, 28, 90 y 180 días según norma brasilera NBR 5739, 1994. En la Figura 8.7 se presenta los valores de resistencia alcanzados por los hormigones estudiados y en la Figura 8.8 la evolución de ganancia de resistencia a compresión.

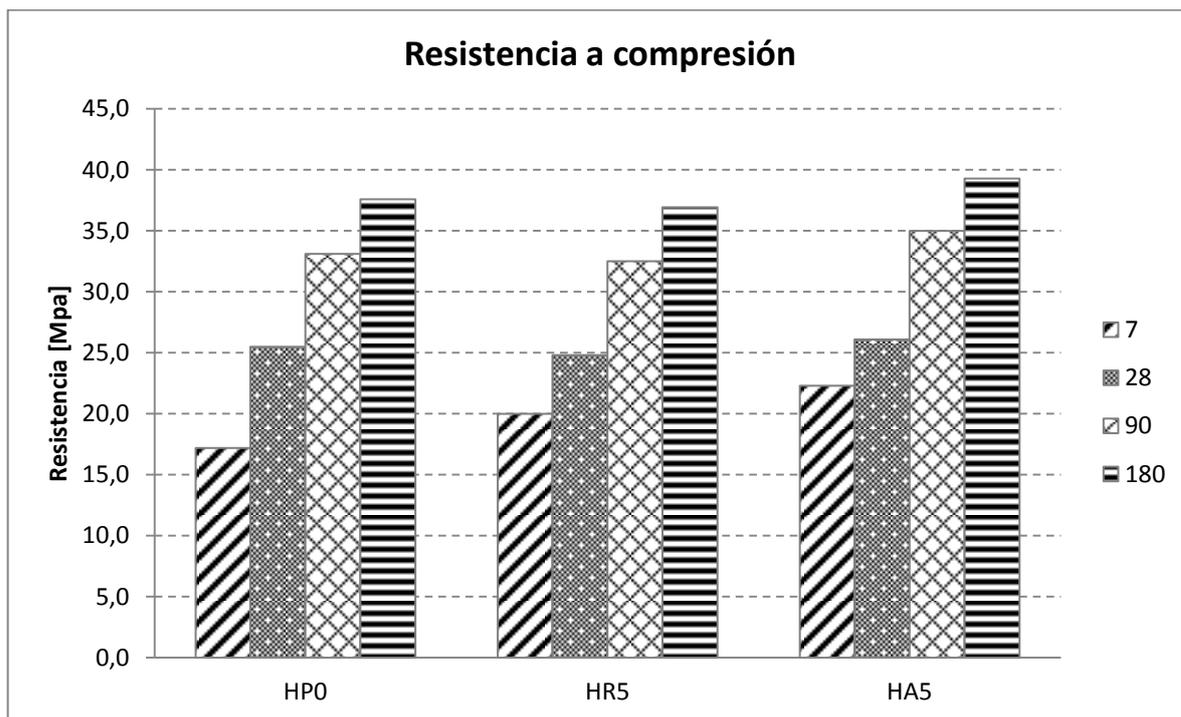


Figura 8.7 Resistencia a compresión

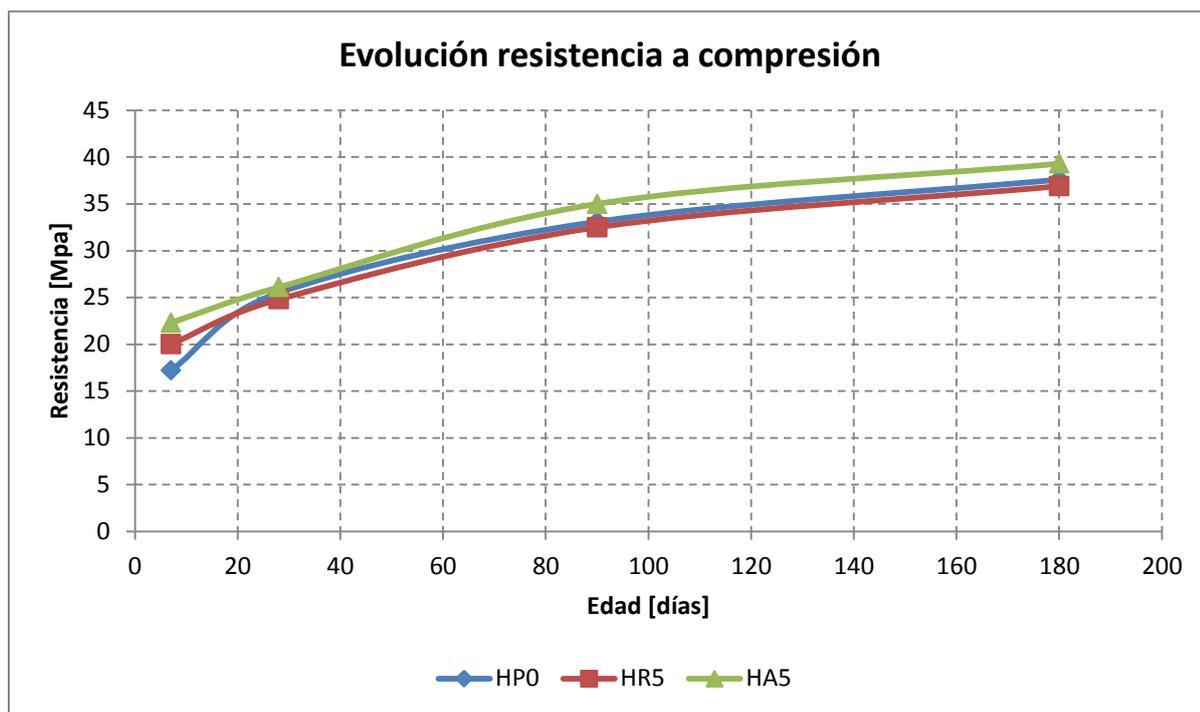


Figura 8.8 Evolución de la resistencia a la compresión

Como puede observarse en las Figura 8.7 y 8.8 se obtiene una ganancia de resistencia con la incorporación del polvo de carnaúba como adición en relación a los valores de resistencia del hormigón patrón. Cuando se utiliza el polvo de carnaúba como reemplazo si bien no se produce ganancia de resistencia, los valores alcanzados solo difieren del patrón en un 2% aproximadamente. Es decir que se puede reemplazar parte del cemento por la adición sin detrimento significativo de la resistencia a compresión.

### **Resistencia a tracción**

En la Figura 8.9 se presenta los valores de resistencia a tracción por compresión diametral alcanzados por los hormigones según norma brasilera NBR 7222, 1994.

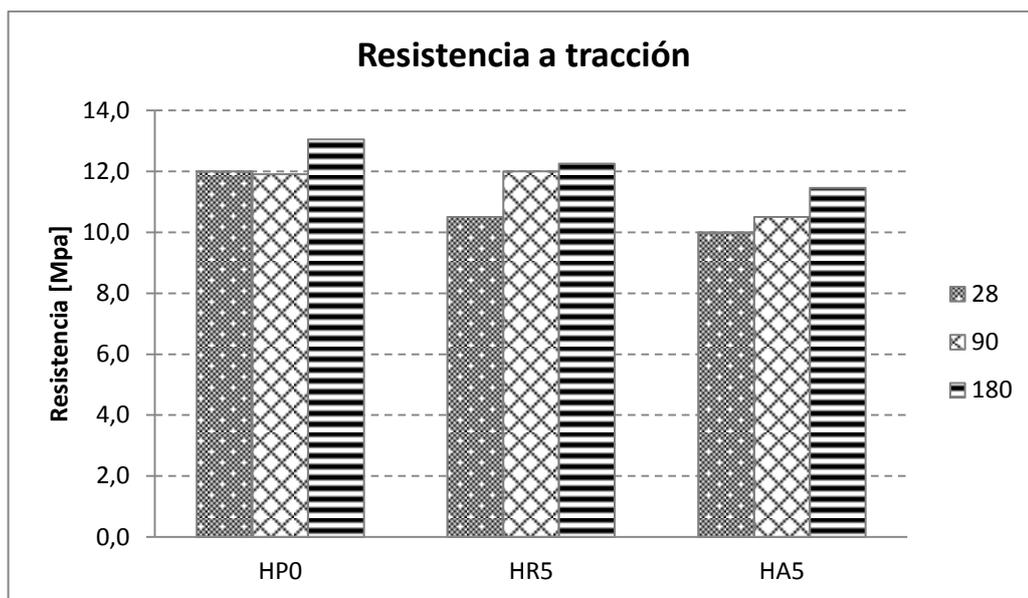


Figura 8.9 Resistencia a tracción

### Módulo elástico

En la Tabla 8.6 se presenta los valores de módulo elástico alcanzados por los hormigones a 28 días, determinados según norma brasilera NBR 8522, 2004.

Tabla 8.6 Módulo elástico

Hormigones	HP0	HR5	HA5
<b>Modulo elástico [GPa]</b>	48,1	42,9	46,5

En la Figura 8.10 se presenta un gráfico donde se relaciona los módulos elásticos con la resistencia a compresión a igual edad, 28 días.

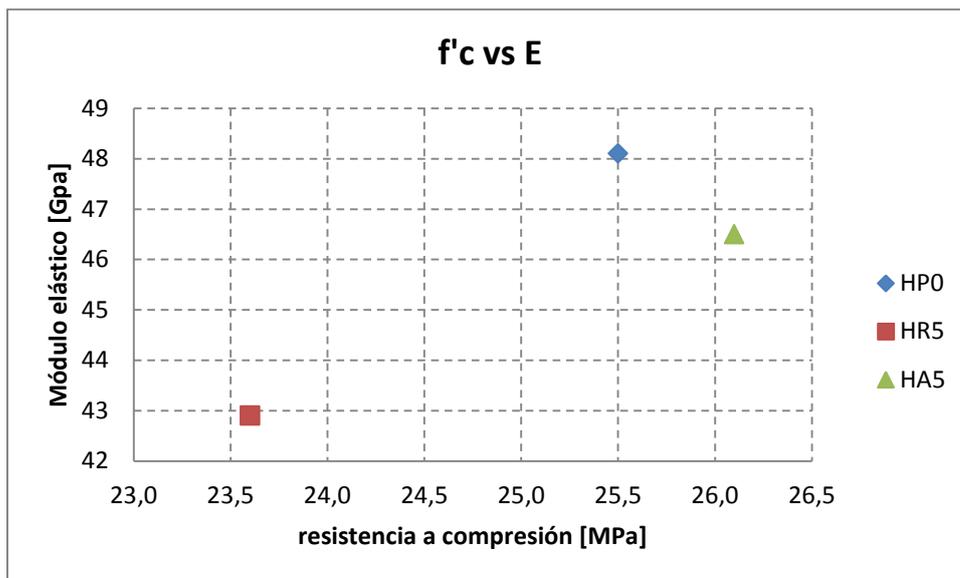


Figura 8.10 Relación entre el módulo elástico y la resistencia a compresión a 28 días

Como puede observarse en la Figura 8.7 las mezclas tienen a ser más deformables con la incorporación del polvo de carnaúba. Su módulo elástico disminuye con el contenido de la adición, así pues, para la mezcla con reemplazo el módulo disminuye respecto al patrón en un 11% aproximadamente, mientras que para la mezcla con adición sólo un 3.3%. Se debe considerar que la mezcla HR5 tiene una relación entre polvo de carnaúba y cemento mayor que la mezcla HA5. Por lo que se puede inferir que el polvo de carnaúba provoca mezclas menos rígidas.

### **Absorción por inmersión e índice de vacíos**

Se presenta en la Tabla 8.7 los valores de absorción por inmersión e índice de vacíos para los hormigones a 90 días determinados según norma NBR 9778, 2009.

Tabla 8.7 Absorción por inmersión e índice de vacíos

Hormigones	HP0	HR5	HA5
Absorción por inmersión [%]	2,55	2,44	2,35
Índice de vacíos	114,01	114,72	142,72

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, el polvo tiene propiedades impermeabilizantes, por lo cual se quería mediante esta investigación comprobar si la incorporación de la adición a las mezclas beneficiaba esta característica. Mediante el análisis de absorción por inmersión se comprobó que el polvo de carnaúba impermeabiliza las mezclas de hormigón, esto se ve reflejado en la disminución del porcentaje de absorción por inmersión.

Se debe destacar que si bien se disminuyó la permeabilidad, las mezclas presentaron mayor índice de vacíos que el hormigón referencia. Sin duda, estos vacíos no están conectados entre sí, favoreciendo canales de filtración en la masa de hormigón.

## 8.4 Conclusiones

Se puede concluir que la incorporación del polvo de carnaúba en pequeño porcentaje (5%), ya sea como adición o reemplazo del contenido de cemento en hormigones, constituye una opción viable en el diseño de hormigones. La incorporación de la adición demostró resultados satisfactorios en los ensayos de resistencia y mejoras en los ensayos de absorción. Por lo que puede afirmarse que el polvo de carnaúba resulta un material apto para ser incorporado en mezclas cementicias, logrando transferir su propiedad impermeabilizante a las mezclas, al tiempo que constituye un material puzolánica natural que presenta buen comportamiento mecánico en los hormigones.



## Anexo II

<p><b>TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA AL MEDIO LOCAL. TRABAJO EXPERIMENTAL EN INDUSTRIA DE PREMOLDEADOS</b></p>
---

En este anexo se presenta parte de lo estudiado y trabajado con ceniza volante como adición al cemento en el marco del estudio preliminar de esta tesis que incluyó el análisis y trabajo con otras adiciones al cemento.

Se muestra los resultados alcanzados en un trabajo de investigación y transferencia a medio productivo. Se presentan los resultados alcanzados de un estudio en equipo con una empresa reconocida en el medio que se dedica a la fabricación de elementos pretensados para viviendas.

## 9.1 Empresa local de premoldeados y pretensados de hormigón

Se trabajó con una empresa local que realiza ventas a nivel nacional dedicada desde 1979 a la elaboración de productos premoldeados y pretensados de hormigón.

Cuenta con una planta fabril (planta Nº 1) de 15.989 m<sup>2</sup> de superficie cubierta, instalada en un predio de 5.3 Has en el acceso norte a San Miguel de Tucumán (Ruta Nacional Nº9 – km. 1298 – Los Pocitos). En Noviembre de 1992, se habilitó otra fábrica en Río Segundo, Córdoba (Ruta Nacional Nº 9 Km 666).

La fabricación industrial de gran variedad de elementos premoldeados de hormigón brinda al mercado de la construcción una solución rápida y eficaz para la ejecución de obras, al reducir notablemente las tareas a efectuar “in situ”. La dosificación de los hormigones empleados se realiza en peso y es estrictamente controlada en laboratorio, garantizándose de esta forma la obtención de productos de gran resistencia y calidad homogénea. El curado con vapor permite la obtención de elevadas resistencias en pocas horas, lo que agiliza la producción al minimizar los tiempos entre los sucesivos moldeados.

La producción de la fábrica comprende los siguientes elementos:

- Viguetas pretensadas para techos y entrepisos
- Bovedillas de hormigón (9, 13 y 17 cm de altura) para losas con viguetas
- Bloques de hormigón
- Tejas de hormigón
- Adoquines
- Cercas de hormigón
- Caños de hormigón
- Postes pretensados (rurales y olímpicos)
- Tanques australianos
- Galpones rurales
- Estructuras para naves industriales (vigas, columnas, vigas “gamma”, placas Pi, etc.)
- Vigas pretensadas para puentes (para trenes de carga de la D.N.V.)
- Pasarelas
- Tribunas premoldeadas

- Viviendas industrializadas
- Elementos a pedido

### 9.1.1 Producción de viguetas

Las VIGUETAS T21 constituyen la "armadura" de la losa ya que tienen por función absorber las tracciones que se producen en el forjado. Son elementos semirresistentes pues en sí mismas no constituyen una estructura, debiendo completarse con la capa de compresión.

Las viguetas tienen una sección de hormigón constante y su forma es la de una "T" invertida. La resistencia de las viguetas varía según la cantidad de armadura, y la excentricidad de las cargas de pretensado, diferenciándose de esta forma las series de producción estándar que se adecuan a los requerimientos del cálculo. La fabricación industrial de las viguetas, con hormigones de gran resistencia ( $300 \text{ Kg/cm}^2$ ) cuya tensión inicial es proporcionada por gatos de tensado hidráulico con controles manométricos, garantizan un producto final de calidad óptima.

Las viguetas se fabrican en pistas de gran longitud en cuyos extremos están los cabezales de tensado, desde donde se tensan los cordones de acero según los valores del cálculo. El acero es fijado a las placas de anclaje mediante cuñas especiales, procediéndose al hormigonado con una máquina moldeadora de última tecnología. Se efectúa luego el curado mediante vapor, cubriendo los bancos de viguetas con carpas especiales. Una vez alcanzada la resistencia necesaria, se transfieren los esfuerzos al hormigón liberando los anclajes y procediendo al cortado de las viguetas.

## 9.2 Introducción

El mundo de la construcción es muy dinámico y existe una gran demanda de alta tecnología y materiales energéticamente eficientes. La ceniza volante es un residuo de proceso, generada por la combustión del carbón mineral en las centrales térmicas que lo utilizan como combustible, que tiene las propiedades de una puzolana por lo que se la considera una

adición activa en mezclas cementíceas. Por lo cual es un material disponible que ofrece grandes oportunidades para el desarrollo de futuros materiales de construcción.

Se estudia el comportamiento de hormigones estructurales utilizados en la industria del pretensado de viguetas. Se presentan los resultados obtenidos en un hormigón patrón sin la adición y hormigones con diferentes porcentajes de reemplazo del cemento por la ceniza volante. Se determinaron las propiedades en estado endurecido.

Kumar Metha (2008), en su conferencia durante el desarrollo del 50° Congreso de IBRACON, 2008, manifiesta que para la contribución hacia el medio ambiente y sostener a la industria cementera debe actuarse sobre: el diseño de estructuras con menor volumen de hormigón, disminuir el contenido de cemento en las mezclas cementíceas y/o consumir menos clínker en la fabricación de cementos.

Desde nuestro estudio se persigue actuar sobre la disminución del contenido de cemento en los hormigones, y reemplazar parcialmente a éste por un residuo de proceso.

La ceniza volante como toda puzolana se combina con los hidratos cálcicos resultantes de la hidratación del cemento, permitiendo aumentar el contenido de los productos silicatados de la hidratación, y en consecuencia ofreciendo mayores resistencias a largo plazo.

Para Molina Bas (2008) el uso de cenizas volantes como adición al hormigón esta ampliamente extendido por dos razones: el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la adición.

En Estados Unidos, Canadá, Gran Bretaña, Australia, Portugal y Alemania, las cenizas volátiles producidas por la quema de carbón en las plantas generadoras de energía están autorizadas y homologadas por instituciones técnicas como producto no contaminante y beneficioso en la elaboración de hormigón, asfalto, membranas y ladrillos. Y se promueve su empleo por su contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. (Baldo, 2013)

El siguiente trabajo de transferencia tecnológica pretendió estudiar y aplicar este residuo de proceso en el área de la industria del prefabricado de viguetas pretensadas. La importancia del estudio radicó en la posibilidad de transferir conocimientos de laboratorio a una escala mayor como es una fabrica de pretensados.

### 9.2.1 Obejtivo

El objetivo general fue evaluar la posibilidad de la incorporación de ceniza volante en hormigones estructurales empleados en la industria de la prefabricación de viguetas pretensadas y analizar su propiedades de resistencia.

## 9.3 Trabajo experimental

Se plantearon cinco grupos de hormigones. Se realizó una mezcla patrón sin adición que es la que normalmente emplea la industria en la fabricación de viguetas estructurales, y cuatro series de hormigones con reemplazo de parte del cemento por la ceniza volante en distintos porcentajes.

En la Figura 9.1 puede observarse el proceso de fabricación de los hormigones en la mezcladora y luego la descarga en la tolva. En la Figura 9.2 se aprecia la máquina viguetera en plena producción y finalmente en la Figura 9.3 se ven las viguetas frescas ya moldeadas, en este caso con el hormigón CV<sub>20</sub>.



Figura 9.1 Proceso de fabricación: mezcladora y tolva de descarga.



Figura 9.2 Máquina viguetera.



Figura 9.3 Viguetas frescas ya moldeadas.

## 9.4 Materiales

A continuación se detallan las principales características de los materiales empleados en la elaboración del hormigón para las viguetas.

### 9.4.1 Cemento

Se utilizó cemento normal, categorizado CPN40, según IRAM 50000 (2010). Densidad relativa: 3,15

### 9.4.2 Ceniza volante [CV]

La ceniza volante es un residuo de proceso generado por la combustión del carbón mineral en las centrales térmicas que lo emplean como combustible. La CV es procedente de una central térmica ubicada en San Nicolás, provincia de Buenos Aires, Argentina.

En la Tabla 9.1 se presenta la composición química y las propiedades físicas de la ceniza empleada, correspondiendo esta CV a la clase F de puzolanas, según norma ASTM C618 (2003).

Tabla 9.1 Ceniza volante. Caracterización.

Propiedad	Unidad	Valor
SiO <sub>2</sub>	%	44,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	24,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	8,02
CaO	%	6,54

Tabla 9.1 Ceniza volante. Caracterización. (Continuación)

Propiedad	Unidad	Valor
MgO	%	1,32
SO <sub>3</sub>	%	0,33
K <sub>2</sub> O	%	0,57
TiO <sub>2</sub>	%	1,41
Pérdida por calcinación	%	9,21
Densidad Relativa	-	2,20

#### 9.4.3 Agregado grueso

Se utilizó un agregado grueso triturado de uso normal en la zona. De tamaño máximo 9,5 mm y de granulometría continua.

#### 9.4.4 Agregado fino

Se empleó como agregado fino una arena natural de granulometría continua y dentro de curvas límites, según normativa IRAM 1627 (1997).

Según los resultados de ensayos químicos, no posee sustancias nocivas ni perjudiciales que puedan afectar al hormigón.

#### 9.4.5 Agua

Se utilizó agua potable que cumple con la norma IRAM 1601 (2012).

## 9.5 Diseño de hormigones

Se plantearon cinco grupos de hormigones. Una mezcla patrón y cuatro mezclas con distinta cantidad de incorporación de ceniza volante como sustituto parcial del cemento Portland.

En la Tabla 9.2 se presenta las dosificaciones realizadas. Se expresan las cantidades de materiales en Kg. por m<sup>3</sup> de mezcla.

Tabla 9.2 Dosificaciones

Material / Hormigones	CV <sub>0</sub>	CV <sub>20</sub>	CV <sub>30</sub>	CV <sub>40</sub>	CV <sub>50</sub>
Cemento	350	330	320	310	300
Agua	130	130	130	130	130
Ceniza volante	0	20	30	40	50
Agregado grueso	827	824	818	815	814
Agregado Fino	1185	1180	1170	1169	1167
Relación a/c	0,37	0,39	0,41	0,42	0,43
Relación a/ma	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

### 9.5.1 Resultados y análisis

A continuación se presentan los resultados alcanzados con las mezclas planteadas.

#### Comportamiento en estado fresco

En todos los casos las mezclas son de consistencia muy seca dado que el moldeado se realiza con compactación de alta vibración. No se observaron diferencias significativas de la plasticidad de las mezclas entre las distintas dosificaciones.

En la Figura 9.4 se puede observar el aspecto de la mezcla CV<sub>20</sub> durante el proceso de mezclado en planta.



Figura 9.4 CV<sub>20</sub> durante el mezclado

### Comportamiento en estado endurecido

En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión en el momento del destensado, del acopio (1 día), del despacho (3 días), a 28 días (resistencia característica) y 90 días. En la Tabla 9.3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 9.3 Resistencias a compresiones alcanzadas en MPa.

Hº	Destensado [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]	1 día [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]	3 días [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]	28 días [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]	90 días [MPa]	Diferencia con Hº referencia [%]
CV <sub>0</sub>	22,5	0,0	23,4	0,0	24,7	0,0	42,3	0,0	45,0	0,0
CV <sub>20</sub>	19,0	15,6	23,1	1,3	24,4	1,2	40,1	5,2	47,7	-6,0
CV <sub>30</sub>	26,1	-16,0	26,7	-14,1	31,0	-25,5	47,4	-12,1	55,2	-22,7
CV <sub>40</sub>	22,5	0,0	24,7	-5,6	29,0	-17,4	42,8	-1,2	50,6	-12,4
CV <sub>50</sub>	21,6	4,0	23,8	-1,7	27,0	-9,3	43,4	-2,6	50,3	-11,8

Las mayores resistencias a todas las edades de estudio se logran con la mezcla CV<sub>30</sub>. Se visualiza también la característica puzolánica de la ceniza en el tiempo, pues para todas las mezclas con ceniza las resistencias aumentan en el tiempo.

La resistencia característica exigida por norma de 30 MPa a los 28 días es ampliamente cumplida por todas las mezclas. Y en el caso del hormigón CV<sub>30</sub>, dicha resistencia se alcanza a los 3 días.

En la Figura 9.5 se presenta la evolución de los resultados de resistencia a compresión en el tiempo.

En todos los casos las resistencias van creciendo con la edad de ensayo. Las mezclas con la adición incrementan su resistencia desde el momento del acopio hasta los 28 días entre 74% a 82%; y dado a la característica puzolánica de la ceniza todos los hormigones con ceniza continúan incrementando su resistencia desde los 28 a 90 días aproximadamente entre un 16% y 19%.

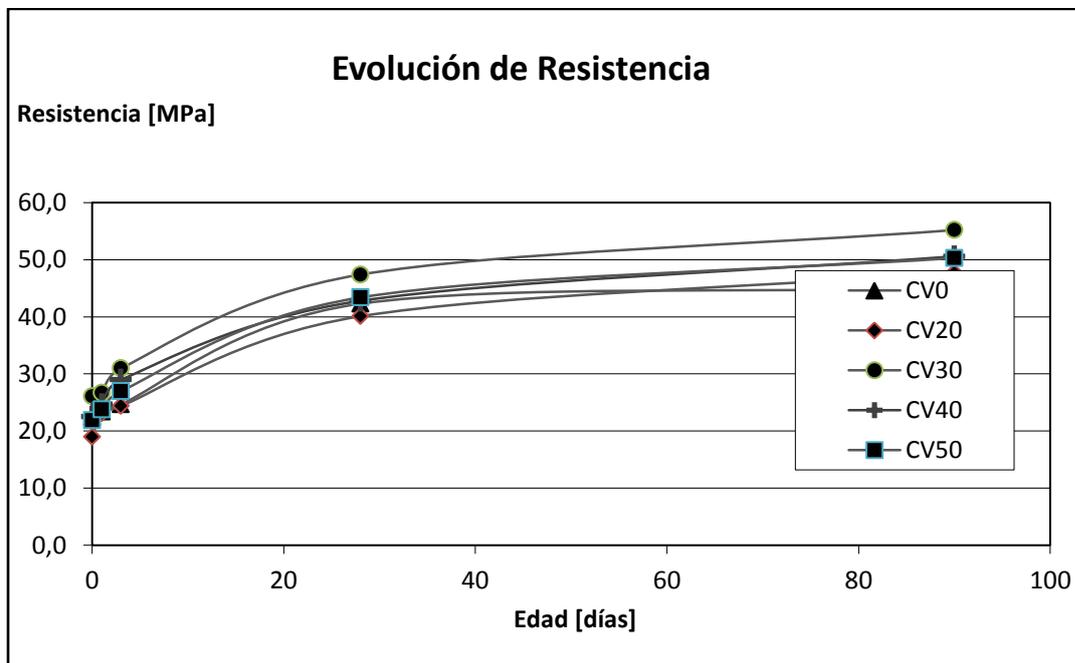


Figura 9.5 Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo.

También se determinó el módulo elástico para las distintas dosificaciones. En la Tabla 9.4 se expresan los resultados del ensayo para la determinación de módulos elásticos según norma ASTM C469 (2014).

El módulo de elasticidad es un indicador de la capacidad del hormigón de conservar su forma original después de estar sujeto a cargas extremas (Molina Bas, 2008).

Tabla 9.4 Módulos elásticos en GPa

Hormigones	Módulo elástico [GPa]	Diferencia con Hº referencia [%]
CV <sub>0</sub>	33,7	0,0
CV <sub>20</sub>	37,9	-12,5
CV <sub>30</sub>	39,8	-18,1
CV <sub>40</sub>	36,4	-8,0
CV <sub>50</sub>	36,1	-7,1

Al analizar el módulo elástico como parámetro comparativo entre las mezclas se observa un particular fenómeno. Todas las mezclas presentan un módulo mayor a la mezcla patrón; sin embargo se aprecia como hay un crecimiento lineal del módulo a medida que aumenta el contenido de ceniza hasta una incorporación de ceniza de 30 kg/m<sup>3</sup>; a partir del cual a mayor incremento de ceniza, menor es el módulo elástico que se alcanza.

En la Figura 9.6 y Figura 9.7 se presentan los resultados de determinación de succión capilar según norma IRAM 1871 (2004).

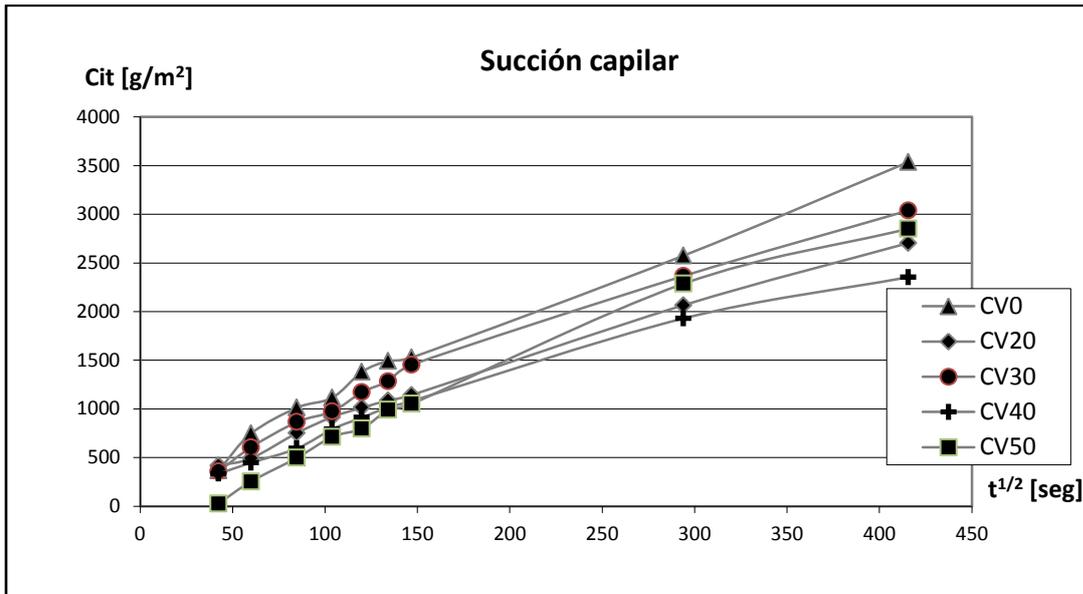


Figura 9.6 Sución capilar.

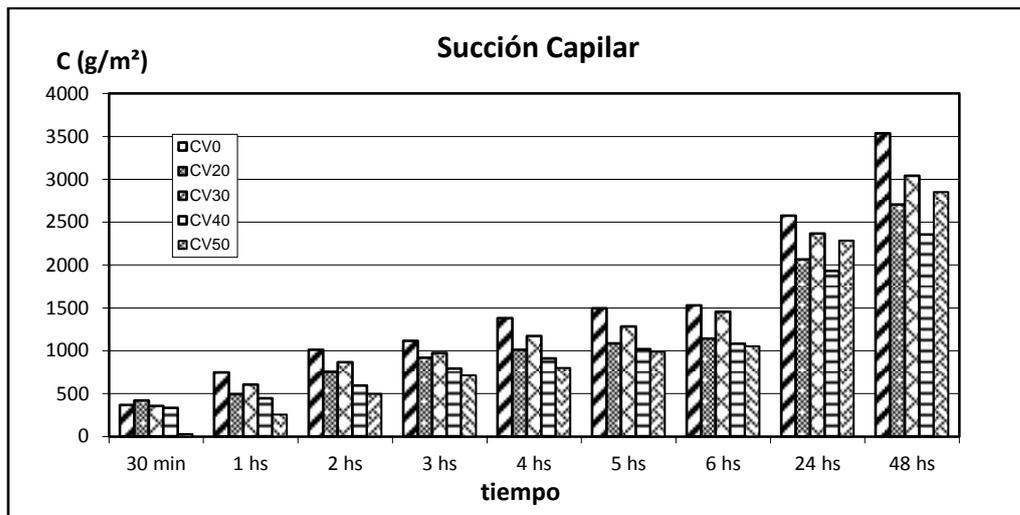


Figura 9.7 Resultados de ensayo de succión capilar.

El mecanismo de transporte de succión capilar se observa es más afectado en las mezclas con ceniza volante. Se aprecia una reducción de la succión capilar en las mezclas con incorporación de ceniza respecto del patrón para todos los períodos de tiempo analizados. Se puede observar también como esa reducción no es proporcional al incremento de ceniza en los hormigones, pues no se puede concluir que a mayor contenido de ceniza en la

mezcla, menor sea la succión capilar observada en éstas. Un claro ejemplo de esto es el comportamiento que muestra el hormigón CV<sub>30</sub>.

Finalmente en la Tabla 9.5 se presentan las clases de permeabilidad al aire y en la Tabla 9.6 se muestran los resultados de la determinación de la permeabilidad al aire en las muestras a 90 días.

Tabla 9.5 Clases de permeabilidad

Clase	kT Permeabilidad	Permeabilidad
PK5	> 10	Muy Alta
PK4	1.0 – 10	Alta
PK3	0.1 – 1.0	Moderada
PK2	0.01 – 0.1	Baja
PK1	< 0.01	Muy Baja

Tabla 9.6 Resultados de ensayo de permeabilidad al aire

Hormigones	KT [ $\cdot 10^{-16} \text{m}^2$ ]	L [mm]	Gráfico	Permeabilidad
CV <sub>0</sub>	0,62	39	Lineal	Moderada
CV <sub>20</sub>	0,62	41	Lineal	Moderada
CV <sub>30</sub>	0,4	36	Lineal	Moderada
CV <sub>40</sub>	0,31	35	Lineal	Moderada
CV <sub>50</sub>	0,68	41	Lineal	Moderada

Las mezclas con ceniza volante en general presentan resultados menores de permeabilidad al aire que la mezcla patrón lo que indicaría que se produce una modificación beneficiosa de la porosidad e interconectividad de los poros de la masa de hormigón al incorporarse ceniza volante en la mezcla.

Si bien la permeabilidad al aire es menor en las mezclas con ceniza se observa que todos los hormigones estudiados están dentro del mismo rango de permeabilidad moderada.

A continuación en la Tabla 9.7 se observan los resultados de la determinación de la absorción en los hormigones estudiados.

Tabla 9.7 Valores de absorción

Hormigones	Absorción [%]	Diferencia con Hº referencia [%]
CV <sub>0</sub>	3,9	0,0
CV <sub>20</sub>	2,2	43,6
CV <sub>30</sub>	2,7	30,8
CV <sub>40</sub>	2,5	35,9
CV <sub>50</sub>	3,1	20,5

Al analizar la absorción de los hormigones también se comprueba el efecto de la adición en la modificación de la estructura de poros. Se deduce que la adición modifica la red de capilares dentro de las mezclas por lo cual la capacidad de absorción de éstas disminuye al tener ceniza volante. Se recomienda que el valor de la absorción sea menor del 3% para tener hormigones menos permeables.

## 9.6 Conclusiones

Es posible la utilización ceniza volante como reemplazo parcial del cemento, ya que se cumple con los requisitos para los hormigones estudiados en la industria del prefabricado de viguetas pretensadas

Los resultados a resistencia a compresión muestran que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del cemento, las resistencias van aumentando también; evidenciando la acción puzolánica de la adición. Sin embargo, las mezclas de hormigón con ceniza volante, como sustituto parcial del cemento Portland, no desarrollan su resistencia del mismo modo que las mezclas sin cenizas. Esto se debe principalmente a la reducción a la dosis de cemento y a la velocidad de reacción puzolánica de las cenizas.

La determinación de la permeabilidad del material, ya sea al agua, medida a través de la succión capilar y absorción, o al aire, indica que las mezclas con ceniza mejoran el comportamiento ante estos indicadores. Resultando una mejora en la impermeabilidad de los hormigones estudiados. La ceniza volante modifica la estructura porosa de la masa de hormigón y la interconectividad de dichos poros. Las cenizas generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro. (Molina Bas, 2008).

Se concluye que es factible la utilización de la ceniza volante estudiada en mezclas cementíceas para viguetas pretensadas con resultados satisfactorios, sobre todo en relación a indicadores de durabilidad. La incorporación de esta adición en esta industria en particular, destaca el compromiso de la empresa en aprender e implementar tecnologías limpias y nuevos conocimientos en el área de materiales con el propósito de mejorar la calidad de sus productos y contribuir a la sostenibilidad del ambiente.



## Anexo III

<b>PRODUCCIÓN CIENTÍFICA</b>
------------------------------

En el presente anexo se menciona los principales trabajos y actividades desarrolladas y logradas durante el desarrollo de la tesis doctoral.

En el apartado 10.1 se menciona los trabajos científicos publicados en congresos, talleres, jornadas, reuniones, nacionales e internacionales. En el apartado 10.2 se enumeran los trabajos presentados a eventos científicos que no se han publicado. En el apartado 10.3 se citan los artículos publicados en revistas pertinentes a la temática de estudio, en el apartado 10.4 se mencionan los proyectos I+D en los que se ha participado y han dado marco a la presente investigación y en los apartados 10.5, 10.6 y 10.7 pasantía realizada, formación de recursos humanos y actividad docente respectivamente.

## 10.1 Trabajos presentados en congresos con referato

A continuación se presentan los trabajos científicos presentados en distintos eventos científicos que han sido evaluados y presentados durante el desarrollo de la tesis doctoral

### 10.1.1 Año 2011

- Título del evento: IV CRETA: Congreso Regional de la Tecnología de la Arquitectura
- Tipo de evento: Congreso Regional
- Organizador del evento: Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Arquitectura y Urbanismo
- Lugar y fecha: Resistencia, Chaco, Argentina, Junio de 2011.
- Título del trabajo: Residuos de proceso como adición no activa en hormigones. El caso del polvo de trituración
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, Iris Sánchez Soloaga, Ángel Oshiro, María Josefina Positieri, Carlos Baronetto
- Publicación: ISBN: 978-987-25052-5-7
  
- Título del evento: 53º Congreso Brasileiro del concreto. 53 IBRACON
- Tipo de evento: Congreso Internacional
- Organizador del evento: IBRACON
- Lugar y fecha: Florianópolis, Brasil. Noviembre de 2011
- Título del trabajo: Hormigón convencional con alto volumen de ceniza volante. Propiedades en estado endurecido
- Autores: Ángel Oshiro, María Josefina Positieri, Carlos Baronetto, Bárbara Belén Raggiotti, Iris Sánchez Soloaga, Paula Parola
- Publicación: ISSN: 2175-8182.

---

### 10.1.2 Año 2012

- Título del evento: 2º Reunión Materiales Tecnológicos en Argentina – Matte@r 2012
- Tipo de evento: Reunion
- Organizador del evento: Programa Materiales . Secretaria de Ciencia, Tecnologia y Posgrado de UTN.
- Lugar y fecha: San Rafael, Mendoza - Argentina. Mayo de 2012
- Título del trabajo: Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Julio Fernández, Ángel Oshiro
- Publicación: ISBN: 978-950-42-0144-1
  
- Título del evento: Segunda Jornada de Intercambio y difusión de los resultados de investigaciones de los doctorandos en ingeniería
- Tipo de evento: Jornada
- Organizador del evento: Secretaria de Ciencia, Tecnologia y Posgrado de UTN
- Lugar y fecha: San Rafael, Mendoza - Argentina. Mayo de 2012
- Título del trabajo: Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Julio Fernández
- Publicación: ISBN: 978-950-42-0154-0
- 
  
- Título del evento: Primera Jornada del Programa Estructuras y Construcciones Civiles
- Tipo de evento: Jornada
- Organizador del evento: Programa Estructuras. Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN-FRC
- Lugar y fecha: Córdoba – Argentina. Octubre de 2012.
- Título del trabajo: La ceniza volante como adición activa en hormigón autocompactable y estructural
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Julio Fernández, Ángel Oshiro

- Publicación: ISBN: 978-987-1896-07-3
- Título del evento: V Congreso Internacional y 19º Reunión técnica “Ing. Oscar R. Batic”
- Tipo de evento: Congreso Internacional
- Organizador del evento: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón
- Lugar y fecha: Bahía Blanca –Argentina. Noviembre de 2012.
- Título del trabajo: Eficiencia de distintos tipos de adiciones activas para aumentar la impermeabilidad
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro, gCarlos Baronetto, Iris Sánchez Soloaga, Dayana Rautenbeg
- Publicación: ISBN: 978-987-21660-6-9

### 10.1.3 Año 2013

- Título del evento: 1º Congreso ALCONPAT Argentina 2013. Patología, control de calidad y rehabilitación en la construcción. ALCONPAT Argentina.
- Tipo de evento: Congreso
- Organizador del evento: Facultad Regional Mendoza – UTN. CeReDeTeC: Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica.
- Lugar y fecha: Mendoza, Argentina. Mayo de 2013
- Título del trabajo: Durabilidad del hormigón con adiciones: importancia de sus indicadores
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro
- Publicación: ISBN 978-950-42-0148-9.
- Título del evento: CINPAR 2013. IX Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.
- Tipo de evento: Congreso Internacional
- Organizador del evento: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

- 
- Lugar y fecha: João Pessoa – Brasil. Junio de 2013
  - Título del trabajo: Hormigones convencionales con perlita. Análisis de indicadores de durabilidad
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro, Iris Sánchez Soloaga
  - Publicación: ISBN: 978-85-63406-30-9
  
  - Título del evento: CINPAR 2013. IX Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
  - Lugar y fecha: João Pessoa – Brasil. Junio de 2013
  - Título del trabajo: Contribución a la reducción de la Huella Ecológica del hormigón
  - Autores: Iris Sánchez Soloaga, Ángel Oshiro, María Josefina Positieri, Bárbara Belén Raggiotti
  - Publicación: ISBN: 978-85-63406-30-9
  
  - Título del evento: CONPAT 2013. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV. Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: ALCONPAT Internacional
  - Lugar y fecha: Cartagena de Indias – Colombia. Septiembre de 2013
  - Título del trabajo: El empleo de adiciones activas en hormigones convencionales y su efecto en indicadores de durabilidad
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro
  - Publicación: ISBN: 978-958-58090-1-7.
  
  - Título del evento: CONPAT 2013. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV. Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: ALCONPAT Internacional

- Lugar y fecha: Cartagena de Indias – Colombia. Septiembre de 2013
  - Título del trabajo: Evaluación de elementos premoldeados de hormigón utilizados en instalaciones de crianza de ganado porcino en ambiente agresivo. Recomendaciones de fabricación
  - Autores: Ángel Oshiro, María Josefina Positieri, Carlos Baronetto, Bárbara Belén Raggiotti
  - Publicación: ISBN: 978-958-58090-1-7.
- 
- Título del evento: EnIDI 2013. Séptimo Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería
  - Tipo de evento: Encuentro
  - Organizador del evento: Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional
  - Lugar y fecha: Los Reyunos, Mendoza, Argentina. Septiembre de 2013
  - Título del trabajo: Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro
  - Publicación: ISBN 978-950-42-0152-6

#### **10.1.4 Año 2014**

- Título del evento: 3º Reunión Materiales Tecnológicos en Argentina – Matte@r 2014
- Tipo de evento: Reunión
- Organizador del evento: Programa Materiales . Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado de UTN.
- Lugar y fecha: La plata, Argentina. Mayo de 2014
- Título del trabajo: Hormigones con zeolita natural como adición activa: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Julio Fernández, Ángel Oshiro

- 
- Título del evento: CINPAR 2014. X Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: Estructuras. Escuela de construcción civil, Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile
  - Lugar y fecha: Santiago de Chile, Chile. Junio de 2014
  - Título del trabajo: La Zeolita, una puzolana natural. Adición en mezclas cementicias. Propiedades alcanzadas
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro, Francisco Locati
  - Publicación: ISBN: 978-956-14-1442-6.
- 
- Título del evento: CINPAR 2014. X Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: Estructuras. Escuela de construcción civil, Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile
  - Lugar y fecha: Santiago de Chile, Chile. Junio de 2014
  - Título del trabajo: Hormigón para reparación de pavimentos rígidos y de habilitación temprana
  - Autores: Virginia Mugetti, Nelson Ferreyra, Bárbara Belén Raggiotti, Ángel Oshiro
  - Publicación: ISBN: 978-956-14-1442-6.
- 
- Título del evento: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2014.
  - Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento: IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto
  - Lugar y fecha: Natal, RN, Brasil. Octubre de 2014
  - Título del trabajo: El hormigón autocompactante con alto volumen de adición activa y no activa. Propiedades y disminución de su huella ecológica utilizando materiales regionales (Córdoba-Argentina)
  - Autores: Ángel Oshiro, María Josefina Positieri, Iris Sanchez Soloaga, Bárbara Belén Raggiotti.

- Publicación: ISSN: 2175-8182.
- Título del evento: VI Congreso Internacional. 20º Reunión Técnica: Ing. Alberto S. C. Fava.
- Tipo de evento: Congreso Internacional
- Organizador del evento: AATH: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Lugar y fecha: Concordia, Entre Ríos, Argentina. Octubre de 2014
- Título del trabajo: Eficiencia de las adiciones de la ceniza volante, la microsílíce y del polvo residuo de trituración en la resistencia a compresión y propiedades vinculadas a la durabilidad. Estudio de casos.
- Autores: Ángel Oshiro, Bárbara Belén Raggiotti, Iris Sánchez Soloaga, Eduardo Cabral, Heloína Nogueira.
- Publicación: ISBN: 978-987-21660-7-6.
- Título del evento: Terceras Jornadas de intercambio y difusión de los resultados de investigación de los doctorandos en ingeniería.
- Tipo de evento: Jornadas
- Organizador del evento: Secretaría de ciencia, tecnología y posgrado. Subsecretaría de posgrado. Universidad Tecnológica Nacional.
- Lugar y fecha: Mendoza, Argentina. Noviembre de 2014
- Título del trabajo: Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad.
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Julio Fernandez.
- Publicación: ISBN: en trámite

## 10.2 Trabajos presentados en congresos no publicados

### 10.2.1 Año 2012

- Título del evento: V Simposio Internacional sobre Concretos Especiales – SINCO 2012

- 
- Tipo de evento: Congreso Internacional
  - Organizador del evento:
  - Lugar y fecha: Fortaleza – Brasil. Marzo de 2012.
  - Título del trabajo: Influencia de las adiciones activas en la durabilidad del hormigón. El cómo y el por qué
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Paula Parola, Dayana Rautenberg, Amalia Romero
- 
- Título del evento: 12 JEI (Jornada de Estudiantes Investigadores).
  - Tipo de evento: Jornada
  - Organizador del evento: Fagdut
  - Lugar y fecha: Rosario – Argentina. Septiembre de 2012.
  - Título del trabajo: Hormigones convencionales con alto volumen de perlita. Propiedades en estado endurecido
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, Iris Sánchez Soloaga, Nelson Ferreyra, Cristian Borioni
- 
- Título del evento: 12 JEI (Jornada de Estudiantes Investigadores).
  - Tipo de evento: Jornada
  - Organizador del evento: Fagdut
  - Lugar y fecha: Rosario – Argentina. Septiembre de 2012.
  - Título del trabajo: Hormigón liviano sustentable con incorporación de residuo plástico multicapas: diseño y propiedades para el ahorro energético
  - Autores: Bárbara Belén Raggiotti, Iris Sánchez Soloaga, Nelson Ferreyra, Cristian Borioni
- 
- Título del evento: 19<sup>º</sup> Jornadas chilenas: Hormigón sustentable
  - Tipo de evento: Jornada
  - Organizador del evento: Centro Tecnológico del Hormigón (CTH), Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) y Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile
  - Lugar y fecha: Santiago de Chile, Chile. Noviembre de 2013.

- Título del trabajo: De la investigación a la industria: el caso de la ceniza volante como adición activa
- Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Ángel Oshiro, Sebastián Barnes

### 10.3 Artículos en revistas indexadas

- Publicación del artículo “Evaluación térmica de morteros elaborados con zeolita como porcentaje de sustitución de aglomerante”  
Revista: Avances en energías renovables y medio ambiente.  
Autores: Rosa Carina Andrade, Carlos Baronetto, María Positieri, Ángel Oshiro, Bárbara Belén Raggiotti e iris Sánchez Soloaga  
Datos de la revista y la publicación. Volumen 16, Agosto - Octubre de 2012. Páginas: 223-230. ISSN: 0329-5184
- Publicación del artículo “Evaluación de elementos premoldeados de hormigón utilizados en instalaciones de crianza de ganado porcino en ambiente agresivo. Recomendaciones de fabricación”  
Revista ALCONPAT (Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción).  
Autores: Ángel Oshiro, María Positieri, Carlos Baronetto y Belén Raggiotti.  
Datos de la revista y la publicación. Año 3, número 2, Mayo-Agosto de 2013. Páginas: 144-152. ISSN: 2007-6835
- Publicación del artículo “Zeolite, study of aptitude as a natural pozzolan applied to structural concrete”  
Revista: Revista de la Construcción. (Escuela de Construcción Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile)  
Autores: Bárbara Belén Raggiotti, María Josefina Positieri, Francisco Locati, Juan Murra, Silvina Marfil  
Datos de la revista y la publicación. En publicación. ISSN 0718-915X

---

## 10.4 Participación en proyectos I+D

- Nombre del Proyecto: “Nuevas perspectivas en el diseño y optimización de mezclas cementicias. contribución al medio ambiente sustentable”
  - Código: 25/E151. Proyecto PID
  - Fecha de inicio y finalización: 01 enero 2010 al 31 diciembre 2013
  - Instituciones participantes: Facultad Regional Córdoba/UTN, Universidad: Nacional de Córdoba; Nacional de Salta; Universidad Federal de Ceará (Brasil); Universidad Estatal del Vale de Acaraú (Brasil)
  - Director: Ing. Angel Oshiro
  - Co-director: Dra. María Positieri
- 
- Nombre del Proyecto: “Análisis e incorporación de factores de diseño en tipologías de viviendas prefabricadas de interés social en Argentina”.
  - Código de Proyecto: UTN 1416
  - Fecha de inicio y finalización: Enero de 2011 a Diciembre de 2013
  - Director: Ing. Carlos Baronetto
  - Codirectora: Dra. María Positieri
- 
- Nombre del Proyecto: Análisis experimental y caracterización de pavimentos porosos y su respuesta hidrológica.
  - Código de Proyecto: UTN 1596
  - Fecha de inicio y finalización: Enero de 2012 a Diciembre de 2014
  - Instituciones participantes: CINTEMAC y Laboratorio de Hidráulica. Ambos pertenecientes a la Facultad Regional Córdoba, UTN.
  - Director: Dra. María Positieri
  - Codirector: Ing. Juan Weber

- Nombre del Proyecto: “Caracterización de morteros elaborados con materiales reciclados y su aplicación como aislante térmico”
  - Fecha de inicio y finalización: Enero de 2012 a Diciembre de 2014
  - Directora: Ing. Carina Andrada
  - Codirector: Ing. Carlos Baronetto
- 
- Nombre del Proyecto: “La Gestión de los RRHH en los Centros de I+D+i en el marco de las Normas de la Calidad”
  - Fecha de inicio y finalización: Enero de 2013 a Diciembre de 2015
  - Director: Msc. Ing. Claudia Beltramone
  - Codirectora: Ing. Carina Andrada
- 
- Nombre del Proyecto: Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable.
  - Código de Proyecto: 16-17-2579. Perteneciente al del Programa de promoción de la universidad argentina, según Resolución RES-2340-Redes-VI
  - Instituciones participantes: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, la Universidad Nacional de Salta y la Universidad Estatal del Vale de Acaraú (UVA, Brasil).

## 10.5 Pasantías

Pasantía en el Instituto de Estudos de Materiais de Construção – IEMAC perteneciente a la Universidade Estadual Vale do Acaraú –UVA.

Temática de trabajo: Hormigones sustentables con la incorporación de una adición activa local como reemplazo de parte del cemento. La adición empleada fue el polvo de la palmera Carnaúba. La investigación incluyó revisión bibliográfica, estudio del estado del arte, caracterización de los materiales locales y desarrollo de ensayos de hormigón en estado

---

fresco y endurecido. Estos trabajos se encuadran dentro del tema de tesis doctoral de la ingeniera denominado “Hormigones con adiciones activas: diseño, optimización y caracterización con criterio de sustentabilidad”.

Marco institucional de la pasantía: La pasantía se incluye en las tareas realizadas en el proyecto denominado “Diseño de mezclas cementicias ecológicas con eficiencia energética para un ambiente sustentable” (16-17-2579) que ha recibido financiación en la Convocatoria “PROYECTOS DE FORTALECIMIENTO DE REDES INTERUNIVERSITARIAS VI” en el marco del “PROGRAMA DE PROMOCIÓN DE LA UNIVERSIDAD ARGENTINA” según Resolución RES-2340-Redes-VI en el que participan la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, la Universidad Nacional de Salta y la Universidad Estatal del Vale de Acaraú (UVA, Brasil).

Persona responsable en lugar de pasantía: Prof. Dr. Francisco Carvalho de Arruda Coelho.

Lugar y fecha: Sobral, Ceará. Brasil. Del 16 de mayo de 2013 al 3 de julio de 2013.

## 10.6 Formación de recursos humanos

### 10.6.1 Codirectora de beca de investigación de grado

**Proyecto:** Caracterización de morteros elaborados con materiales reciclados y su aplicación como aislante térmico.

**Alumno: Gustavo Ribone** (DNI 35484334). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN.

**Duración:** Marzo de 2012 a diciembre de 2012.

**Proyecto:** Análisis e incorporación de factores de diseño en tipologías de viviendas prefabricadas de interés social en Argentina. (UTN1416)

**Alumno: Alessandra Tirocchi** (DNI 36142163). Becaria de investigación beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN.

**Duración:** Marzo de 2012 a diciembre de 2012.

**Proyecto:** Nuevas perspectivas en el diseño y optimización de mezclas cementicias. Contribución al medio ambiente sustentable. (25/E151)

**Alumnos: Yanina Gisel Gauna** (DNI 36142163). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN. **Guillermo Gimera** (DNI 35894731). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Duración:** Marzo de 2012 a diciembre de 2012.

**Proyecto:** Nuevas perspectivas en el diseño y optimización de mezclas cementicias. Contribución al medio ambiente sustentable. (25/E151)

**Alumnos: Alexis Sebastian Roldán** (DNI 35386577). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN. **Genaro Edwin Rondan Dueñas** (94092460). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Duración:** Marzo de 2013 a diciembre de 2013.

**Proyecto:** Análisis experimental y caracterización de pavimentos porosos y su respuesta hidrológica. (UTN 1596)

---

**Alumnos:** **Federico Uanini** (DNI 36240891). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional. **Alessandra Tirocchi** (DNI 36142163). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Duración:** Marzo de 2013 a diciembre de 2013.

**Proyecto:** Mejora del desempeño del hormigón: aspectos relacionados con la durabilidad, la vida útil y la preservación del ambiente. (ECINICO0002064TC)

**Alumnos:** **Ferradas, Celeste** (DNI 36680385). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN. **Valentina Medawar Aguilar** (DNI 36046491). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional. **Pablo Andrés Karpowicz** (DNI 35530869). Becario de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Duración:** Marzo de 2014 a diciembre de 2014.

**Proyecto:** Análisis experimental y caracterización de pavimentos porosos y su respuesta hidrológica. (UTN 1596).

**Alumnos:** **Casale, Clarisa** (DNI 35633740). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Asuntos estudiantiles para desarrollar proyectos de investigación propuestos por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Facultad Regional Córdoba – UTN. **Carla Inés Foradori** (DNI 36447838). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional. **Alessandra Tirocchi** (DNI 36142163). Becaria de investigación, beca otorgada por la Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado (Rectorado) de la Universidad Tecnológica Nacional.

**Duración:** Marzo de 2014 a diciembre de 2014.

#### **10.6.2 Curso: Hormigón, tecnología, propiedades, materiales y producción.**

**Organizador:** CINTEMAC. Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad

**Duración:** 40 horas

**Lugar y fecha:** Municipalidad de Jesús María, Córdoba, Agosto - Octubre de 2013.

**Forma de participación:** Disertante de trabajos prácticos

### **10.7 Actividad docente**

Docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional categoría E

Categoría V en Programa de incentivos para docentes investigadores.

Antigüedad docente: de 2011 a la fecha.

Cátedras: Prefabricación (ad honorem) y Estructuras de hormigón (Ayudante de TP de 1º. Dedicación simple). Carrera Ingeniería civil (UTN-FRC)

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>
-----------------------------------

## A

ACI Committee 318 (2004). Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y Comentario, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 492 p.

Agosto, M.F. (2012). Estudio de zeolitas procedentes de depósitos Argentinos. Aspectos tecnológicos que posibiliten su aplicación en agroindustria y contralor ambiental. Tesis Doctoral. Universidad nacional de La Plata. Facultad de ciencias exactas. Departamento de química. 185 pp.

Ahmadi, B. (2007). Feasibility study of using natural zeolite as pozzolanic material in concrete. MSc thesis. Tehran: University of Tehran.

Ahmadi, B. & Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 32(2): 134 – 141.

Aitcin, P.C. (2003). The durability characteristics of high performance concrete. Faculty of engineering department of civil engineering. Quebec. Canada. Pp 409-420

Alcaraz Marín, J. (2012). Microestructura del hormigón. Proyecto final de grado. Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, España.

Andrada, R.C., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A., Raggiotti, B. & Sánchez Soloaga, I. (2012). Evaluación térmica de morteros elaborados con zeolita como porcentaje de sustitución de aglomerante. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16: 223-230.

Anicua Sánchez, R., Gutierrez Castorena, M.C., Sánchez Garcia, P., Ortiz Solorioo, C., Volke Halle, V.H. & Rubiños Panta, J.E. (2009). Tamano de partículas y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agricultura técnica en México*, volumen (35), número (2), pp. 147-156.

Ashby, M.F & Jones, D.R.H. (1996). *Engineering Materials 1. An Introduction to their Properties and Applications*. Segunda edición. Vol 1 y 2. ISBN: 0-7506-3081-7

Askeland, D.R. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson editores. ISBN 968-7529-36-9.

Auerbach, S.M., Carrado, K.A. & Dutta, P.K. (Ed). (2003). *Handbook of Zeolite Science and Technology*. Editorial: CRC Press Content.

## B

Baerlocher, Ch., McCusker, L.B. & Olson, D.H. (2007). *Atlas of Zeolite framework types*. Sixth revised edition. published on behalf of the structure Commission of the international Zeolite Association.

Baldo, P. en ARQ. (2013, 23 de julio). Para lograr un hormigón más rendidor. En ARQ, Clarín. Recuperado de [http://arq.clarin.com/construccion/Hormigon-rendidor\\_0\\_961104274.html](http://arq.clarin.com/construccion/Hormigon-rendidor_0_961104274.html)

Balzamo, H. & Checmarew, R. L. (2012). Capítulo 6: Aditivos químicos. En Maldonado, N.G. &

---

Carrasco, M. F. (Ed.). Ese material llamado hormigón (163-190). Buenos Aires. Editorial: AATH. ISBN 978-987-21660-5-2

Balzamo, H. & Giovambattista, A. (2011). Capítulo 3.4: Aditivos. En Giovambattista, A. (Ed). Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005 (145-170). Buenos Aires. Editorial: Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI. ISBN: 978-950-532-153-7.

Barnes, P. & Bensted, J. (2002). Structure and Performance of Cements. Second Edition. Spon Press, Taylor & Francis Group. London. ISBN: 0-203-47778-2.

Battelle (2002). The business of innovation. Summary report. Toward a sustainable cement industry. An independent study commissioned by World Business Council for Sustainable Development.

Becker, E.A. Cemento portland: características y recomendaciones de uso. LOMA NEGRA C.I.A.S.A.

Bilim, C. (2011). Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. Construction Building Materials; 25(8):3175–80.

Blanco Varela, M.T., Martínez Ramírez, S., Gener, M. & Vázquez, T. (2005). Modificaciones inducidas por la adición de puzolanas naturales zeolíticas en las pastas de cemento. Materiales de Construcción, Volumen (55), número 280, pp. 27-42.

Bonavetti, V.L. (2004). Capítulo 4: Hormigones con alto contenido de adiciones. En Irassar, E.F. (Ed.), Hormigones especiales (97-142). La Plata, Buenos Aires. Editorial: AATH. ISBN 987-21660-0-5.

Brady, N.C. & Weil, R.R. (1999). The nature and properties of soils. 12<sup>o</sup> Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey, USA. 881 páginas

Brunauer, S. & Copeland, L. E. (1964). The chemistry of concrete. Scientific American, Vol. 210, No. 4, pp. 80-92.

Burriesci, N., Arcoraci, C., Giordano, N. & Antonucci, P.L. (1985). Zeolites from pumice and tuff as evaluation of pozzolanic cement constituents. Zeolites; 5:96–100.

## C

Cabrera, O.A. (2013). Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración. Tesis de doctorado. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, argentina

Callister, W.D. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Department of Materials Science and Engineering. The University of Utah. Editorial Reverté, S.A.; Capítulo 6.

Canpolat, F., Yilmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. & Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. Cement and Concrete Research. Vol 34(5), 731–735

Caputo, D., Liguori, B. & Colella, C. (2008). Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure. Cement and Concrete Composites; 30(5):455–462.

Carpene Coitinho Dal Molin, D. (2005). Capítulo 12. Adições Minerais para Concreto Estrutural. En Cechella Isaia, G. (Ed.). Concreto, ensino, pesquisa e realizações. Vol 1 (pp 345 – 379). São Paulo: IBRACON. ISBN: 85-98576-04-2.

Carpene Coitinho Dal Molin, D. (2005). Capítulo 14. Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura. En Cechella Isaia, G. (Ed.). Concreto, ensino, pesquisa e realizações. Vol 1 (pp 405 – 438). São Paulo: IBRACON. ISBN: 85-98576-04-2.

Carvalho de Arruda Coelho, F. & Fernandes Teixeira Mesquita, E. (2010). Análise da Incorporação do Pó de Carnaubeira Sobre as Propriedades de Durabilidade do Concreto Auto-adensável. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2010. ISSN 1809-1121

Carvalho de Arruda Coelho, F., Fernandes Teixeira Mesquita, E. & Sampaio Marques, A. (2010). Comportamento mecânico do Concreto auto-adensável com Incorporação do pó de carnaúba. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2010. ISSN 1809-1121

Chan, S.Y.N. & Ji, X. (1999). Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. Cement & Concrete Composites. Vol 21(4): 293-300.

Chelischev, N., Volodin, N. & Kryukov. (1988). Ion Exchange Properties of Natural high Silica Zeolites. Nauka (ed.), Moscú. 174 pp.

Chen N.Y. & Garwood W.E. (1986). Catal. Rev. Sci. Eng. 28 (2-3) 185.

Chung, F.H. (1974). Quantitative interpretation of x-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis. J Appl Crystallogr. 7(6):519–25.

Cioffi, R., Colangelo, F., Caputo, D. & Liguori, B. (2006). Influence of high volumes of ultra-fine additions on self-compacting concrete. In: Malhotra VM, editor. Proceedings of the 8th Canmet/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete. Sorrento: Farmington Hills; 118–35.

CIRSOC (1985). Informe de Datos Tecnológicos del Hormigón Normal. INTI.

CIRSOC 201. (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI.

Código Canadiense. (1994). CAN 3-A23.3-M94. Design of Concrete Structures. Canadian Standards Association Standards

Colella, C. & Gualtieri, A.F. (2006). Cronstedt's zeolite - Zeolite '06 - 7th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites.

Costafreda Mustelier, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico De cabo de gata (Almería). Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Madrid

Csicsery, S.M. (1984). Shape-selective catalysis in zeolites. Zeolites, 4(3), 202-213.

## **D**

---

Ding, J., Fu, Y. & Beaudoin, J.J. (1995). Stratlingite formation in high alumina cement-silica fume systems: significance of sodium ions. *Cement Concrete Research*; 25(6):1311–9.

Dópico Montes de Oca, J.J., Martirena Hernandez, J.F., López Rodríguez, A. & González López. R. (2009). Effect of lime- zeolite binder on compression strength and durability properties of concrete. *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 24 No 2.

## E

Ebensperger, L. & Torrente, R. (2014). Ensayo in-situ de permeabilidad al aire: ¿un medidor de durabilidad?. X Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. CINPAR 2014. ISBN: 978-956-14-1442-6.

## F

Feng, N., Changchen, M. & Xihuang, J. (1992). Natural zeolite for preventing expansion dueto alkali-aggregate reaction. *ASTM Cement Concrete Aggregate*; 14(2):93–9.

Feng, X., Hao, T. & Xing, F. (2002). Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete. *Cement Concrete Research*; 32(4):623–7.

Feng, N. & Hao, T. (1998). Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali-silica reaction in concrete. *Advanced Cement Research*; 10(3):101–8.

Feng, N., Hongwei, J. & Enyi, C. (1998). Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction. *Magazine of Concrete Research* ; 50(1):17–24.

Fernández Luco, L; (2001). La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos, en “Durabilidad del Hormigón Estructural”, AATH, Autoeditor, páginas 2 y 3.

Fernandez, L.I. & Trezza, M.A. (2007). Estudio de la Aptitud del Loess Pampeano como Adición Activa al Cemento Portland. *Revista de la Construcción*, 6(1) 4-12. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619409001>.

Fernandez Texeira Mesquita, E. (2011). Tesis de grado. Durabilidade do concreto autodesável com incorporaçã do pó de carnaúba. Universidade Estadual Vale do Acaraú. Centro de ciências exactas e tecnologia. Sobral, CE.

Fernandes Teixeira Mesquita, E., Carvalho de Arruda Coelho, F. & Silva Montenegro, I. N. (2012). Avaliação da carbonatação e da interface agregado-argamassa do concreto autoadensável com incorporaçã do pó de Carnaúba submetidos à condições aceleradas em câmara climática. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Fernandes Teixeira Mesquita, E., Carvalho de Arruda Coelho, F. & Silva Montenegro, I. N. (2012). Comportamento do concreto autoadensável com pó de carnaúba submetido à condições naturais e

aceleradas: análise da absorção de água por imersão, por capilaridade e permeabilidade à água sob pressão. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Fernandes Teixeira Mesquita, E., Carvalho de Arruda Coelho, F. & Silva Montenegro, I. N. (2012). Resistividade elétrica aparente do concreto autoadensável com incorporação do pó de carnauba. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Fragoulis, D., Chaniotakis, E. & Stamakis, G. (1997). Zeolitic tuffs of Kimolos Island, Aegeansea, Greece and their industrial potential. *Cement Concrete Research*; 27(6):889–905.

Fu, Y., Ding, J. & Beaudoin, J.J. (1996). Zeolite-based additives for high alumina cement products. *Advanced Cement Based Materials*; 3(1):37–42

## **G**

Galuppo, J.C. (2011) En “Hormigón, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005”. Cap 3.3 Agua para el mezclado y curado del hormigón. Pp. 139 - 144. Primera edición. Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI. ISBN: 978-950-532-153-7.

Giannetto Pace G., Montes Rendón A. & Rodriguez Fuentes, G. (2000). Zeolitas: Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales, Innovación Tecnológica. Pp 187-205. Caracas. Editorial

Giovanbattista, P.A. (2014). Incorporación de cenizas volantes en el hormigón elaborado. Beneficios y usos. Matermix. Cenizas para la construcción. Recuperado en: <http://www.matermixrsl.com.ar/assets/incorporacion-de-cenizas-volantes-en-el-he--alta2.pdf>

Gonzales de la Cotera, M. (2006). Aditivos y adiciones del concreto; norma y aplicaciones. Asociación de productores de Cemento (ASOCEM). Perú.

Gottardi, G. & Alberti, A. (1988). Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites, D. Kalló and S Sherry (eds), 223.

Gregg, S.J. & Sing, K.S.W. (1982). Adsorption, Surface area and Porosity, A. P., London.

## **H**

Helene, P.R.L. (1993). Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese Livre Docência em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Helene, P.R.L. (2003)

Helene, P.R.L. (2005). Edificio e-Tower.

## **I**

Ikotun, B.D. (2009). The effect of modified zeolite additive as a cement and concrete improver. MSc

thesis. Johannesburg: University of the Witwatersrand.

Ikotun, B.D. & Ekolu, S. (2010). Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Constr Build Mater* 2010;24(5):749–57.

Ikotun, B.D., Ekolu, S. & De Freitas, V.G. (2008). Effect of modified zeolite additive on properties of cement mortars. In: Oyawa WO, Kimura M, editors. *Proceedings of the 2nd international civil engineering conference on civil engineering and sustainable development*. Mombasa; 187–96.

Irassar, E.F. (Ed.). (2001). *Durabilidad del Hormigón estructural*. Buenos Aires. Editorial: AATH. ISBN: 978-987-99797-2-3.

Irassar, E.F. (Ed.). (2004). *Hormigones especiales*. Buenos Aires.

Irassar, E.F. (2004). Capítulo 1: Hormigón: naturaleza y propiedades. En Irassar, E.F. (Ed.), *Hormigones especiales (1-16)*. La Plata, Buenos Aires. Editorial: AATH. ISBN 987-21660-0-5.

## J

Jana, D. (2007). A new look to an old pozzolan, clinoptilolite – a promising pozzolan in concrete. In: *Proceedings of the 29<sup>th</sup> ICMA conference on cement microscopy*. Quebec City: Curran Associates Inc.; pp. 168–206.

Janotka, I., Krajci, L. & Dzivak, M. (2003). Properties and utilization of zeolite-blended portland cements. *Clays and Clay Minerals*; 51(6):616–24

Janotka, I. & Števíla, L. (1998). Effect of bentonite and zeolite on durability of cement suspension under sulfate attack. *ACI Materials Journal*; 95(6):710–5.

Jordán Hernández, R., Betancourt-Riera, Re., Betancourt-Riera, Ri., Cabrera Galdo, E. & Cabrera Germán, D. (2013). Mejorador de suelo a partir de una zeolita natural: Una propuesta sustentable para la agricultura. *Nova Scientia*, vol. 6, núm. 11, pp. 1-11.

## K

Karakurt, C. & Topcu, I.B. (2012). Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete. *Construction and Building Materials* 35. Pp.906–911.

Kasai, Y., Tobinai, K., Asakura, E. & Feng, N. (1992). Comparative study of natural zeolites and other inorganic admixtures in terms of characterization and properties of mortars. In: Malhotra VD, editor. *Proceedings of the 9th Canmet/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. Istanbul: Farmington Hills; 615–34.

Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU.

Krolo, P., Krstulovic, R., Dabic, P. & Bubic, A. (2005). *Hydration and leaching of cementzeolite*

composite. *Ceram-Silikaty*; 49(3):213–9.

## **L**

Lea, F.M. (1971). *The chemistry of cement and concrete*. Chemical Publishing Company.

Leofanti, G., Padovan, M., Tozzola, G. & Venturelli, B. (1998). *Catalysis Today* 41, 207.

Liguori, B., Caputo, D., Marroccoli, M. & Collela, C. (2004). Evaluation of zeolitic-bearing tuffs as pozzolanic addition for blended cements. In: Malhotra VM, editor. *Proceedings of the 8th CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. Las Vegas: Farmington Hills; 319–33.

Lorca Aranda, P. (2014). Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante. Tesis doctoral. Dpto. Ing. De la construcción y proyectos de Ing. Civil. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia, España.

## **M**

Maldonado, N. G. & Carrasco, M. F. (Ed.). (2012). *Ese material llamado hormigón*. Buenos Aires. Editorial: AATH. ISBN 978-987-21660-5-2

Malhotra, V.M. & Mehta, P.K. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. *Advances in Concrete Technology, Vol 1*, Gorgon and Breach Publishers.

Malquori, G. (1962). Portland-pozzolana cement. In: *Proceedings of the 4th international symposium on chemistry of cement*. Washington: US Department of Commerce; 983–1006.

Margarit Benavent, V.J. (2013). *Síntesis y caracterización de zeolitas micro-mesoporosas obtenidas a partir de surfactantes bifuncionales*. Tesis de maestría. Universidad Politècnica de Valencia. Instituto de Tecnología Química. Valencia, España.

Mehta, P.K. (1987). *Naturals pozzolans. Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canadá. CANMET/ACI, pp. 3-33.

Mehta, P.K. (2008) *A glimpse into sustainable ternary-blended cements of the future*. 50<sup>º</sup> IBRACON. Salvador.

Mehta, P.K. (2010). *Sustainable cements and concrete for the climate change era*. Second International conference on Sustainable construction Materials and Technologies. ISBN 978-1-4507-1490-7

Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (2008). *Concreto. Microestrutura, propiedades e materiais*. Primera edición. Editora Ibracon.

Meier, W.M., Olson D.H. & Baerlocher, CH. (1996). *Atlas of Zeolites Structure Types, Fourth Revised Edition*, Elsevier Sc. Pub., Amsterdam.

---

Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P. & Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameter affecting their reactivity. *Cement Concrete Research*; 39(3):233–240

Misaelides, P. (2011). Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review, *Microporous and Mesoporous Materials* 144, 15.

Molina Bas, O.I. (2008). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. ISBN-13:978-84-691-5058-0.

Muniz de Farias, M. & Marques Palmeira, E. (2010). Capítulo 16. Agregados para a Construção Civil. En Cechella Isaia, G. (Ed.). *Materiais de construção civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Vol 1 (pp 483 – 525). 2 ed. São Paulo: IBRACON. ISBN: 978-85-98576-14-5.

## N

Naber, M.J. (2012). Determinación de la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Tesis becarios de investigación 2011. Editor: LEMaC, Universidad Tecnológica Nacional - FRLP. ISSN 2250-7221

Najimi, M. (2010). Investigating the properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious materials. Report No.: AF.TO-PO.N89/1. Tehran: Building and Housing Research Center.

Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. & Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive pozzolan. *Construction and Building Materials*; 35, 1023–1033.

Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete*. Prentice Hall.

Norma ASTM C204. (2000). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. ASTM, 8pp.

Norma ASTM C260. (2006). Historical Standard: Especificación Normalizada de Aditivos Incorporadores de Aire para Concreto. ASTM, 3pp.

Norma ASTM C469. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM, 5pp.

Norma ASTM C494. (1999). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM, 9pp.

Norma ASTM C618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete1. ASTM, 4pp.

Norma ASTM C642. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM, 3 pp.

Norma IRAM 1505. (2003). Agregados. Análisis granulométrico. Aggregates. Particle size distribution

analysis. IRAM, 16 pp.

Norma IRAM 1533. (2002). Agregados Gruesos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. IRAM, 12 pp.

Norma IRAM 1534. (2004). Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. Concrete. Making and curing test specimens for compressive and diametrical tensile compressive in the laboratory. AM, 15 pp.

Norma IRAM 1536. (1978). Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. IRAM, 8 pp.

Norma IRAM 1546. (2013). Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión. Cement concrete. Compression test method. IRAM, 13 pp.

Norma IRAM 1554. (1983). Hormigón de cemento pórtland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. IRAM, 15pp.

Norma IRAM 1569. (1990). Morteros, hormigones y sus componentes. Definiciones. IRAM, 19pp.

Norma IRAM 1601. (2012). Agua para morteros y hormigones de cemento. Water for mortars and cement concretes. IRAM, 22 pp.

Norma IRAM 1622. (2006). Cemento pórtland. Determinación de resistencias mecánicas. Portland cement. Determination of mechanical strength. IRAM, 25 pp.

Norma IRAM 1623. (2004). Cemento pórtland. Método de ensayo de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método de Blaine). Portland cement. Test method of fineness by dry sieving and for determination of the specific surface by air permeability (Blaine method). IRAM, 17 pp

Norma IRAM 1624. (2005). Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad. Cement. Test method for the determination of the density. IRAM, 9 pp.

Norma IRAM 1627. (1997). Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. IRAM, 23 pp.

Norma IRAM 1658. (1995). Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral. IRAM, 9 pp.

Norma IRAM 1663. (2002). Hormigón de cemento. Aditivos químicos. Concrete. Chemical admixtures. IRAM, 20 pp.

Norma IRAM 1871. (2004). Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Concrete. Test method for determination the water capacity and the capillary suction speed of the hardened concrete. IRAM, 12 pp.

Norma IRAM 50000. (2010). Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Cement. Common cement. Composition, specifications, conformity evaluation and reception conditions. IRAM, 42 pp.

---

Norma IRAM 50001. (2010). Cemento. Cementos con propiedades especiales. Cement. Cements with special properties. IRAM, 12 pp.

Norma NBR NM 52 (2009). Agregado miúdo. Determinação da massa específica e massa específica aparente. Fine aggregate. Determination of bulk specific gravity and apparent specific gravity. Method of test. Asociación MERCOSUR de normalización. AMN. 10 pp.

Norma NBR NM 53 (2002). Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Fine aggregate. Determination of bulk specific gravity and apparent specific gravity. Method of test. Asociación MERCOSUR de normalización. AMN 15 pp.

Norma NBR 5736 (1991). Cimento Portland pozolânico. Especificação. Pozzolanic Portland cement – Specification. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 5 pp.

Norma NBR 5739 (1994). Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Concrete - Compression test of cylindrical specimens - Method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 4 pp.

Norma NBR 6118 (2014). Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Design of concrete structures. Procedure. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 238 pp.

Norma NBR 7217 (1987). Agregados: Determinação da composição granulométrica. Aggregates - Sieve analysis of fine and coarse aggregates - Method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 3 pp.

Norma NBR 7222 (1994). Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Mortar and concrete - Determination of the tension strength of cylindrical specimens submitted to diametrical compression - Method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 3 pp.

Norma NBR 8522 (2004). Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão de formação. Concrete - Determination of the static elasticity and deformation modulus. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 9 pp.

Norma NBR 9778 (2009). Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão. Índice de vazios e massa específica. Hardened cement mortar and concrete - Determination of water absorption by immersion - Borehole index and bulk density. Method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 3 pp.

Norma NBR 9937 (1987). Agregados. Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Aggregates. Determination of absorption and specific gravity in coarse aggregate. Method of test. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 6 pp.

Norma NBR 15900-1. (2009). Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Mixing water for concrete. Part 1: Requirements. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Rio de Janeiro. 11 pp.

Norma Suiza SIA 262/1-E. (2003). Construction en béton – Spécifications complémentaires", Annexe E: Perméabilité à l'air dans les Structures, pp. 30-31.

## O

## P

Pargar, F., Valipour, M., Shekarchi, M. & Tahmasbi, F. (2010). Study on the effect of exposure conditions on the chloride diffusion of concretes incorporating silica fume, metakaolin and zeolite located in Qeshm Island. *Iran Concr J*; 35.

Paulino Aguilar, M. T. (2010). Capítulo 7. Superfícies e Interfaces. En Cechella Isaia, G. (Ed.). *Materiais de construção civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Vol 1 (pp 183 – 205). 2 ed. São Paulo: IBRACON. ISBN: 978-85-98576-14-5.

Pei-wei, G., Sheng-xing, W., Ping-hua, L. & Zhong-ru, W. (2004). Influence of composite mineral admixtures on expansion and crack do to AAR. In: *Proceedings of the 12th international on alkali-aggregate reaction in concrete*. Beijing; 716–20.

Pérez, D., Buxó, P., Maza, S., Mirabal, R., Ongay, M. y Ruiz, M. (1997). Depósitos de zeolitas. *Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Fundació Folch*. pp. 333- 341.

Perraki, T.H., Kakali, G. & Kontoleon, F. (2003). The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. *Microporous and Mesoporous Materials* Vol 61. Pp 205–212

Perraki, T.H., Kontori, E, Tsivilis, S. & Kakali, G. (2010). The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cement & Concrete Composites*; 32(2):128–33.

Pindo, J.C. & Céleri Montoya, A.G. (2008). La adición de Zeolita 2 al 25% en la mezcla de Cemento portland Tipo I con curado en agua y su influencia en la Resistencia a la Compresión Uniaxial.

Pinilla, A.M. & Veloza, L.T. (2010). *Fibras naturales y biocomposites*. Biopolímeros. Tesis de maestría. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Escuela de Ciencias Químicas. Facultad de Ciencias Básicas Química de Alimentos. Tunja, Colombia.

Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., & Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 13(8): 427 – 432.

Positieri, M.J. (2005). *Propiedades físicomecánicas y durabilidad del hormigón coloreado*. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba.

## Q

## R

Raggiotti, B.B., Positieri, M.J. & Oshiro, A. (2013). Durabilidad del hormigón con adiciones: importancia de sus indicadores. 1º Congreso ALCONPAT Argentina 2013. Patología, control de calidad

y rehabilitación en la construcción. Mendoza, 9 al 11 de Mayo de 2013. ISBN 978-950-42-0148-9.

Raggiotti, B.B., Positieri, M.J, Parola, M.P., Rautenberg, D.P. & Romero, A. (2012). Influencia de las adiciones activas en la durabilidad del hormigón. El cómo y el por qué. SINCO 2012. 5 Simposio Internacional sobre concretos especiales.

Rahhal, V. (2012). en "Ese material llamado hormigón". Cap 4: Aguas. Pp 93. ISBN: 978-987-21660-5-2.

Rahhal, V. & Eperjeci, L. (2012). En "Ese material llamado hormigón". Cap 3: Adiciones minerales. Pp 79-92. ISBN: 978-987-21660-5-2

Rosell Lam, M.B. & Galloso, R. (2001). Utilización de la zeolita como material de construcción. Experiencia cubana.

Rosell Lam, M.B., Galloso, R. & Calvo, B. (2006). Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. Boletín Geológico y Minero 117 (4): 783-792. ISSN: 0366-0176.

Rosell Lam, M.B., Costafreda Mustelier, J.L., Parra y Alfaro, J.L. & Calvo Pérez, B. (2011). Influencia de la adición de zeolita en las propiedades micro y macroestructurales en pastas y morteros. IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. Quito, Ecuador.

Ruiz-Serrano D., Flores-Acosta M., Conde-Barajas E., Ramírez-Rosales D., Yáñez-Limón J. M. & Ramírez-Bon R. (2010). Study by XPS of different conditioning processes to improve the cation exchange in clinoptilolite, Journal of Molecular Structure 980(1), 149

## S

Saad, M., De Andrade, W. & Paulon, V. (1982). Properties of mass concrete containing and active pozzolan made from clay. Concrete international, 4:(7), .59-65.

Santos Alves, A.L., Meneses dos Santos, F.D., da Costa Lima, R., Pereira de Sousa, F.W., Fernandes Teixeira Mesquita, E. & Carvalho de Arruda Coelho, F. (2012). Avaliação da influência do pó de carnaúba na velocidade de pulso ultrassônico em concretos autoadensáveis. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Sanz, M.C., Sánchez, A.P. & Jiménez, A.F. (2006). Nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes: influencia de los aditivos en las propiedades reológicas. Editorial CSIC - CSIC Press.

Sbrighi Nieto, C. (2011). Capítulo 7. Agregados Naturais, britados e artificiais para concreto. En Cechella Isaia, G. (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. Vol 1 (pp 233 - 260). 1ª ed. São Paulo: IBRACON. ISBN: 978-85-98576-16-9.

Sersale, R. (1980). Structure and characterization of pozzolans and fly ashes. In: Proceedings of the 7th symposium on the chemistry of cement, vol. 1. Paris.

Sersale, R. & Prigione, G. (1987). Portland-zeolite-cement for minimizing alkali-aggregate expansion. Cement Concrete Research; 17(3):404–10.

Shekarchi, M., Nejad, J.E., Ahmadi, B. & Rahimi, M. (2008). Improving concrete properties by using natural zeolite, Part I – Mechanical and durability properties. *Iran Concr J*; 30:34–42.

Shekarchi, M., Ahmadi, B & Najimi, M. (2012). Chapter 27: Use of natural Zeolite as Pozzolanic Material in Cement and Concrete Composites. En Inglezakis, V.J. & Zorpas, A.A. (Eds), *Handbook of Natural Zeolites*. (pp. 665 – 694).

Sheppard, R.A. & Gude, A.J., 3d (1969) Diagenesis of tuffs in the Barstow Formation, Mud Hills, San Bernardino County, California. *US Geol. Surv. Prof. Paper* 634:1-35.

Smith, J.V. (1976). *Zeolite Chemistry and Catalysis*, J.A.Rabo (ed), Am. Chem. Soc. Monogr., 171, 1.

Snellings, R., Mertens, G., Hertsens, S. & Elsen, J. (2009). The zeolite-lime pozzolanic reaction: reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction. *Microporous Mesoporous Materials*; 126(1–2):40–9.

Sousa Monteiro, L.M., Almeida Furtado, F., Fernandes Teixeira Mesquita, E. & Carvalho de Arruda Coelho, F. (2012). Estudo das propriedades reológicas da pasta autoadensável com incorporação de pó de carnaúba. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Sousa Monteiro, L.M., Almeida Furtado, F., Lima Pulga Filho, J., Fernandes Teixeira Mesquita, E. & Carvalho de Arruda Coelho, F. (2012). Estudo da influência da incorporação de pó de carnaúba no comportamento mecânico da pasta autoadensável. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON 2012. ISSN 2175-8182

Syner, K.A., Winslow, D.N., Bentz, D.P. & Garboczi, E.J. (1993). Interfacial zone percolation in cement aggregate composites. *Interfaces in cementitious composites*, Proc. of RILEM International conference, Toulouse, Francia. Pp 259-268, Ed E&FN Spon, UK.

## T

Tiburcio-Munive, G., Sandez-Aguilar, M., Aguayo-Salinas, S. & Burgos-Flores, D. (2008). Morteros para revestimiento de muros, utilizando arena zeolítica. *Revista Épsilon* Nº 10: 57-65 / Enero - junio 2008

Tokushige, H., Kamehima, H., Kawakami, M. & Bier, T.A. (2009). Effect of use of natural zeolite as a mineral admixture and an aggregate on physical properties of cement mortar and porous concrete. In: *Proceedings of the 4th international conference on construction materials: performance, innovations and structural implications*. Nagoya; 1231–6.

## U

Uzal, B., Turanli, L. & Mehta, P.K. (2007). High-volume natural pozzolan concrete for structural applications. *ACI Materials Journal*; 104(5):535–8.

## V

Valentinuzzi, M.C. (2008). Análisis por fluorescencia de rayos x: implementación de guías de haces en reflexión total. Tesis Doctoral. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba.

Varela, M.T.B., Ramirez, S.M., Erena, I., Gener, M. & Carmona, P. (2006). Characterization and pozzolanicity of zeolitic rocks from two Cuban deposits. *Applied Clay Science*; 33(2):149–59.

Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P., Keršner, Z., Sedlmajer, M., Černý, R. 2015. Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. *Cement & Concrete Composites*, volumen (55), pp. 259–267.

Vezzalini, G. (1997). Abstract Book of 4th Euroworkshop on Natural Zeolites: Occurrence, Properties and Uses y 5th Int. Conf. Natural Zeolites, FEZA, Ischia, Italia, 63.

Villavicencio, C., Molina, A. & Fernández, L. (2009). Estudio de la adsorción de aniones sobre zeolitas sintéticas modificadas con surfactantes, *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 24, N° 3, 95.

## W

Whyte T.E. & Dalla Betta R. A. (1982). *Catal. Rev. Sci. Eng.*, 24 (4) 567.

Wittman, F. (1983). *Fracture Mechanics of Concrete*. Cahpter 2. Ed Elsevier. Amsterdam, Holland.

## X

## Y

Yilmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B. & Uz, V. (2007). Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environment* Vol. 42(11). Pp 3808–3815.

## Z

Zerbino, R.L. (1998). Rol de la adherencia matriz agregado en el comportamiento del hormigón, tesis doctoral UNLP.

