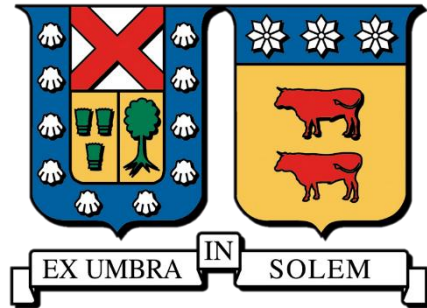


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



**CARACTERIZACIÓN DE LA DEFORMACIÓN POR RETRACCIÓN
EXPERIMENTADA EN HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS**

Memoria de Título presentada por
CAMILA BELÉN VARGAS LÓPEZ

Como requisito parcial para optar al Título de
CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor Guía
SERGIO ALEJANDRO CARMONA MALATESTA

Agosto, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Caracterización de la deformación por retracción experimentada en hormigones reforzados con fibras

Nombre del candidato(a): Camila Belén Vargas López

Carrera / Grado: Construcción Civil

Campus: Casa Central - Valparaíso Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Alejandro Carmona Malatesta, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

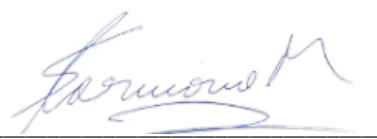
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 18-08-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18-08-2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá, por darme la oportunidad de acceder a una educación y apoyarme para poder dedicarme plenamente a mis estudios. Gracias por brindarme la posibilidad de vivir esta etapa sin tener que preocuparme de otras responsabilidades y, junto a la Mau, por ser mi apoyo incondicional desde el primer día que ingresé a la universidad, acompañándome en cada desafío, comprendiendo todas esas veces que la universidad ocupó gran parte de mi tiempo, cuidando de mí y estando siempre presentes a lo largo de este camino. Les estaré siempre agradecida. Los amo.

Benjamín, gracias por haber coincidido en esta etapa de nuestras vidas y por ser mi apoyo constante desde que pasaste de ser mi compañero de universidad a mi amigo y ahora mi pareja. Gracias por amarme, entenderme y cuidarme, pero, por sobre todo por ser quien, cuando he perdido la confianza en mí, me ha recordado las capacidades que tengo y lo valiosa que soy. Durante todo el proceso que significó realizar mi memoria estuve apoyándome, esperándome y acompañándome. Todo este proceso fue más llevadero porque siempre te tuve a mi lado. Te amo.

A mis compañeros de universidad, con quienes compartí estos cinco años de carrera y a quienes hoy puedo llamar amigos, quiero agradecerles por cada uno de los momentos vividos, por el apoyo constante y por la amistad que construimos a lo largo de este camino. Gracias por estar siempre presentes, porque sin ustedes estos años no habrían sido lo mismo.

A mis amigos del colegio, que a pesar de tomar caminos distintos siempre han estado presentes a lo largo de los años.

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. En especial, a mi profesor guía, Sergio Carmona, por confiar en mí para llevar a cabo esta memoria, por darme el tiempo de orientarme y por generar un ambiente de trabajo grato durante todo el proceso. A Marcela Fuentes, por estar siempre dispuesta a brindarme su ayuda; a los trabajadores de la planta hormigonera XTREM y a Don Alex, por su disposición y colaboración.

Finalmente, agradezco a todos los docentes que fueron parte de mi formación profesional, en especial al profesor Eduardo Sánchez, quien confió en mis capacidades y me dio el impulso para convertirme en ayudante.

Muchas gracias a cada uno de ustedes por ser parte de mi paso por la universidad.

DEDICATORIA

A mi Familia, en especial a mi mamá, a mi papá y a mi hermana, por ser mi apoyo constante, por enseñarme el valor de la perseverancia y por acompañarme incondicionalmente durante todos estos años de esfuerzo y aprendizaje. Los amo.

RESUMEN

Este estudio caracterizó experimentalmente la retracción por secado de hormigones reforzados con fibras y evaluó distintos modelos analíticos para predecir su evolución. El programa experimental consideró tres dosificaciones, una mezcla híbrida con fibras de acero y macrofibras sintéticas, y dos mezclas con distintos contenidos de macrofibras sintéticas. Las probetas fueron confeccionadas y ensayadas según la NCh 2221 (INN, 2010). El programa experimental se extendió durante aproximadamente 12 meses, registrándose periódicamente sus variaciones de longitud y pérdida de masa. La Serie N°1, correspondiente a la mezcla híbrida, presentó la menor retracción final y pérdida de masa, mientras que las series con macrofibras sintéticas alcanzaron mayores deformaciones. Las deformaciones registradas al término del período de monitoreo fueron de 698×10^{-6} [mm/mm] para la Serie N°1, 1102×10^{-6} [mm/mm] para la Serie N°2 y 1162×10^{-6} [mm/mm] para la Serie N°3. Sin embargo, debido a las diferencias entre las dosificaciones y a la ausencia de una mezcla de referencia sin fibras, estas variaciones no pudieron atribuirse exclusivamente al tipo o contenido de fibras. Además, se evaluaron los modelos ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* (2020), aplicando un factor de calibración que corrigió la magnitud de la retracción, pero no su evolución temporal. Después de la calibración, el modelo de Bažant et al. (2015) presentó la mejor representación de la evolución temporal entre las formulaciones evaluadas. No obstante, los factores obtenidos requieren validación antes de aplicarse a otros hormigones.

Palabras clave: Retracción por secado; Macrofibras sintéticas; Fibras de acero; Pérdida de masa; Modelos de predicción.

ABSTRACT

This study experimentally characterized the drying shrinkage of fiber-reinforced concrete and evaluated different analytical models to predict its evolution over time. The experimental program considered three mix designs: one hybrid mixture containing steel fibers and synthetic macrofibers, and two mixtures with different synthetic macrofiber contents. The specimens were prepared and tested in accordance with NCh 2221 (INN, 2010). The experimental program extended for approximately 12 months, during which changes in length and mass loss were periodically recorded. Series No. 1, corresponding to the hybrid mixture, exhibited the lowest final shrinkage and mass loss, whereas the series containing synthetic macrofibers reached higher strain values. The strains recorded at the end of the monitoring period were 698×10^{-6} [mm/mm] for Series N°. 1, 1102×10^{-6} [mm/mm] for Series N°. 2, and 1162×10^{-6} [mm/mm] for Series N°. 3. However, due to differences among the mix designs and the absence of a reference mixture without fibers, these variations could not be attributed exclusively to fiber type or content. In addition, the ACI (1997), Bažant et al. (2015), and *fib* (2020) models were evaluated by applying a calibration factor that corrected the magnitude of shrinkage but not its temporal evolution. After calibration, the model proposed by Bažant et al. (2015) provided the best representation of the temporal evolution among the formulations evaluated. Nevertheless, the calibration factors obtained require further validation before being applied to other concrete mixtures.

Keywords: Drying shrinkage; Synthetic macrofibers; Steel fibers; Mass loss; Prediction models.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	12
2.1 RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN	12
2.1.1 Tipos de Retracción	13
2.2 RETRACCIÓN POR SECADO	17
2.2.1 Factores que afectan la retracción por secado	18
2.3 MODELOS DE PREDICIÓN DE LA RETRACCIÓN POR SECADO	23
2.3.1 ACI (1997).....	24
2.3.2 Bažant et al. (2015).....	25
2.3.3 <i>fib</i> (2020)	27
2.4 FIBRAS	28
2.4.1 Tipos de fibras	29
2.5 FIBRAS DE ACERO.....	30
2.6 FIBRAS SINTÉTICAS	31
2.6.1 Macrofibras sintéticas.....	31
CAPÍTULO 3: INVESTIGACIÓN PROPUESTA.....	32
CAPÍTULO 4: DETALLES EXPERIMENTALES	33
4.1 CONFECCIÓN DE PROBETAS	33
4.1.1 Identificación de probetas.....	33
4.1.2 Dosificación de probetas	34
4.1.3 Preparación de moldajes de probetas.....	34
4.1.4 Hormigonado de probetas.....	35
4.1.5 Curado de probetas	38
4.2 MEDICIÓN Y REGISTRO DE DATOS	38
4.2.1 Lectura del retractómetro.....	40

4.2.2 Registro de masa de probetas	41
4.2.3 Cálculo de retracción.....	42
CAPÍTULO 5: RESULTADOS OBTENIDOS	43
5.1 PÉRDIDA DE MASA POR SECADO.....	43
5.1.1 Evolución de la masa de las probetas	43
5.1.2 Comparación de la pérdida de masa promedio entre series.....	44
5.1.3 Modelación de la pérdida de masa	46
5.2 RETRACCIÓN POR SECADO.....	48
5.2.1 Evolución de la retracción por secado de probetas.....	48
5.2.2 Comparación de retracción por secado promedio entre series.	49
5.3 COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y MODELOS DE PREDICCIÓN	51
5.3.1 Parámetros utilizados para la aplicación de los modelos	51
5.3.2 Modelos predictivos Serie N°1.....	52
5.3.3 Modelos predictivos Serie N°2.....	52
5.3.4 Modelos predictivos Serie N°3.....	53
5.4 CALIBRACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS	54
5.4.1 Calibración modelo ACI (1997)	55
5.4.2 Calibración modelo Bažant et al. (2015).....	56
5.4.3 Calibración modelo <i>fib</i> (2020).....	57
5.5 EVALUACIÓN DEL AJUSTE DE LOS MODELOS CALIBRADOS	58
5.5.1 Evaluación ajuste modelo ACI (1997)	58
5.5.2 Evaluación ajuste modelo Bažant et al. (2015)	59
5.5.3 Evaluación ajuste modelo <i>fib</i> (2020).....	60
CAPÍTULO 6: DISCUSIONES	61
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	64
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS	66
CAPÍTULO 9: ANEXOS	70
9.1 DATOS OBTENIDOS EN MEDICIÓN DE PROBETAS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Parámetros de retracción dependientes del tipo de cemento para Modelo B4 ..	27
Tabla N° 2 Factores de corrección de los parámetros de retracción según tipo de agregado para Modelo B4.	27
Tabla N° 3 Coeficientes α_i utilizados para clases de resistencia de cemento (fib, 2023)....	28
Tabla N° 4 Clasificación de fibras utilizadas en materiales cementicios.	29
Tabla N° 5 Identificación de probetas confeccionadas.	33
Tabla N° 6 Dosificación de hormigones confeccionados.	34
Tabla N° 7 Longitudes efectivas de medida (G) de las probetas confeccionadas.	35
Tabla N° 8 Pérdida de masa promedio registrada en edades representativas del periodo de estudio.....	45
Tabla N° 9 Parámetros obtenidos para los modelos de pérdida de masa.....	47
Tabla N° 10 Retracción por secado promedio registrada en edades representativas del periodo de estudio.....	50
Tabla N° 11 Parámetros utilizados para aplicación de modelos de predicción de retracción por secado.....	51
Tabla N° 12 Factores de calibración obtenidos para modelos predictivos	54
Tabla N° 13 Datos obtenidos de pérdida de masa y retracción por secado de probetas estudiadas.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Relación exudación, evaporación y riesgo de fisuración en estado plástico (Polpaico, 2018).....	14
Figura N° 2 Relación agua/cemento y su contribución en la retracción autógena (Tazawa y Miyazawa, 1995).....	15
Figura N° 3 Desarrollo temporal de la retracción autógena y por secado del hormigón (ACI, 2005).....	16
Figura N° 4 Cemento Portland en diferentes condiciones de exposición (Andrade y Sanjuán, 2021).....	17
Figura N° 5 Influencia del contenido volumétrico de los agregados en retracción por secado (Pickett, 1956).....	19
Figura N° 6 Influencia relación A/C y contenido de cemento en retracción por secado (Blanks et al. 1940).....	20
Figura N° 7 Resultados retracción a humedades relativas variables (Muller y Pristl, 1993).	21
Figura N° 8 Efecto curado en retracción por secado con diferentes relaciones A/C (Perenchio, 1997).....	22
Figura N° 9 Fibras de acero utilizadas en estudio.....	30
Figura N° 10 Macrofibras sintéticas utilizadas en estudio.	31
Figura N° 11 Moldaje de probetas acondicionadas con aceite mineral.....	35
Figura N° 12 (a) Descarga de hormigón; (b) asentamiento inicial sin fibras.	36
Figura N° 13 Incorporación de fibras a hormigón.....	36
Figura N° 14 (a) Compactación con varilla pisón; (b) compactación con mesa vibradora.	37
Figura N° 15 (a) Platachado de probetas; (b) marcación de probetas.	37
Figura N° 16 Probetas cubiertas con lámina plástica para curado inicial.	38
Figura N° 17. Barra patrón, utilizada en estudio.	39
Figura N° 18 Retractómetro, utilizado en estudio.....	39
Figura N° 19 Dial del retractómetro.....	40
Figura N° 20 Retractómetro con barra patrón.....	40
Figura N° 21 Retractómetro con probeta S1-P3.....	41
Figura N° 22 Balanza, utilizada en estudio.	41
Figura N° 23 Balanza con probeta S1-P3.....	42
Figura N° 24 Pérdida de masa experimentada por probetas de las series durante periodo de estudio.....	44
Figura N° 25 Comparación de pérdida de masa promedio de las series durante periodo de estudio.....	45
Figura N° 26 (a) Curvas experimentales promedio; (b) Modelos ajustados de pérdida de masa.....	46

Figura N° 27 Retracción por secado experimentada por probetas de las series durante periodo de estudio.....	48
Figura N° 28 Comparación de retracción por secado promedio de las series durante periodo de estudio.....	49
Figura N° 29 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°1.	52
Figura N° 30 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°2.	53
Figura N° 31 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°3.	53
Figura N° 32 Calibración del modelo ACI (1997) para las tres series estudiadas.	55
Figura N° 33 Calibración del modelo Bažant et al. (2015) para las tres series estudiadas.	56
Figura N° 34 Calibración del modelo fib (2020) para las tres series estudiadas.....	57
Figura N° 35 Diagramas de dispersión del modelo ACI (1997) para las tres series estudiadas.....	59
Figura N° 36 Diagramas de dispersión del modelo Bažant et al. (2015) para las tres series estudiadas.....	60
Figura N° 37 Diagramas de dispersión del modelo fib (2020) para las tres series estudiadas.....	61

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La retracción por secado es una deformación dependiente del tiempo que experimenta el hormigón, provocada por la pérdida del agua asociada a la microestructura de la pasta de cemento hidratado (ACI, 2005). Debido a la relevancia que tiene este fenómeno en la durabilidad de las estructuras de hormigón, ha sido ampliamente estudiado y se han propuesto diferentes modelos para predecir la deformación que experimentaría una estructura en el tiempo, siendo los más conocidos el modelo del ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* Model Code 2020 (*fib*, 2023). Sin embargo, estos modelos están fuertemente influidos por el tipo de cemento utilizado en la elaboración del hormigón. Videla et al. (2001) establecieron que los cementos Portland Puzolánicos de uso común en Chile experimentan prácticamente el doble de la deformación por retracción que se puede predecir usando esos modelos, por lo cual se requiere de una adecuada calibración para su uso en obras que se ejecutan en el país.

Producto de lo anterior en la UTFSM se han realizado investigaciones en las que se han cuantificado la deformación por retracción que experimentan hormigones para pavimentos (Norambuena, 2000), autocompactantes (Pezo, 2002) y modificados con polímeros (Grez, 2004), evidenciando la diferencia que existe entre los valores medidos experimentalmente, usando el procedimiento establecido en la norma NCh 2221 (INN, 2010), pero bajo diferentes condiciones de curado y exposición (en cámara húmeda, sumergido en piscina y al aire), y los valores estimados mediante los modelos antes señalados, los que contemplan condiciones más severas de retracción en cámara de secado a 40% de humedad relativa. Sin embargo, investigaciones de la deformación por retracción que experimentan hormigones reforzados con fibras, son más limitadas, lo que motiva esta memoria.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar experimentalmente la deformación por retracción que experimentan hormigones reforzados con fibras y proponer factores de calibración para ajustar los modelos propuestos en la literatura especializada a los resultados experimentales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Medir la deformación por retracción que experimentan hormigones reforzados con fibras siguiendo procedimientos normalizados.
- Comparar los resultados experimentales con las estimaciones de deformación por retracción de los modelos propuestos por el ACI (1997), Bazant et al. (2015) y *fib* (2020).
- Proponer factores de calibración de los modelos para ajustarlos a la deformación por retracción determinada experimentalmente.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

La retracción del hormigón corresponde a una deformación dependiente del tiempo que se manifiesta como una disminución de volumen del material en ausencia de cargas externas. Esta deformación es medida en probetas de hormigón sin carga y no considera cambios dimensionales asociados a variaciones térmicas, aunque sí depende de las condiciones ambientales y de la geometría y dimensiones de la probeta ensayada (ACI, 2005).

Las deformaciones por retracción generalmente son determinadas mediante probetas acompañantes confeccionadas a partir del mismo lote de hormigón que las probetas sometidas a carga, manteniéndose ambas bajo iguales condiciones ambientales de almacenamiento y exposición. Los valores de retracción se expresan como deformaciones adimensionales, correspondientes al cambio de longitud respecto de una longitud inicial de referencia, pudiendo representarse en porcentaje, mm/mm o mediante microdeformaciones, equivalentes a la deformación multiplicada por 10^{-6} (ACI, 2005).

En términos generales los valores de retracción a largo plazo del hormigón suelen variar entre 200 y 800×10^{-6} [mm/mm], mientras que en morteros pueden alcanzar valores entre 800 y 2000×10^{-6} [mm/mm]. En este caso de la pasta de cemento, debido a la ausencia de áridos que restrinjan las deformaciones, la retracción puede presentar magnitudes considerablemente mayores, típicamente entre 2000 y 6000×10^{-6} [mm/mm] (ACI, 2005).

La retracción se origina principalmente por la pérdida de humedad y por procesos fisicoquímicos asociados a la hidratación del cemento, generando variaciones volumétricas desde edades tempranas del hormigón. Cuando estas deformaciones son restringidas, pueden inducirse tensiones internas capaces de generar fisuración, afectando el comportamiento y durabilidad del material (Neville, 1996). Asimismo, la retracción constituye uno de los principales mecanismos responsables de la fisuración temprana del hormigón, favoreciendo el ingreso de agua y agentes agresivos hacia el interior de la matriz cementicia y acelerando procesos de deterioro (Mazzoli et al., 2015).

La retracción no corresponde a un fenómeno único, sino a la combinación de distintos mecanismos que se desarrollan en diferentes etapas de la vida del hormigón. Entre los principales tipos se encuentran la retracción plástica, autógena, por secado y por carbonatación, cuya magnitud depende tanto de las propiedades de la mezcla como de las condiciones ambientales de exposición (Markovski et al., 2012).

2.1.1 Tipos de Retracción

- **Retracción Plástica**

La retracción plástica corresponde a la disminución de volumen que experimenta el hormigón durante las primeras horas posteriores a su colocación, mientras el material aún conserva un comportamiento plástico. En este contexto, el ACI 116R la define como la “retracción que ocurre antes de que la pasta de cemento, mortero, lechada o hormigón fragüe” (ACI, 2005, p.209.1R-3). Este fenómeno se desarrolla cuando el hormigón aún no ha adquirido suficiente resistencia a tracción para soportar las deformaciones internas generadas por la pérdida de humedad superficial.

La retracción plástica se origina principalmente cuando la velocidad de evaporación del agua superficial supera la velocidad de exudación del hormigón fresco, produciéndose un déficit de humedad en la superficie y la consecuente contracción de la pasta de cemento (Neville, 1996; O’Moore et al., 2010). Como resultado, se generan tensiones de tracción que pueden provocar fisuración temprana como se grafica en la Figura N°1, especialmente en elementos con elevadas relaciones superficies/volumen, tales como pavimentos y losas (Cabrera, 1992; Mora-Raucha et al., 2009).

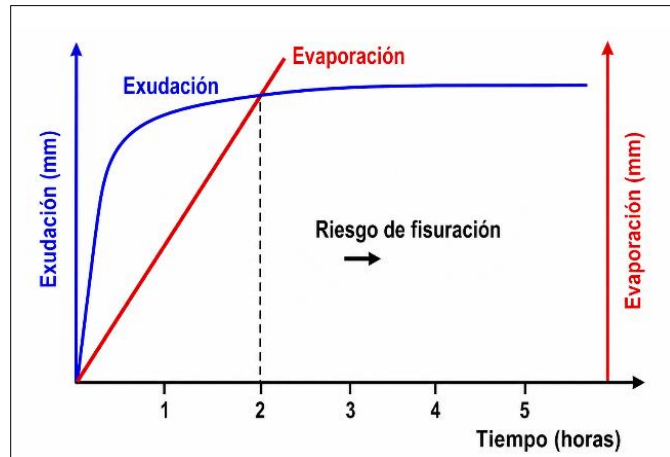


Figura N° 1 Relación exudación, evaporación y riesgo de fisuración en estado plástico (Polpaico, 2018).

La magnitud de este fenómeno depende principalmente de factores ambientales y de las propiedades de la mezcla. Variables como la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento influyen directamente en la tasa de evaporación superficial, incrementando el riesgo de fisuración bajo condiciones de secado acelerado. Asimismo, hormigones con baja relación agua/cemento o menor capacidad de exudación presentan una mayor susceptibilidad al desarrollo de retracción plástica (Neville, 1996; Mora-Raucha et al., 2009).

- **Retracción Autógena**

La retracción autógena corresponde a la disminución de volumen que experimenta el hormigón producto de las reacciones de hidratación que ocurren en el interior de la matriz cementicia, desarrollándose incluso cuando el material se encuentra sellado y sin intercambio de humedad con el ambiente exterior (ACI, 2005). Este fenómeno, también denominado en algunos casos como retracción química o retracción básica, se encuentra directamente asociado al consumo progresivo de agua durante la hidratación del cemento y a la consecuente autodesecación interna de la pasta de cemento.

El mecanismo principal asociado a este tipo de retracción corresponde a la disminución de humedad interna generada por el consumo de agua presente en los poros capilares durante la hidratación del cemento, produciéndose tensiones capilares que inducen la contracción de la pasta cementicia aun en ausencia de evaporación hacia el exterior (Neville, 1996). Asimismo, la retracción química asociada a la formación de productos de hidratación contribuye a la reducción del volumen absoluto del sistema cemento-agua (Markovski et al., 2012).

La magnitud de la retracción autógena depende principalmente de la relación agua/cemento, el tipo y finura del cemento, el contenido de materiales cementicios y las

condiciones de curado. Este fenómeno adquiere especial relevancia en hormigones de alta resistencia y alto desempeño elaborados con bajas relaciones agua/cemento, donde la disponibilidad de agua libre disminuye considerablemente, incrementando las deformaciones autógenas y su contribución a la retracción total del hormigón, como se puede ver representado en la Figura N°2 (ACI, 2005; Tazawa y Miyazawa, 1995).

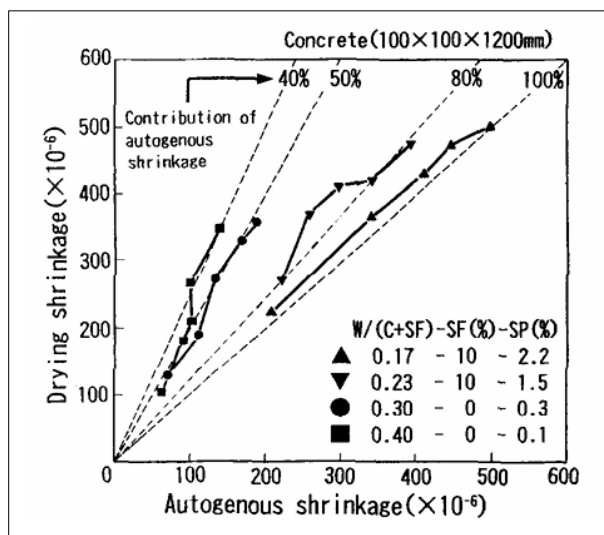


Figura N° 2 Relación agua/cemento y su contribución en la retracción autógena (Tazawa y Miyazawa, 1995).

• Retracción por Secado

La retracción por secado corresponde a la disminución de volumen que experimenta el hormigón endurecido producto de la pérdida progresiva de humedad hacia el ambiente. Este fenómeno se desarrolla cuando el material es expuesto al secado, produciéndose el movimiento de agua desde el interior de la matriz cementicia hacia el exterior (ACI, 2005). Asimismo, se define como la deformación lineal dependiente del tiempo, medida a temperatura constante en una probeta sin carga sometida a secado, correspondiendo a la reducción de volumen causada por la pérdida de agua (ACI, 2001).

La retracción por secado se origina principalmente por la evaporación del agua contenida en los poros capilares de la pasta cementicia endurecida. A medida que el agua abandona la microestructura del hormigón, se generan tensiones capilares internas que inducen la contracción progresiva de la pasta de cemento, siendo este el principal mecanismo responsable de la deformación por retracción (Neville, 1996). Debido a ello, este fenómeno se encuentra estrechamente relacionado con la difusión de humedad desde el interior del hormigón hacia el exterior (Sakata, 1983).

En hormigones de resistencia normal, generalmente se considera que la mayor parte de la retracción total corresponde a este tipo de retracción como se aprecia en la Figura N°3

despreciándose en muchos casos la contribución de la retracción autógena. Asimismo, la retracción por secado corresponde a un fenómeno de larga duración, cuyo desarrollo puede extenderse durante meses o incluso años, pudiendo generar fisuración cuando las deformaciones producidas son restringidas, afectando la durabilidad y el comportamiento del hormigón (ACI, 2001; 2005).

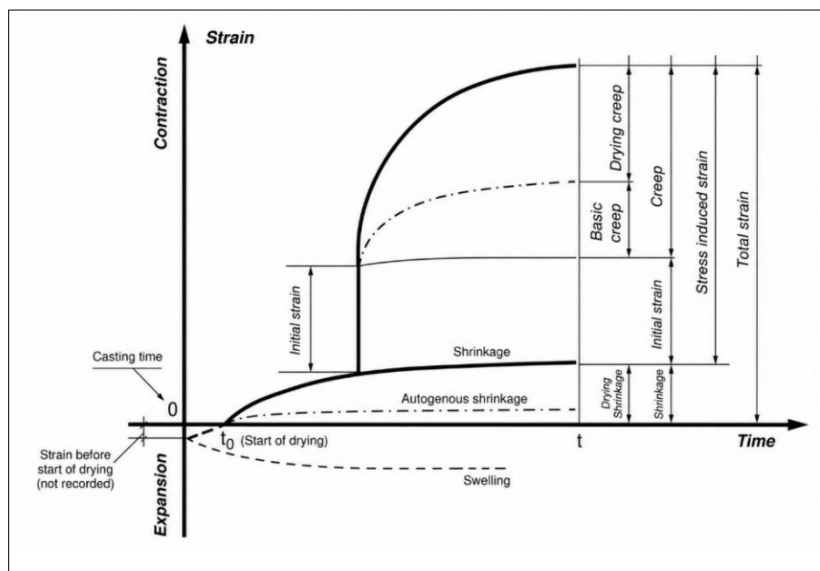


Figura N° 3 Desarrollo temporal de la retracción autógena y por secado del hormigón (ACI, 2005).

• **Retracción por Carbonatación**

La retracción por carbonatación corresponde a la disminución de volumen que experimenta el hormigón endurecido como consecuencia de las reacciones químicas entre los compuestos hidratados del cemento y el dióxido de carbono presente en la atmósfera. Este fenómeno es provocado principalmente por la reacción del hidróxido de calcio contenido en la matriz cementicia con el CO_2 atmosférico, generándose carbonato de calcio como producto de reacción (ACI, 2005). Asimismo, la retracción por carbonatación involucra modificaciones químicas en los productos de hidratación del cemento y la pérdida de agua absorbida en los poros capilares, contribuyendo a la contracción volumétrica del material (ACI, 2001).

El proceso de carbonatación ocurre mediante la difusión del dióxido de carbono a través de la red porosa del hormigón, dependiendo principalmente de factores como la humedad relativa, la porosidad, la relación agua/cemento y las condiciones de exposición ambiental (Andrade y Sanjuán, 2021), lo cual se representa en la Figura N°4. Debido a que la penetración del CO_2 suele limitarse a zonas superficiales en hormigones densos y de baja permeabilidad, este tipo de retracción generalmente posee una incidencia menor en la retracción total de estructuras convencionales.

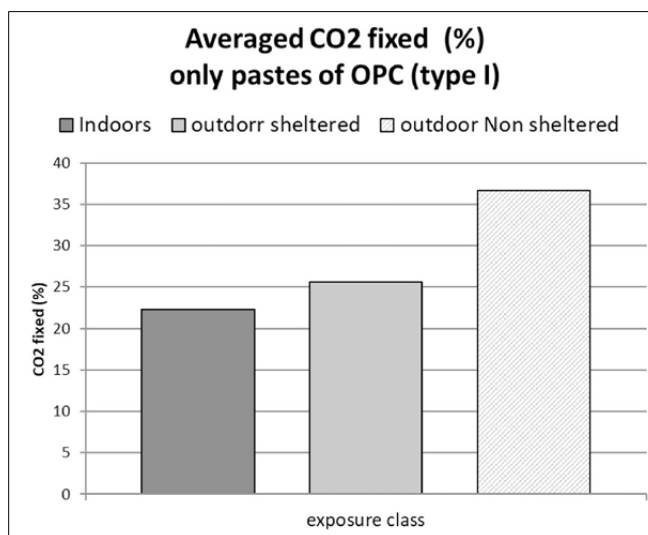


Figura N° 4 Cemento Portland en diferentes condiciones de exposición (Andrade y Sanjuán, 2021).

Sin embargo, en elementos delgados, probetas de laboratorio o hormigones de elevada porosidad sometidos a exposición prolongada al secado, la retracción por carbonatación puede adquirir mayor relevancia debido a la mayor relación superficie/volumen y a la facilidad de ingreso del dióxido de carbono hacia el interior del material (Persson, 2002).

2.2 RETRACCIÓN POR SECADO

La retracción por secado corresponde a un fenómeno dependiente del tiempo cuyo desarrollo está controlado por la velocidad de pérdida de humedad y por las características de transporte interno presentes en la microestructura del hormigón. Debido a que el secado ocurre de manera progresiva y no uniforme, se generan gradientes internos de humedad entre las zonas superficiales y el interior del elemento, provocando diferencias de deformación dentro de la masa de hormigón (Sakata, 1983; Vinkler y Vitek, 2016). Estas deformaciones diferenciales adquieren especial relevancia cuando el material se encuentra restringido, condición bajo la cual pueden originarse tensiones internas de tracción y posterior fisuración.

Cuando las deformaciones generadas son parcial o totalmente restringidas por las condiciones de apoyo, la presencia de armaduras o diferencias internas de deformación, el hormigón desarrolla tensiones internas de tracción que pueden superar su limitada resistencia a tracción, favoreciendo la aparición de fisuras (ACI, 2001; Benboudjema et al., 2005). Este fenómeno resulta particularmente crítico en elementos con elevada relación superficie/volumen o expuestos a condiciones ambientales severas de secado. Diversos estudios señalan además que la retracción restringida constituye una de las principales causas de fisuración en estructuras de hormigón endurecido, afectando su comportamiento y durabilidad.

Desde el punto de vista estructural, la retracción por secado posee gran relevancia debido a que corresponde a la principal componente de la retracción total en hormigones convencionales, siendo considerablemente más significativa que otros tipos de retracción, como la autógena o la asociada a carbonatación (ACI, 2005). Además, se trata de un fenómeno de larga duración, cuyo desarrollo puede extenderse durante meses o incluso años dependiendo de las dimensiones del elemento y de las condiciones ambientales de exposición. La fisuración asociada a este fenómeno puede generar deformaciones excesivas, pérdida de rigidez y facilitar el ingreso de agentes agresivos responsables de procesos de deterioro y corrosión en estructuras de hormigón armado (ACI, 2001).

La magnitud y velocidad de desarrollo de la retracción por secado dependen de numerosos factores asociados tanto a la composición de la mezcla como a las condiciones ambientales y geométricas del elemento. El ACI (2005) señala que entre los principales factores que afectan este fenómeno se encuentran la relación agua/cemento, el contenido de agua y cemento, las propiedades y proporción de los agregados, las características de la pasta cementicia, el contenido de aire y el uso de aditivos. Asimismo, el ACI (2001) indica que parámetros como la humedad relativa del ambiente, la temperatura, la geometría del elemento y la relación entre superficie expuesta y volumen influyen directamente en el desarrollo de las deformaciones por retracción. Diversas investigaciones experimentales han demostrado además que la microestructura de la pasta cementicia, la porosidad capilar y la calidad de la zona de transición entre pasta y agregados poseen una influencia significativa sobre la evolución de este fenómeno (Ramírez et al., 2019; Fu et al., 2022).

En general, mezclas con mayores relaciones agua/cemento y mayor contenido de pasta cementicia tienden a desarrollar mayores deformaciones por retracción debido al incremento de la porosidad capilar y de la cantidad de agua evaporable presente en la matriz cementicia (Fu et al., 2022). Por el contrario, agregados de mayor rigidez y menor porosidad contribuyen a restringir las deformaciones de la pasta y disminuir la magnitud de la retracción total del hormigón (Lyse, 1959; Ramírez et al., 2019). Del mismo modo, condiciones ambientales severas de secado, caracterizadas por elevadas temperaturas y bajas humedades relativas, favorecen una mayor velocidad de evaporación y, en consecuencia, mayores deformaciones de retracción (Al-Saleh y Al-Zaid, 2006; Wang et al., 2024).

2.2.1 Factores que afectan la retracción por secado

- **Propiedades de la mezcla**

- **Agregados:** Corresponden a uno de los factores más importantes que afectan la retracción por secado del hormigón, debido a que actúan como elementos de restricción frente a las deformaciones de la pasta cementicia. A medida que aumenta el volumen total de agregado en la mezcla, disminuye el volumen de pasta susceptible a deformarse, reduciéndose la magnitud de la retracción total del hormigón. Pickett (1956), citado por el

ACI (2005), estableció que la retracción del hormigón se relaciona directamente con la retracción de la pasta de cemento y con la fracción volumétrica de agregado presente en la mezcla, Figura N°5.

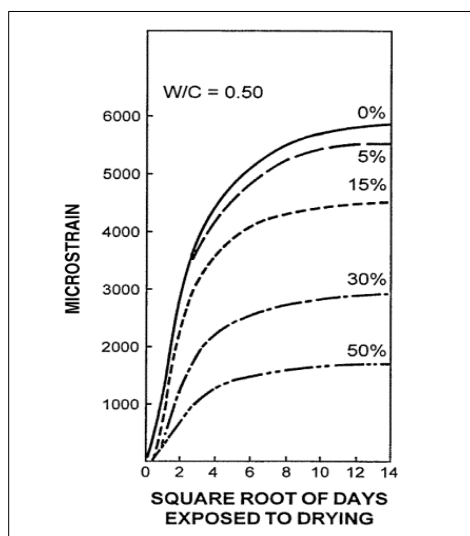


Figura N° 5 Influencia del contenido volumétrico de los agregados en retracción por secado (Pickett, 1956).

El tamaño máximo y la gradación de los agregados influyen indirectamente en la retracción por secado al modificar el contenido de pasta requerido en la mezcla. En general, agregados de mayor tamaño permiten disminuir el volumen de pasta cementicia, reduciendo las deformaciones por retracción. Asimismo, el uso de agregados redondeados puede contribuir a disminuir el contenido de agua y pasta necesario para alcanzar una determinada trabajabilidad, reduciendo también la retracción del hormigón. (ACI, 2005).

A su vez las propiedades elásticas de los agregados poseen una influencia significativa sobre la magnitud de la retracción. Hormigones fabricados con agregados de alto módulo de elasticidad presentan menores deformaciones por secado debido a la mayor capacidad de restricción ejercida sobre la pasta cementicia. Por el contrario, agregados con menor rigidez permiten mayores deformaciones de la matriz cementicia y, en consecuencia, mayores valores de retracción. Asimismo, la capacidad de restricción ejercida por los agregados depende de sus propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad y porosidad, además de la zona de transición interfacial entre pasta y agregado (Ramírez et al., 2019).

La presencia de minerales arcillosos en los agregados puede aumentar considerablemente la retracción por secado a la elevada demanda de agua asociada a este tipo de materiales. Del mismo modo, los agregados livianos generalmente producen mayores deformaciones de retracción en comparación con agregados convencionales, aunque mediante una adecuada selección de materiales es posible obtener hormigones livianos con niveles moderados de retracción (ACI, 2005).

- **Relación A/C y contenido de la pasta:** El contenido total de agua corresponde a uno de los parámetros más influyentes en la retracción por secado, debido a que una mayor cantidad de agua genera una mayor porosidad capilar y un incremento del volumen de agua evaporable presente en la matriz cementicia. En consecuencia, mezclas con elevadas relaciones agua/cemento tienden a desarrollar mayores deformaciones de retracción. Esto se debe a que favorecen el desarrollo de una red capilar más extensa y conectada, facilitando el movimiento y difusión de humedad durante el secado (Neville, 1996; Fu et al., 2022).

Asimismo, el aumento del contenido de cemento y del asentamiento del hormigón, especialmente cuando este se obtiene mediante la incorporación de agua adicional, incrementa el volumen de pasta y disminuye proporcionalmente el contenido de agregado, favoreciendo el desarrollo de mayores deformaciones por secado. Como se muestra en la Figura N°6 hormigones con elevados contenidos de pasta cementicia presentan generalmente mayores magnitudes de retracción (ACI, 2005).

Por otra parte, el contenido de aire posee una influencia relativamente menor sobre la retracción por secado. Según el ACI (2005), cuando el contenido total de aire del hormigón es inferior aproximadamente al 8% generalmente no se observan efectos significativos sobre la magnitud de la retracción.

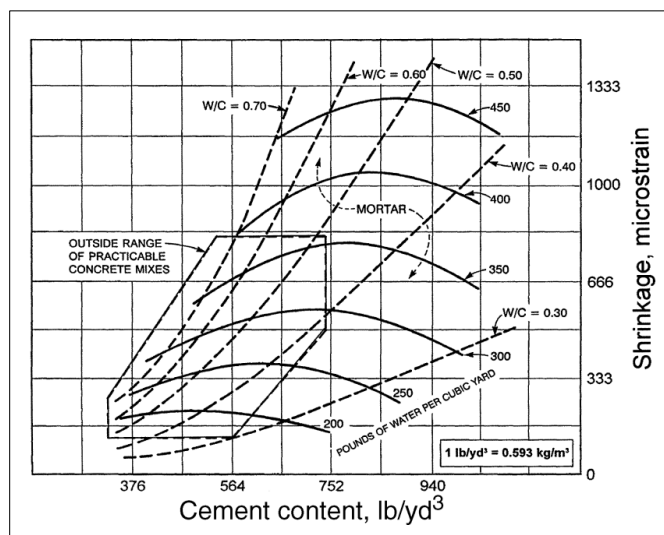


Figura N° 6 Influencia relación A/C y contenido de cemento en retracción por secado (Blanks et al. 1940).

- **Aditivos y adiciones minerales:** Los aditivos químicos y los materiales cementantes suplementarios pueden modificar significativamente la retracción por secado al alterar la microestructura y la porosidad de la pasta cementicia. El efecto de estos materiales se encuentra estrechamente relacionado con las modificaciones que producen en la estructura capilar del hormigón y en las tensiones capilares desarrolladas durante el secado (Fu et al., 2022; Xue et al., 2022).

El uso de reductores de agua y superplastificantes puede incrementar las deformaciones de retracción dependiendo de la composición de la mezcla, mientras que materiales como la escoria o la ceniza volante pueden aumentar la retracción al incrementarse su porcentaje de reemplazo. En el caso del humo de sílice, su efecto depende de la dosificación utilizada. Además, algunos aditivos han sido desarrollados específicamente para disminuir las deformaciones por retracción mediante la reducción de tensiones capilares internas (ACI, 2005).

- **Efectos del ambiente**

- **Humedad relativa:** La humedad relativa corresponde a uno de los factores ambientales más influyentes sobre la retracción por secado. Ambientes con bajas humedades relativas favorecen una mayor evaporación del agua contenida del hormigón, incrementando la velocidad y magnitud de la retracción. La disminución de la humedad relativa ambiente incrementa los gradientes de humedad entre la superficie y el interior del hormigón, acelerando el proceso de difusión y pérdida de agua desde la microestructura cementicia hacia el ambiente (Sakata, 1983; Vinkler y Vítek, 2016).

Por el contrario, hormigones almacenados en ambientes saturados o sumergidos en agua tienden a experimentar expansiones debido a la absorción de humedad (ACI, 2005).

Investigaciones desarrolladas por Muller y Pristl (1993) demostraron que probetas sometidas a variaciones cíclicas de humedad relativa presentaron menores deformaciones de retracción que aquellas almacenadas bajo humedad relativa constante, resultados de investigación se presentan en Figura N°7 (ACI, 2005).

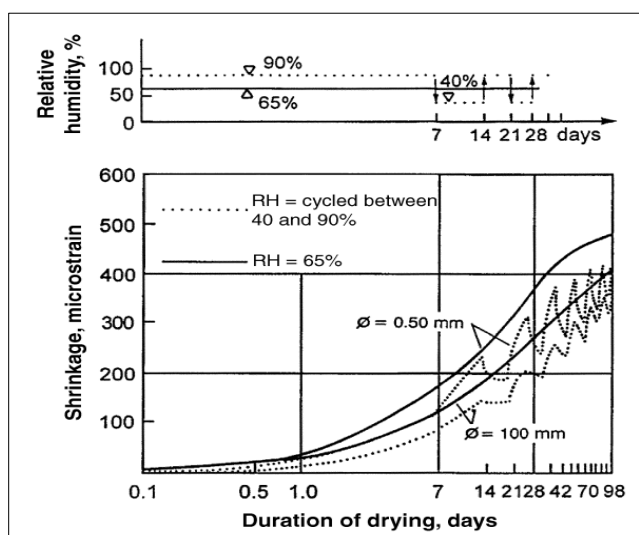


Figura N° 7 Resultados retracción a humedades relativas variables (Muller y Pristl, 1993).

– **Temperatura:** La temperatura influye sobre el desarrollo de la retracción por secado al acelerar el proceso de evaporación y pérdida de humedad desde el interior del hormigón hacia el ambiente. Sin embargo, el efecto de la temperatura sobre la magnitud final de la retracción suele ser menor que el asociado a variaciones de humedad relativa. Aumentos de temperatura generan incrementos moderados tanto en la velocidad de desarrollo como en la magnitud final de la retracción por secado (ACI, 2005).

- **Efectos del diseño y la construcción**

– **Curado:** Las condiciones y duración del curado influyen directamente sobre la magnitud de la retracción por secado como se presenta en la Figura N°8. Períodos prolongados de curado húmedo permiten reducir las deformaciones debido a una hidratación más completa de la pasta cementicia y a una disminución de la velocidad inicial de secado. Un adecuado curado puede disminuir la retracción entre un 10% y un 20%, dependiendo de la relación agua/cemento de la mezcla (ACI, 2005).

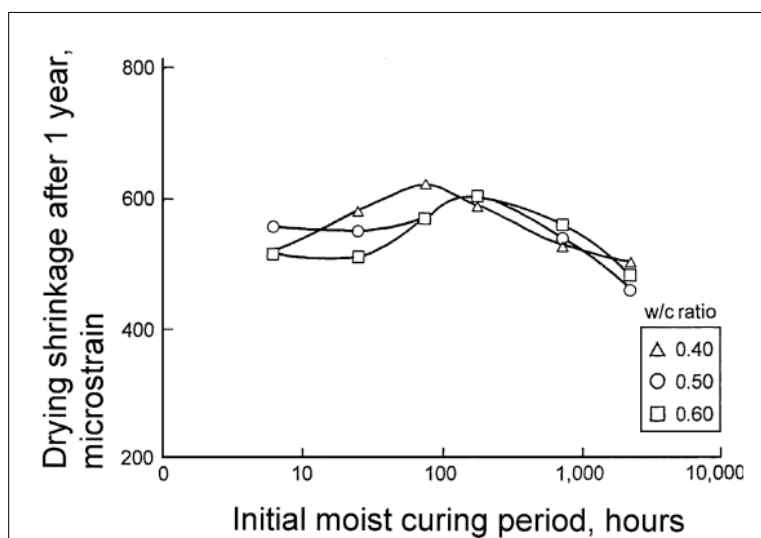


Figura N° 8 Efecto curado en retracción por secado con diferentes relaciones A/C (Perenchio, 1997).

El curado térmico o mediante vapor también puede modificar el desarrollo de la retracción por secado. Klieger (1960), citado por ACI (2005), reportó que este tipo de curado puede reducir significativamente la magnitud de la retracción, alcanzando disminuciones de hasta un 30%.

– **Tamaño y forma de la probeta:** El tamaño y geometría del elemento poseen una influencia importante sobre la velocidad y magnitud de la retracción. Elementos con elevada relación superficie/volumen presentan mayores velocidades de secado y mayores gradientes internos de humedad, mientras que elementos de gran espesor desarrollan el fenómeno de

manera más lenta. Debido a que el proceso de secado ocurre desde la superficie hacia el interior del elemento, se desarrollan gradientes internos de humedad y deformación, generándose mayores tensiones en elementos delgados o con elevada relación superficie/volumen (Sakata, 1983).

Asimismo, la geometría del elemento influye sobre la distribución de tensiones internas generadas por la retracción no uniforme a través de la sección transversal del hormigón (ACI, 2005).

2.3 MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA RETRACCIÓN POR SECADO

La retracción por secado constituye una de las principales deformaciones dependientes del tiempo que experimenta el hormigón. La complejidad de los mecanismos involucrados en su desarrollo y la influencia que ejercen numerosos factores asociados al material y al entorno han motivado la realización de numerosas investigaciones orientadas a comprender este fenómeno. Como resultado, se han propuesto diversos modelos de predicción que permiten estimar la evolución de la retracción a lo largo del tiempo.

Entre los principales modelos desarrollados para la predicción de la retracción del hormigón se encuentran:

- Modelo ACI 209-92 (1997).
- Modelo GL2000 (2000), desarrollado por Gardner y Lockman.
- Modelo B4 (2015), desarrollado por Bažant, Hubler y Wedner.
- Eurocódigo 2 (2023).
- *fib* Model Code 2020 (*fib*, 2023).

Los modelos de predicción consideran diversos parámetros relacionados con las propiedades del hormigón y las condiciones de exposición, entre los que destacan la humedad relativa, las dimensiones del elemento, la edad de inicio del secado, la resistencia a compresión y la composición de la mezcla. Dependiendo de su formulación, estos modelos pueden basarse en relaciones empíricas obtenidas a partir de resultados experimentales o en formulaciones analíticas que buscan representar los mecanismos físicos asociados al fenómeno de la retracción.

Para la presente investigación se emplearán los modelos ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* (2020). La selección de estos modelos responde a su amplia utilización en la literatura especializada y a que representan distintos enfoques para la predicción de la retracción del hormigón.

El modelo ACI (1997) corresponde a expresiones simplificadas que representan datos promedio de laboratorio obtenidos bajo condiciones ambientales y de carga constantes. El

enfoque de diseño presentado para predecir fluencia y retracción considera condiciones estándar y factores de corrección para condiciones distintas al estándar. Por su parte, el modelo B4 desarrollado por Bažant et al. (2015) se basa en el modelo B3, teóricamente fundamentado y recomendado por RILEM desde 1996, donde se ha obtenido una predicción más precisa del comportamiento a largo plazo, distinguiendo entre la retracción autógena y la retracción por secado y considerando factores como resistencias, tipos de agregados y humedad relativa del ambiente. Finalmente, el modelo *fib* (2020) considera por separado la retracción autógena y por secado, incorporando la influencia de la resistencia del hormigón, la humedad relativa, el tamaño del elemento y el tipo de cemento para estimar las deformaciones dependientes del tiempo en hormigones convencionales y de alta resistencia.

2.3.1 ACI (1997)

El modelo de retracción por secado $(\varepsilon_{sh})_t$ se define por medio de la Ec. (1) la cual corresponde para condición de curado húmedo.

$$(\varepsilon_{sh})_t = \left[\frac{(t-t_0)}{35+(t-t_0)} \right] \times \gamma_{sh} \times (\varepsilon_{sh})_u \quad (1)$$

Donde:

- $(\varepsilon_{sh})_t$ = Retracción en el día t ;
- t = Edad del hormigón, expresado en días;
- t_0 = Tiempo de curado húmedo, expresado en días;
- γ_{sh} = Factor de corrección de retracción para condiciones no estándar;
- $(\varepsilon_{sh})_u$ = Valor último de retracción, 780×10^{-6} [mm/mm].

El factor de corrección γ_{sh} se expresa mediante la Ec. (2) la cual se descompone en valores basados en estudios de Branson and Christianson (1971), los cuales se obtienen a partir de las Ec. (3) a (8).

$$\gamma_{sh} = \gamma_{\lambda} \times \gamma_{vs} \times \gamma_s \times \gamma_{\psi} \times \gamma_c \times \gamma_{\alpha} \quad (2)$$

Donde:

γ_{λ} = Factor de corrección por humedad relativa, donde λ se expresa en [%];

$$\gamma_{\lambda} = \begin{cases} 1, & \text{si } \lambda < 40\% \\ 1,4 - 0,010\lambda, & \text{si } 40\% \leq \lambda \leq 80\% \\ 3,0 - 0,030\lambda, & \text{si } 80\% > \lambda \leq 100\% \end{cases} \quad (3)$$

γ_{vs} = Factor de corrección por relación volumen/superficie, en donde v/s se expresa en [mm];

$$\gamma_{vs} = 1,2^{-0,00472 v/s} \quad (4)$$

γ_s = Factor de corrección por asentamiento, donde s se expresa en [mm];

$$\gamma_s = 0,89 + 0,00161s \quad (5)$$

γ_ψ = Factor de corrección por porcentaje de árido fino, donde ψ se expresa en [%];

$$\gamma_\psi = \begin{cases} 0,30 + 0,014\psi, & \text{si } \psi \leq 50\% \\ 0,90 + 0,002\psi, & \text{si } \psi > 50\% \end{cases} \quad (6)$$

γ_c = Factor de corrección por contenido de cemento, donde c se expresa en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$$\gamma_c = 0,75 + 0,00061c \quad (7)$$

γ_α = Factor de corrección por contenido de aire, donde α se expresa [%].

$$\gamma_\alpha = 0,95 + 0,008\alpha \quad (8)$$

2.3.2 Bažant et al. (2015)

La retracción por secado Ec. (9), representada por $\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ se determina en el Modelo B4 mediante los factores presentados en las Ec. (10) a (19).

$$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) \times k_h \times S(\tilde{t}) \quad (9)$$

Donde:

$S(\tilde{t})$ = Curva de tiempo;

$$S(\tilde{t}) = \tanh \sqrt{\frac{\tilde{t}}{\tau_{sh}}} \quad (10)$$

$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0)$ = Corrección de retracción por efecto del envejecimiento sobre la rigidez elástica;

$$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) = \varepsilon_0 k_{\varepsilon a} \frac{E(7\beta_{Th} + 600\beta_{Ts})}{E(\tilde{t}_0 + \tau_{sh}\beta_{Ts})} \quad (11)$$

k_h = Dependencia de humedad;

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3, & \text{si } h \leq 0,98 \\ 12,94(1 - h) - 0,2, & \text{si } 0,98 \leq h \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

$\tilde{t}_0$ = Edad equivalente al inicio del secado, expresado en días;

$$\tilde{t}_0 = t_0 \beta_{Th}, \quad \beta_{Th} = \begin{cases} \exp \left[\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur} + 273} \right) \right], & \text{si } T_{cur} \in [20^\circ C, 30^\circ] \\ 1, & \text{si } T_{cur} = 20[^\circ C] \end{cases} \quad (13)$$

$\tilde{t}$ = Tiempo equivalente de secado, expresado en días;

$$\tilde{t} = (t - t_0)\beta_{Ts}, \quad \beta_{Ts} = \begin{cases} \exp\left[\frac{U_s}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)\right], & \text{si } 20[^\circ\text{C}] \neq T \\ 1, & \text{si } 20[^\circ\text{C}] = T \end{cases} \quad (14)$$

ε_0 = Retracción final por secado;

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\varepsilon a}} \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{p_{\varepsilon w}} \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\varepsilon c}} \quad (15)$$

τ_{sh} = Tiempo medio de retracción por secado, expresado en días;

$$\tau_{sh} = \tau_0 k_{\tau a} \left(k_s \frac{D}{1mm}\right)^2; \quad \text{donde } D = \frac{2V}{S} \quad (16)$$

$$\tau_0 = \tau_{cem} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\tau a}} \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{p_{\tau w}} \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\tau c}} \quad (17)$$

$E(t)$ = Módulo de elasticidad a la edad t ;

$$E(t) = E_{28} \sqrt{\frac{t}{4 + \left(\frac{6}{7}\right)t}}; \quad \text{donde } E_{28} = 4734 \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \quad (18)$$

- t = Edad del hormigón, expresado en días;
- t_0 = Edad al inicio de secado, expresado en días;
- h = Humedad relativa del ambiente, expresada en decimal;
- U_h, U_s = Energía de activación para hidratación (h) y retracción por secado (s);
- R = Constante de gas, sin información $\frac{U_h}{R} = \frac{U_s}{R} = 4000[K]$;
- T_{cur} = Temperatura del ambiente durante el curado, expresado en $[^\circ\text{C}]$;
- T = Temperatura del ambiente, expresado en $[^\circ\text{C}]$;
- a/c = Relación árido/cemento;
- w/c = Relación agua/cemento;
- c = Contenido de cemento, expresado en $[\text{kg}/\text{m}^3]$;
- ρ = Densidad del hormigón, $2350 [\text{kg}/\text{m}^3]$;
- f_{cm} = Resistencia media a la compresión a la edad de 28 días, expresada en $[\text{MPa}]$;
- $\tau_{cem}, p_{\tau a}, p_{\tau w}, p_{\tau c}, \varepsilon_{cem}, p_{\varepsilon a}, p_{\varepsilon w}, p_{\varepsilon c}$ = Parámetros por tipo de cemento Tabla N°1;
- $k_{\varepsilon a}, k_{\tau a}$ = Factores por tipo de agregado Tabla N°2, sin información $k_{\varepsilon a} = k_{\tau a} = 1$;
- k_s = Factor geométrico de la sección.

$$k_s = \begin{cases} 1,00, & \text{Losa infinita} \\ 1,15, & \text{Cilindro infinito} \\ 1,25, & \text{Prisma cuadrado infinito} \\ 1,30, & \text{Esfera} \\ 1,55, & \text{Cubo} \end{cases} \quad (19)$$

Tabla N° 1 Parámetros de retracción dependientes del tipo de cemento para Modelo B4

Parámetro	R	RS	SL
τ_{cem}	0,016	0,080	0,010
$p_{\tau a}$	-0,33	-0,33	-0,33
$p_{\tau w}$	-0,06	-2,40	3,55
$p_{\tau c}$	-0,10	-2,70	3,80
ϵ_{cem}	360×10^{-6}	860×10^{-6}	410×10^{-6}
$p_{\epsilon a}$	-0,80	-0,80	-0,80
$p_{\epsilon w}$	1,10	-0,27	1,00
$p_{\epsilon c}$	0,11	0,11	0,11

Tabla N° 2 Factores de corrección de los parámetros de retracción según tipo de agregado para Modelo B4.

Tipo de agregado	$k_{\tau a}$	$k_{\epsilon a}$	Modulo Young E_{agg} (GPa)	Density ρ_{agg} (g/cm ³)
Diabasa	0,06	0,76	70-90	2,8-3,0
Cuarcita	0,59	0,71	50-90	2,5-2,8
Caliza	1,80	0,95	10-70	1,8-2,9
Arenisca	2,30	1,60	10-50	2,0-2,8
Granito	4,00	1,05	30-70	2,5-2,8
Diorita cuarzosa	15,0	2,20	50-100	2,7-3,1

2.3.3 *fib* (2020)

Las deformaciones por retracción por secado $\epsilon_{cds}(t, t_s)$, que representa la retracción producida debido a la pérdida de humedad se obtiene a partir del modelo presentado en la Ec. (20) y los coeficientes definidos en las Ec. (21) a (25).

$$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \times \beta_{RH}(RH) \times \beta_{ds}(t - t_s) \quad (20)$$

Donde:

$\epsilon_{cds0}(f_{cm})$ = Coeficiente nominal de retracción por secado;

$$\epsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \times \alpha_{ds1})^{(-\alpha_{ds2} \times f_{cm})}] \times 10^{-6} \quad (21)$$

$\beta_{RH}(RH)$ = Coeficiente de corrección por humedad relativa;

$$\beta_{RH}(RH) = \begin{cases} -1,55 \times \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right], & \text{si } 40\% \leq RH < 99\% \times \beta_{s1} \\ 0,25, & \text{si } RH \geq 99\% \times \beta_{s1} \end{cases} \quad (22)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} \leq 1,0 \quad (23)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \text{Función de desarrollo temporal;} \quad (24)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0,035 \times h^2 + (t - t_s)} \right)^{0,5}$$

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (25)$$

- t = Edad del hormigón, expresado en días;
- t_s = Edad del hormigón al inicio del secado, expresado en días;
- $(t - t_s)$ = Tiempo del secado, en días.
- $\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$ = Coeficientes dependiente del tipo de cemento Tabla N°3;
- f_{cm} = Resistencia media a la compresión a la edad de 28 días, expresada en [MPa];
- RH = Humedad relativa del ambiente, expresado en [%];
- h = Tamaño nocional del elemento, expresado en [mm];
- A_c = Área de sección transversal, expresado en [mm²];
- u = Perímetro del elemento en contacto con la atmósfera, expresado en [mm];

Tabla N° 3 Coeficientes α_i utilizados para clases de resistencia de cemento (*fib*, 2023).

Clase de resistencia del cemento	α_{bs}	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5 N	800	3	0,013
32,5 R, 42,5 N	700	4	0,012
42,5 R, 52,5 R, 52,5 N	600	6	0,012

2.4 FIBRAS

Las fibras incorporadas en materiales cementicios corresponden a elementos discontinuos distribuidos dentro de la matriz de hormigón o mortero, utilizados con el propósito de modificar determinadas propiedades físicas y mecánicas del material compuesto. Su incorporación puede influir en el comportamiento deformacional del hormigón, así como en propiedades relacionadas con la retracción, la durabilidad y la respuesta frente a las distintas solicitaciones (Bentur y Mindess, 2007).

El hormigón reforzado con fibras corresponde a un material compuesto constituido principalmente por cementos hidráulicos, agregados y fibras discretas de refuerzo distribuidas dentro de la matriz cementicia. Las fibras utilizadas para reforzar hormigón pueden fabricarse a partir de acero, vidrio, polímeros sintéticos y materiales naturales, existiendo diferentes configuraciones y propiedades según el tipo de fibra empleada (ACI, 1996).

Las propiedades y el desempeño de las fibras dependen principalmente de su origen, composición, geometría y características superficiales, factores que influyen directamente en la interacción fibra-matriz y en el comportamiento global del material compuesto. Dependiendo de su proceso de fabricación, pueden presentarse como monofilamentos individuales o como haces compuestos por múltiples filamentos de pequeño diámetro. Asimismo, algunas fibras incorporan deformaciones o modificaciones geométricas superficiales destinadas a mejorar la adherencia mecánica con la matriz cementicia (Bentur y Mindess, 2007).

2.4.1 Tipos de fibras

Las fibras utilizadas en materiales cementicios pueden clasificarse según su origen y composición en fibras metálicas, minerales, sintéticas y naturales. Entre las principales categorías utilizadas en hormigón reforzado con fibras se encuentran las fibras de acero, vidrio, fibra sintética y fibras naturales (ACI, 1996).

Tabla N° 4 Clasificación de fibras utilizadas en materiales cementicios.

Tipo de fibra	Características principales	Aplicaciones generales
Fibras de acero	Elevado módulo de elasticidad, alta resistencia mecánica y buena adherencia con la matriz cementicia. Mejoran la capacidad resistente y la tenacidad del hormigón.	Hormigones estructurales, pavimentos industriales y elementos sometidos a altas sollicitaciones mecánicas.
Fibras de vidrio	Alta resistencia a tracción y bajo peso específico. Requieren resistencia a ambientes alcalinos para evitar degradación.	Paneles arquitectónicos y elementos prefabricados delgados.
Fibras sintéticas	Fibras poliméricas de bajo peso específico y buena resistencia química. Pueden presentarse en distintas geometrías y dimensiones.	Morteros y hormigones destinados al control de deformaciones y modificación de propiedades del material compuesto.
Fibras naturales	Recursos renovables de origen vegetal, animal o mineral. Bajo costo y buena capacidad de absorción de energía, aunque con menor durabilidad en ambientes alcalinos.	Materiales cementicios de bajo impacto ambiental y aplicaciones no estructurales.

2.5 FIBRAS DE ACERO

Las fibras de acero corresponden a fibras metálicas discontinuas utilizadas como refuerzo en hormigones y morteros caracterizadas por presentar un elevado módulo de elasticidad y alta resistencia mecánica. El ACI (1996) define las fibras de acero como elementos discretos de acero con relaciones de aspecto generalmente comprendidas entre 20 y 100, suficientemente pequeñas para ser distribuidas aleatoriamente dentro de mezclas de hormigón convencionales (ACI, 1996).

Las fibras de acero pueden fabricarse en distintas geometrías y dimensiones, existiendo fibras lisas, corrugadas, deformadas y con extremos en gancho. Estas configuraciones tienen como finalidad mejorar la adherencia mecánica entre la fibra y la matriz cementicia, favoreciendo la transferencia de esfuerzos dentro del compuesto. Asimismo, las fibras pueden variar en longitud, diámetro y relación de aspecto, parámetros que influyen directamente en el desempeño del hormigón reforzado (Bentur y Mindess, 2007).

Debido a su elevada rigidez, las fibras de acero presentan una mayor capacidad para restringir deformaciones dentro de la matriz cementicia en comparación con fibras de menor módulo elástico. Por esta razón, su utilización ha sido ampliamente estudiada en hormigones reforzados destinados a pavimentos, túneles, prefabricados y elementos sometidos a sollicitaciones mecánicas importantes. En la Figura N°9 se observan las fibras de acero utilizadas para la presente investigación.



Figura N° 9 Fibras de acero utilizadas en estudio.

2.6 FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas corresponden a fibras poliméricas desarrolladas para ser incorporadas en mezclas cementicias con el propósito de modificar determinadas propiedades del hormigón o mortero. Estas fibras se caracterizan por presentar bajo peso específico, buena resistencia química y elevada estabilidad frente a ambientes agresivos, lo que ha permitido su creciente utilización en aplicaciones relacionadas con el control de deformaciones y durabilidad del hormigón (Bentur y Mindess, 2007).

El ACI (1996) señala que las fibras sintéticas utilizadas en hormigón reforzado pueden fabricarse a partir de distintos polímeros orgánicos, siendo las más comunes las fibras de polipropileno, nylon, polietileno y poliéster. Dependiendo de su geometría y dimensiones, estas fibras pueden clasificarse en microfibras y macrofibras sintéticas, cada una con funciones específicas dentro del material compuesto.

2.6.1 Macrofibras sintéticas

Las macrofibras sintéticas corresponden a fibras poliméricas de mayor longitud y diámetro que las microfibras, desarrolladas para ser incorporadas en mezclas cementicias. Estas fibras pueden presentar superficies texturizadas, fibriladas o deformadas mecánicamente para mejorar su adherencia con la matriz cementicia (ACI, 1996).

Entre las macrofibras sintéticas más utilizadas destacan las fabricadas a base de polipropileno y otros polímeros estructurales de alto desempeño. Debido a sus características físicas y químicas, estas fibras presentan buena resistencia a ambientes agresivos y bajo peso específico, permitiendo su utilización en distintas aplicaciones de hormigón reforzado con fibras (ACI, 1996). La Figura N°10 presenta las macrofibras sintéticas utilizadas para la investigación propuesta.



Figura N° 10 Macrofibras sintéticas utilizadas en estudio.

CAPÍTULO 3: INVESTIGACIÓN PROPUESTA

En el presente estudio se pretende realizar una caracterización experimental de la deformación por retracción en hormigones modificados con fibras.

Para llevar a cabo la investigación propuesta, el trabajo experimental se inicia en una planta hormigonera, donde se elaborarán nueve probetas conforme a las condiciones y estándares establecidos en la norma NCh 2221 Of.2010 “*Hormigón y mortero – Métodos de ensayo – Determinación de los cambios de longitud*” que establece el procedimiento para determinar los cambios de longitud en probetas de hormigón, originados por factores externos distintos de la aplicación de fuerza y cambios de temperatura (INN, 2010). Estas se agruparán en tres series de tres probetas cada una, de acuerdo con las siguientes dosificaciones:

- **Serie N°1:** Hormigón modificado con 15 [kg/m³] de fibras de acero (A) y 3,5 [kg/m³] de macrofibras sintéticas (S).
- **Serie N°2:** Hormigón modificado con 4 [kg/m³] de macrofibras sintéticas (S).
- **Serie N°3:** Hormigón modificado con 10 [kg/m³] de macrofibras sintéticas (S).

Transcurrida una semana de su elaboración las probetas serán trasladadas a las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO), donde se ingresarán a una cámara húmeda hasta completar 28 días de curado. Luego, se mantendrán en una sala en condiciones de exposición al aire hasta el término del periodo de medición.

Para determinar la magnitud de retracción, se realizarán mediciones diarias a cada una de las probetas, conforme a lo establecido en la norma NCh 2221 (INN, 2010). No obstante, se introducirán modificaciones en los periodos y condiciones de medición, con el objetivo de evaluar la retracción de hormigones modificados con fibras en condiciones de exposición al aire. De manera complementaria, se incorporará el registro de la pérdida de masa de las probetas como una variable adicional de análisis, no contemplada en la norma.

Las mediciones se iniciarán una vez que las probetas sean recepcionadas en las dependencias de la universidad, aproximadamente una semana después de su elaboración, y se extenderán por un periodo aproximado de 12 meses.

Finalmente, una vez completado el registro de datos, se llevará a cabo el procesamiento y análisis de la información obtenida. Para ello, se elaborarán representaciones gráficas de la evolución de la retracción y la pérdida de masa en función del tiempo para cada una de las probetas, con el objetivo de caracterizar experimentalmente el comportamiento por retracción de los hormigones estudiados. Asimismo, los resultados experimentales serán comparados con modelos predictivos y antecedentes disponibles en la literatura, con el propósito de proponer factores de calibración que permitan ajustar dichos modelos a las deformaciones obtenidas experimentalmente.

CAPÍTULO 4: DETALLES EXPERIMENTALES

4.1 CONFECCIÓN DE PROBETAS

Para llevar a cabo la investigación propuesta, se acudió a una planta hormigonera, en donde se elaboraron las mezclas de hormigón y, posteriormente, se confeccionaron las probetas que serían objeto de análisis.

La confección de las probetas se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma NCh 1017 (INN, 2009), complementada con las disposiciones específicas en la NCh 2221 (INN, 2010) aplicables al ensayo de retracción.

Los procedimientos descritos en el presente capítulo fueron aplicados a cada una de las series de probetas en sus respectivas fechas de elaboración. A continuación, se presenta en detalle el procedimiento empleado para la elaboración de cada una de las probetas.

4.1.1 Identificación de probetas

Con el objetivo de asegurar la trazabilidad de las unidades ensayadas durante el desarrollo de la investigación, cada probeta fue identificada mediante una nomenclatura compuesta por la serie correspondiente y un número correlativo individual, como se presenta en la Tabla N°5.

Tabla N° 5 Identificación de probetas confeccionadas.

N° Serie	Fecha de elaboración	Dosificación fibras [kg/m ³]	Identificación
Serie N°1	29 – 04 – 2025	A 15 + S 3,5	S1-P1
			S1-P2
			S1-P3
Serie N°2	07 – 05 – 2025	S 4	S2-P1
			S2-P2
			S2-P3
Serie N°3	23 – 07 – 2025	S 10	S3-P1
			S3-P2
			S3-P3

4.1.2 Dosificación de probetas

Para la confección de cada una de las mezclas se prepararon lotes de 4 [m³] a nivel industrial, cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla N°6, donde se indican las cantidades teóricas requeridas para cada una de las series estudiadas.

Para la matriz cementicia se utilizó cemento Portland puzolánico de alta resistencia, junto con grava, en el caso de la Serie N°1 y arena triturada de río para las tres series consideradas en el programa experimental.

Las fibras utilizadas para reforzar los hormigones correspondieron a fibras cilíndricas de acero con extremos conformados, longitud de 35 [mm], diámetro de 0,55 [mm] y relación de aspecto igual a 65. Asimismo, se emplearon macrofibras sintéticas de longitud nominal 48 [mm] y diámetro equivalente de 0,70 [mm].

Tabla N° 6 Dosificación de hormigones confeccionados.

Materiales		Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
Cemento	[kg/m ³]	425	500	
Agua	[kg/m ³]	210	242	
Grava 13mm	[kg/m ³]	120	-	
Arena	[kg/m ³]	1497	1561	
Aditivo 1	Tipo	Plastificante	RDA 30 (Ulmen)	
	[kg/m ³]	2,0	1,00	
Aditivo 2	Tipo	Reductor de agua (Alto rango)	AQUA 91Z	
	[kg/m ³]	4,0	2,75	
Aditivo 3	Tipo	Humo de sílice	-	
	[kg/m ³]	21		
Fibras	[kg/m ³]	A 15 + S 3,5	S 4	S 10

4.1.3 Preparación de moldajes de probetas

Los moldes utilizados para la confección de las probetas del ensayo, correspondientes a hormigones con árido de tamaño máximo nominal $D_n \leq 37,5$ [mm], correspondieron a moldes prismáticos de dimensiones 100 x 100 x 285 [mm] y una longitud efectiva de medida

(G) de 250 [mm], conforme a lo establecido en la NCh 2221 (INN, 2010). Estos están fabricados en acero, con el fin de evitar deformaciones durante el proceso de hormigonado.

Previo a su utilización, los moldes fueron limpiados y correctamente ensamblados, asegurando su hermeticidad para prevenir derrames y deformaciones durante el llenado. Posteriormente, se aplicó una capa ligera de aceite mineral en su superficie interior, con el objetivo de facilitar el desmolde de las probetas, como se observa en la Figura N° 11.



Figura N° 11 Moldaje de probetas acondicionadas con aceite mineral.

Una vez armados, se instalaron los topes de acero en sus respectivos dispositivos de fijación, asegurando que el cuerpo de tope penetrara $17,5 \text{ [mm]} \pm 0,5 \text{ [mm]}$ en la probeta, y que la distancia entre las caras internas de ambos topes fuera de $250 \text{ [mm]} \pm 2,5 \text{ [mm]}$. Durante este proceso, se tuvo especial cuidado en mantener los topes limpios con el fin de garantizar condiciones adecuadas para la medición de la retracción.

A continuación, se presenta la Tabla N°7 con resumen de las longitudes efectivas de cada una de las probetas.

Tabla N° 7 Longitudes efectivas de medida (G) de las probetas confeccionadas.

N° Serie	Longitud efectiva de medida (G) [mm]		
	P1	P2	P3
Serie N°1	251,3	249,1	251,2
Serie N°2	251,9	249,7	249,6
Serie N°3	252,5	252,1	252,2

4.1.4 Hormigonado de probetas

El hormigonado de las probetas se efectuó empleando una mezcla base elaborada en camión mixer, conforme a la dosificación previamente definida para la investigación. Una

vez finalizado el amasado inicial de la mezcla sin fibras, se verificaron sus propiedades en estado fresco mediante la medición de la temperatura del hormigón y la determinación del asentamiento de cono de Abrams, como se indica en la Figura N°12.



(a)

(b)

Figura N° 12 (a) Descarga de hormigón; (b) asentamiento inicial sin fibras.

Posteriormente, como se presenta en la Figura N°13 se incorporaron las fibras a la mezcla según la dosificación correspondiente al volumen total de hormigón elaborado. Luego de su incorporación, se efectuó un nuevo periodo de amasado con el fin de asegurar una distribución homogénea de las fibras dentro de la matriz cementicia.



Figura N° 13 Incorporación de fibras a hormigón.

Finalizado el mezclado con fibras, se realizaron nuevamente controles de temperatura y asentamiento, con el propósito de verificar la trabajabilidad del hormigón previo al moldeado de las probetas.

El llenado de los moldes se realizó en dos capas de espesor aproximadamente igual. La segunda capa se dispuso con un leve exceso de material por sobre el borde superior del molde. Cada capa fue compactada de acuerdo con la consistencia observada de la mezcla

empleándose apisonado manual con ayuda de una varilla pisón para hormigón y vibrado en mesa vibradora durante 25 segundos, ambos métodos se ven registrados en la Figura N°14.



(a)

(b)

Figura N° 14 (a) Compactación con varilla pisón; (b) compactación con mesa vibradora.

Una vez completada la compactación, se retiró el exceso de hormigón y se enrasó el hormigón superficial con platacho, evitando la separación entre mortero y el árido grueso. Finalmente, se alisó la superficie con llana para así obtener una terminación uniforme. Inmediatamente después de terminado este proceso se realizó una marca en cada una de las probetas para poder ser identificadas. La Figura N°15 presenta esta etapa del procedimiento.



(a)

(b)

Figura N° 15 (a) Platachado de probetas; (b) marcación de probetas.

El proceso completo de descarga, control y moldeo se desarrolló dentro del tiempo máximo permitido para el hormigón fresco, cumpliéndose el requisito de no exceder 2 horas entre la salida del camión desde la zona de carga y la última descarga efectuada según la NCh170 (INN, 2016) sobre requisitos generales del hormigón.

4.1.5 Curado de probetas

Finalizando el hormigonado, y con el propósito de conservar la humedad del hormigón y evitar la pérdida de agua por evaporación, el conjunto de probetas y moldes fue protegido en todos sus costados mediante láminas plásticas como se observa en la Figura N°16 y cubiertas adicionalmente con una lona plástica.



Figura N° 16 Probetas cubiertas con lámina plástica para curado inicial.

Asimismo, con el fin de mantener las probetas dentro del rango de temperatura especificado entre 16 [°C] y 27 [°C], estas fueron resguardadas en un galpón industrial bajo techo, permitiendo la libre circulación de aire y resguardándolas de la exposición directa a las condiciones ambientales exteriores.

Transcurrida una semana desde el hormigonado, las probetas fueron trasladadas bajo condiciones controladas de humedad, protegidas con láminas plásticas y papel aluminio al interior de un contenedor térmico tipo cooler, hasta su ingreso a la cámara húmeda de las dependencias del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO).

Durante su permanencia en la cámara húmeda, y hasta completar 28 días de edad, se realizaron mediciones periódicas de retracción conforme al programa experimental definido para la investigación. Finalizando este periodo, las probetas fueron retiradas de la cámara húmeda para continuar con la etapa posterior de mediciones en un ambiente expuesto al aire.

4.2 MEDICIÓN Y REGISTRO DE DATOS

Con el propósito de determinar la retracción experimentada por los hormigones estudiados, se realizaron mediciones periódicas de cambio de longitud conforme a los lineamientos establecidos en la NCh 2221 (INN, 2010). Para ello, se utilizó un retractómetro marca HUMBOLDT, de fabricación estadounidense, equipado con un dial macrométrico marca SOILTEST INC., cuya resolución de lectura corresponde a 0,0025 [mm].

El sistema de medición se complementó con una barra patrón, utilizada como elemento de referencia para la verificación diaria del equipo y para la obtención de lecturas comparativas. La barra, fabricada en acero invar, con una longitud de $295 \text{ [mm]} \pm 3 \text{ [mm]}$, presentó en sus extremos una geometría equivalente a la de las piezas de tope incorporadas en las probetas, permitiendo su correcto posicionamiento en el retractómetro bajo condiciones equivalentes de medición.

Asimismo, la barra patrón posee un coeficiente de dilatación térmica de valor equivalente $\alpha \leq 0,000002/[\text{°C}]$, con el objeto de minimizar variaciones dimensionales producto de cambios de temperatura durante el ensayo. En su zona central, presenta un recubrimiento de goma de aproximadamente 100 [mm] de longitud y 3 [mm] de espesor destinado a facilitar su manipulación y reducir la transferencia térmica por contacto directo. La Figura N°17 presenta la barra patrón utilizada en la presente investigación.



Figura N° 17. Barra patrón, utilizada en estudio.

El equipo empleado presentado en la Figura N°18 permitió obtener lecturas sucesivas de longitud en cada probeta, las cuales fueron posteriormente utilizadas para el cálculo del cambio de longitud y análisis de la evolución de la retracción en el tiempo.



Figura N° 18 Retractorómetro, utilizado en estudio.

4.2.1 Lectura del retractómetro

El retractómetro utilizado posee un sistema de lectura compuesto por dos relojes comparadores. El dial horario registra el desplazamiento instantáneo del vástago medidor, mientras que el dial antihorario contabiliza el número de vueltas completadas por el dial principal, permitiendo ampliar el rango total de lectura del instrumento. En la Figura N° 19 se identifican ambos elementos del sistema de medición.



Figura N° 19 Dial del retractómetro.

Previo al inicio de cada jornada de medición, se verificó la posición de referencia del equipo mediante el ajuste del dial horario en cero y la correspondiente identificación del valor base en el dial antihorario. Posteriormente, se introdujo la barra patrón en el equipo como se presenta en Figura N°20, efectuando un giro lento y controlado hasta identificar la lectura mínima, la cual fue registrada como valor de referencia.



Figura N° 20 Retractómetro con barra patrón.

Una vez obtenida dicha lectura, cada probeta fue posicionada en el retractómetro mediante los topes de acero incorporados en sus extremos, asegurando un correcto apoyo y alineación durante la medición como se presenta en Figura N°21. Luego, se realizó un giro

controlado del mecanismo hasta determinar la menor lectura entregada por el instrumento, correspondiente al valor de medición de la probeta en la fecha respectiva.



Figura N° 21 Retractómetro con probeta S1-P3.

Con el objeto de asegurar la repetibilidad de los resultados, durante la primera medición se definió la orientación de colocación de cada probeta en el equipo, manteniéndose la misma disposición en todas las lecturas posteriores. Finalizada la medición de cada unidad, el procedimiento fue repetido sucesivamente hasta completar el registro de las nueve probetas consideradas en la investigación, de acuerdo con el programa de mediciones establecido.

4.2.2 Registro de masa de probetas

De manera complementaria a las mediciones de cambio de longitud, se efectuó el registro periódico de la masa de cada una de las probetas, con el propósito de evaluar la pérdida de masa experimentada durante el periodo de estudio y su posible relación con el fenómeno de retracción. Para ello se utilizó una balanza marca Hengx, modelo YP-15Kg, con capacidad máxima de 15 [kg] y una precisión de 1 [g], la cual se presenta en la Figura N°22.



Figura N° 22 Balanza, utilizada en estudio.

Previo a cada pesaje, se verificó que la superficie de apoyo de la balanza se encontrara nivelada y libre de elementos ajenos a la medición. Posteriormente, cada probeta fue posicionada individualmente sobre la plataforma como se presenta en la Figura N°23, registrándose el valor indicado por el equipo en la planilla de control correspondiente.

Las mediciones de la masa se realizaron con la misma frecuencia definida para las lecturas de retracción, permitiendo disponer de un registro cronológico comparable entre ambas variables de estudio.



Figura N° 23 Balanza con probeta S1-P3.

4.2.3 Cálculo de retracción

Para determinar la retracción experimentada por cada probeta durante el periodo de estudio, se utilizó la expresión establecida en la NCh 2221 (INN, 2010), correspondiente al cálculo del cambio de longitud de una probeta a cualquier edad. Dicha relación se presenta en la Ec. (26).

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \quad (26)$$

Donde:

- L = Cambio de longitud de la probeta a cualquier edad, en [mm/m];
- L_x = Diferencia entre lecturas de probeta y barra patrón a la edad x , en [mm];
- L_i = Diferencia inicial entre lecturas de barra patrón L_P y probeta L_O , en [mm];
- G = Longitud efectiva de medida (0,250[m]).

Previo a la aplicación de la ecuación anterior, fue necesario convertir las lecturas obtenidas en el retractómetro desde unidades del dial comparador a milímetros. Para ello, se consideró que una vuelta completa del dial antihorario equivale a 200 unidades del dial horario, y que cada unidad corresponde a 0,0025 [mm]. En función de lo anterior, la lectura total del instrumento se determinó mediante la Ec. (27).

$$Lectura [mm] = (V \times 200 \times 0,0025) + (U \times 0,0025) \quad (27)$$

Donde:

- V = Número de vueltas registradas en dial antihorario;
- U = Número de unidades indicadas en dial horario.

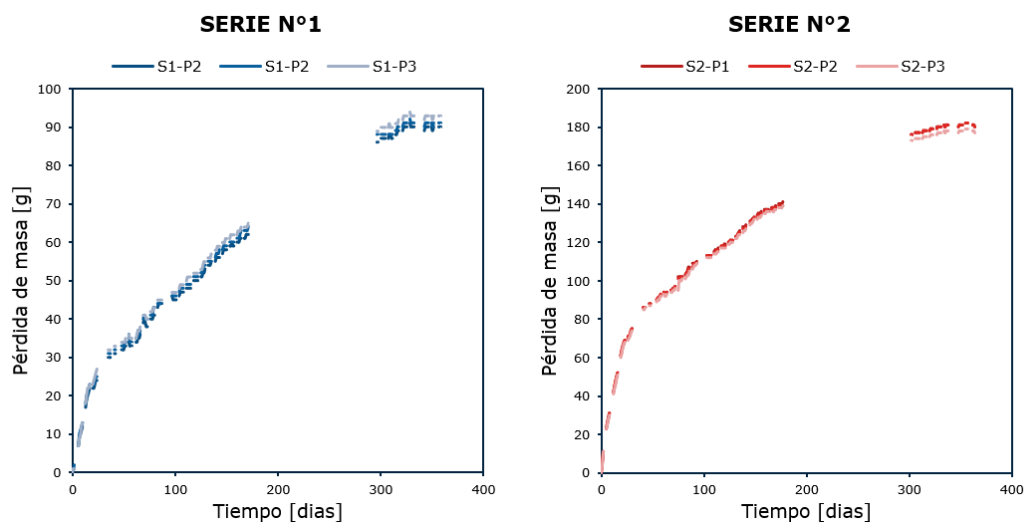
Una vez obtenidas las lecturas en milímetros para la barra patrón y para cada probeta, se calcularon los valores de L_x y L_i , los cuales fueron posteriormente utilizados para determinar el cambio de longitud diario de cada unidad ensayada.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 PÉRDIDA DE MASA POR SECADO

5.1.1 Evolución de la masa de las probetas

En esta sección se presentan las mediciones de masa realizadas periódicamente sobre las probetas prismáticas durante el período de exposición al aire. Para efectos del presente estudio, se consideró como edad de referencia $t = 0$ días el momento en que las probetas fueron retiradas de la cámara húmeda e iniciaron su exposición al aire. Aunque se contaba con mediciones previas correspondientes al período de curado, estas no fueron incluidas debido a que el presente estudio aborda exclusivamente los fenómenos asociados al secado del hormigón.



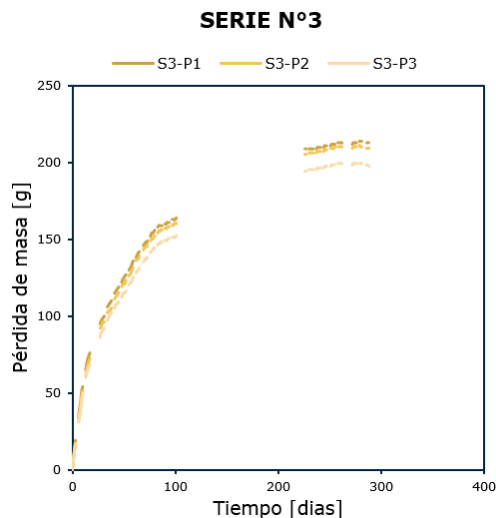


Figura N° 24 Pérdida de masa experimentada por probetas de las series durante periodo de estudio.

Las curvas individuales de pérdida de masa observadas en la Figura N°24 presentan una tendencia creciente durante todo el período de exposición al aire, con una mayor variación durante las primeras edades de secado y una posterior disminución progresiva de la tasa de pérdida de humedad. Además, se observa una baja dispersión entre las probetas pertenecientes a una misma serie, lo que indica una adecuada repetibilidad de los resultados experimentales. Esta consistencia permite utilizar posteriormente las curvas promedio como una representación adecuada del comportamiento de cada dosificación.

5.1.2 Comparación de la pérdida de masa promedio entre series

Para reducir la dispersión asociada a las mediciones individuales, se calculó una curva promedio de pérdida de masa para cada serie mediante el promedio aritmético de las tres probetas ensayadas. La Figura N°25 presenta la comparación entre las curvas promedio obtenidas para las distintas dosificaciones estudiadas.

Con el propósito de complementar el análisis gráfico, en la Tabla N°8 se presentan valores representativos de pérdida de masa promedio para las tres series estudiadas. Debido a la existencia de un periodo sin registros experimentales entre diciembre de 2025 y marzo de 2026, asociado al receso académico, se incorporan los valores correspondientes a la última medición efectuada antes de la interrupción y a la primera medición realizada una vez retomado el programa experimental. Asimismo, se incluye el valor final registrado para cada serie al término del periodo de monitoreo.

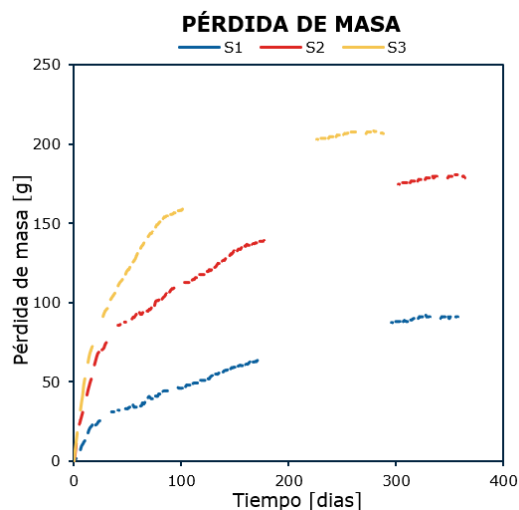


Figura N° 25 Comparación de pérdida de masa promedio de las series durante periodo de estudio.

Tabla N° 8 Pérdida de masa promedio registrada en edades representativas del periodo de estudio.

Edad de secado [días]	Serie N°1 [g]	Serie N°2 [g]	Serie N°3 [g]
0	0	0	0
7	9	28	37
14	20	47	66
56	34	91	126
84	44	104	154
Ultima medición interrupción	64 (171 días)	139 (177 días)	159 (101 días)
Primera medición interrupción	88 (296 días)	175 (302 días)	203 (226 días)
Final	91 (358 días)	179 (364 días)	206 (288 días)

A partir de la información presentada, se observa que las tres series presentan una evolución similar, caracterizada por una rápida pérdida de masa durante las primeras edades de secado y una posterior disminución de la tasa de pérdida de humedad. No obstante, la magnitud final registrada fue distinta en cada dosificación: la Serie N°1 alcanzó 91 [g] a los 358 días, mientras que las Series N°2 y N°3 registraron 179 [g] y 206 [g], respectivamente.

La Serie N°3 presentó la mayor pérdida de masa y también la mayor velocidad inicial de secado, alcanzando 154 [g] a los 84 días, equivalente a cerca del 75% de su pérdida final. En comparación, las Series N°1 y N°2 alcanzaron aproximadamente el 48% y 58% de sus pérdidas finales a la misma edad. Esto indica que el proceso de secado no sólo varió en magnitud entre las series, sino también en la velocidad con que se desarrolló durante las primeras etapas de exposición al aire.

5.1.3 Modelación de la pérdida de masa

Para modelar la evolución de la pérdida de masa, se ajustó la Ec. (28) a las curvas promedio obtenidas para cada serie. La formulación propuesta corresponde a una función exponencial que reproduce el comportamiento asintótico observado en las curvas obtenidas, caracterizado por una reducción gradual de la tasa de pérdida de masa en el tiempo.

$$\frac{\Delta M(t)}{\Delta M_f} = B_i \left(1 - e^{-k_1 \left(\frac{t}{k_3} \right)^{k_2}} \right) \quad (28)$$

Donde:

- $\Delta M(t)$ = Pérdida de masa acumulada al tiempo t , en [g];
- ΔM_f = Pérdida de masa registrada al término del periodo de monitoreo, en [g];
- B_i = Factor adimensional de normalización de la pérdida de masa;
- t = Tiempo transcurrido desde el inicio de secado, expresado en días;
- k_1, k_2, k_3 = Parámetros experimentales de ajuste del modelo de pérdida de masa.

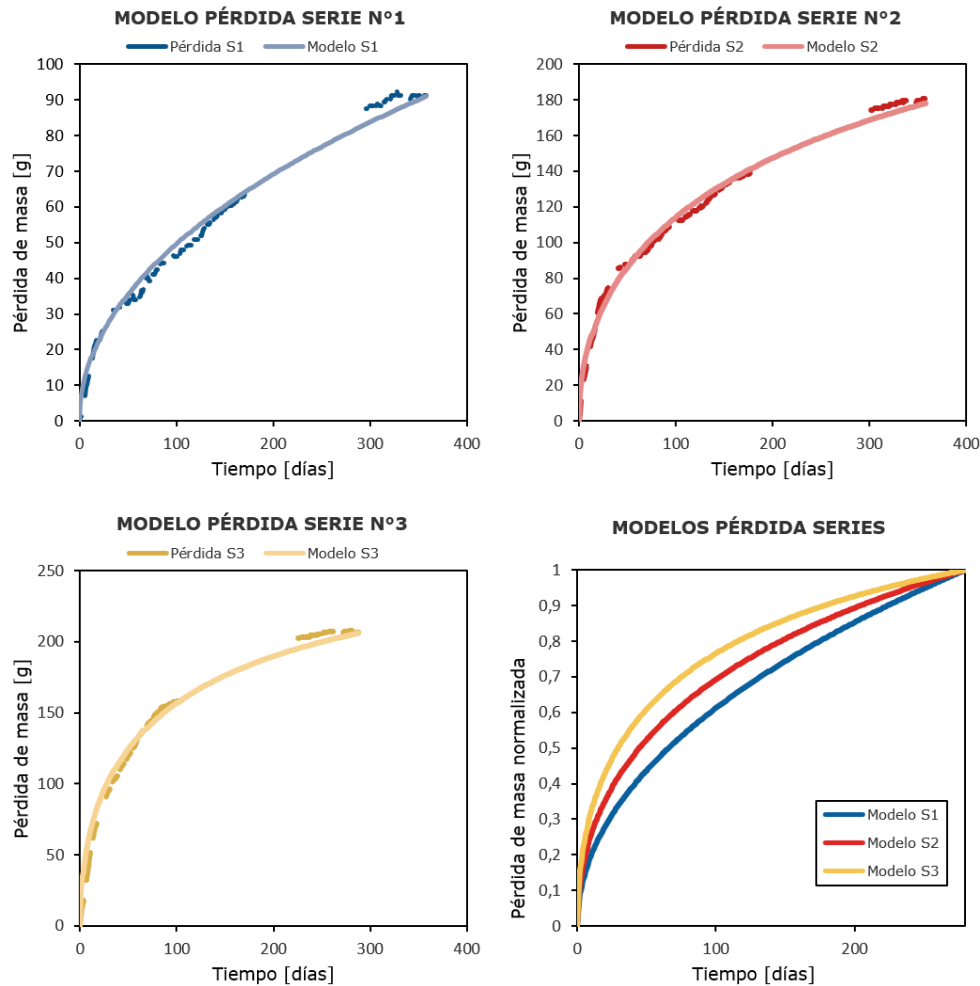


Figura N° 26 (a) Curvas experimentales promedio; (b) Modelos ajustados de pérdida de masa.

Tabla N° 9 Parámetros obtenidos para los modelos de pérdida de masa.

Parámetros	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
B_i	7,985	1,647	1,266
k_1	0,01	0,06	0,065
k_2	0,5	0,5	0,5
k_3	2,0	1,5	0,5

Los resultados experimentales muestran un buen ajuste con el modelo analítico expresado en la Ec. (28), lo que permite representar adecuadamente la evolución de la pérdida de masa promedio de las tres series estudiadas. Para el ajuste del modelo, las curvas experimentales fueron normalizadas respecto de la pérdida de masa registrada al término del período de monitoreo, ΔM_f . Por su parte el factor B_i fue utilizado para normalizar la función de pérdida de masa, de manera que esta alcanzara el valor unitario en la edad máxima considerada para cada serie. Posteriormente se realizó una regresión no lineal para determinar los parámetros k_1 , k_2 y k_3 , minimizando el error de ajuste para cada dosificación.

Las curvas ajustadas presentadas en la Figura N°26 reproducen satisfactoriamente la evolución experimental de la pérdida de masa, caracterizada por un rápido aumento de la pérdida de masa durante las primeras edades de secado y una posterior disminución de su tasa de pérdida de humedad con el transcurso del tiempo. Los parámetros obtenidos para cada serie, resumidos en la Tabla N°9, permiten cuantificar dicho comportamiento mediante la calibración del modelo propuesto.

En particular, los valores obtenidos para el parámetro k_3 muestran una disminución progresiva desde la Serie N°1 hasta la Serie N°3. En el contexto del modelo ajustado, este parámetro controla la velocidad de evolución de la pérdida de masa, de modo que menores valores de k_3 representan un desarrollo más acelerado del proceso de secado durante las primeras edades.

Finalmente, la comparación de los modelos ajustados presentada en la Figura N°26 permite apreciar con mayor claridad las diferencias en la cinética de pérdida de masa entre las tres dosificaciones. Se observa que la Serie N°3 alcanza más rápidamente una mayor fracción de su pérdida de masa final, seguida por la Serie N°2, mientras que la Serie N°1 presenta una evolución más gradual. No obstante, a medida que transcurre el tiempo de secado, las diferencias entre las curvas disminuyen progresivamente, convergiendo todas hacia un valor normalizado igual a uno. Lo anterior pone de manifiesto que la principal diferencia entre las series radica en la velocidad con que se desarrolla la pérdida de masa durante las primeras edades de secado, más que en la forma general del proceso descrito por el modelo.

5.2 RETRACCIÓN POR SECADO

5.2.1 Evolución de la retracción por secado de probetas

Como consecuencia del proceso de pérdida de humedad descrito en la sección anterior, las probetas desarrollaron deformaciones de retracción cuya magnitud fue registrada durante el período de exposición al aire. La Figura N°27 presenta la evolución de la retracción medida para cada una de las series estudiadas.

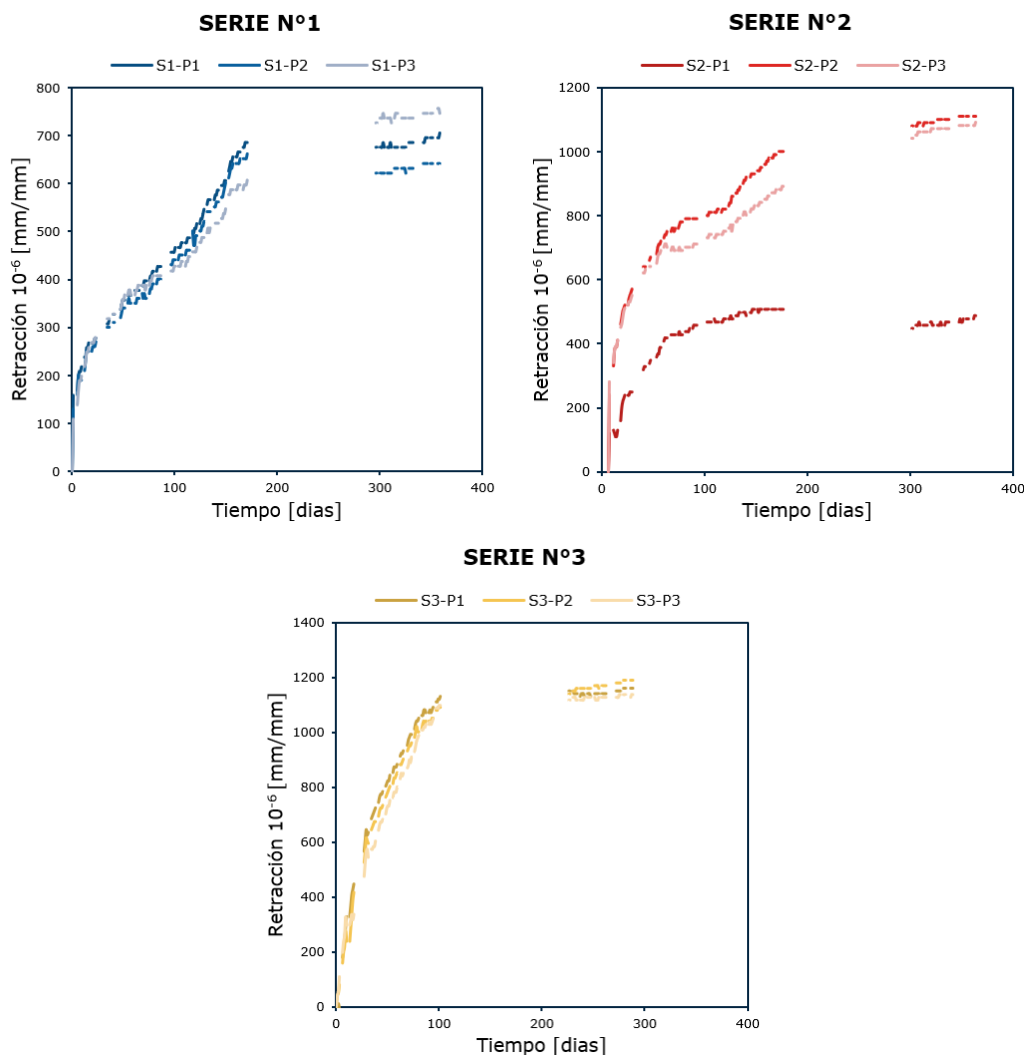


Figura N° 27 Retracción por secado experimentada por probetas de las series durante periodo de estudio .

La Figura N°27 muestra las curvas individuales de retracción por secado las cuales presentan una tendencia creciente durante el período de monitoreo, evidenciando el desarrollo progresivo de deformaciones asociadas a la pérdida de humedad del hormigón. En general, se observa una baja dispersión entre las probetas de una misma serie, particularmente

en las Series N°1 y N°3, lo que indica una adecuada repetibilidad de los resultados experimentales.

No obstante, en la Serie N°2 se aprecia que la probeta S2-P1 presenta una estabilización de la retracción a partir de los 100 días aproximadamente, comportamiento que difiere de la tendencia observada en las demás probetas. Esta situación podría estar asociada a alguna condición particular del sistema de medición y/o fijación de los topes, ya que desde dicho período se registraron lecturas repetidas del dial. Debido a que su evolución no resulta consistente con la tendencia general observada, los resultados de la probeta S2-P1 fueron excluidos de los análisis posteriores y del cálculo de los valores promedio empleados en el estudio.

5.2.2 Comparación de retracción por secado promedio entre series.

Una vez analizada la evolución de la retracción por secado de las probetas individuales, se comparó el comportamiento promedio de las tres series estudiadas con el propósito de comparar el desarrollo de esta deformación entre las distintas dosificaciones estudiadas. Para ello, se determinaron las curvas promedio de retracción por secado para cada serie, las cuales se presentan en la Figura N°28.

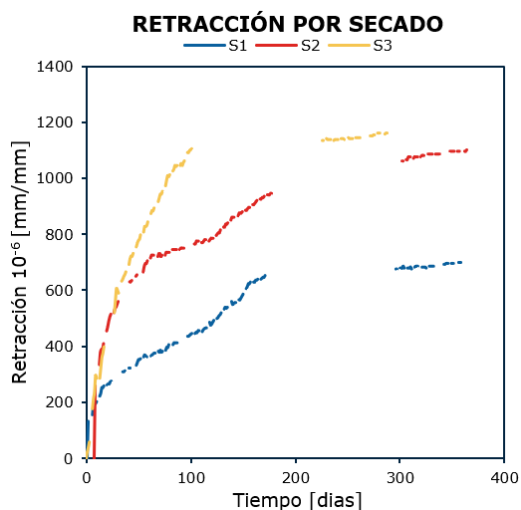


Figura N° 28 Comparación de retracción por secado promedio de las series durante periodo de estudio.

La Tabla N°10 presenta valores representativos de retracción por secado promedio registrados en distintas edades del período experimental, permitiendo complementar la comparación gráfica mediante una evaluación cuantitativa de la evolución de la deformación en cada una de las series estudiadas.

Tabla N° 10 Retracción por secado promedio registrada en edades representativas del periodo de estudio.

Edad de secado [días]	Serie N°1 [10⁻⁶ mm/mm]	Serie N°2 [10⁻⁶ mm/mm]	Serie N°3 [10⁻⁶ mm/mm]
0	-	-	0
7	190	0	215
14	233	391	324
56	369	696	829
84	412	746	1034
Ultima medición interrupción	652 (171 días)	946 (177 días)	1106 (101 días)
Primera medición interrupción	675 (296 días)	1061 (302 días)	1136 (226 días)
Final	698 (358 días)	1102 (364 días)	1162 (288 días)

Nota: El símbolo (-) indica edades en las que se registraron deformaciones promedio negativas, correspondientes a una expansión de las probetas respecto de la lectura de referencia. Este comportamiento se observó al inicio del período de exposición al aire, debido a que las probetas aún presentaban un aumento de volumen asociado a su permanencia previa en cámara húmeda. Estos valores no fueron considerados en el análisis de la retracción por secado.

La comparación de las curvas promedio presentadas en la Figura N°28 y de los valores resumidos en la Tabla N°10 evidencia diferencias en la evolución de la retracción por secado entre las tres series estudiadas. La Serie N°3 presentó la mayor magnitud de retracción al término del período de monitoreo, seguida por la Serie N°2 y finalmente, la Serie N°1. Estas diferencias se manifiestan tanto en la magnitud final alcanzada como en la velocidad de desarrollo de la deformación durante las primeras edades de secado.

A los 84 días, la Serie N°3 había alcanzado aproximadamente el 89% de su retracción final, mientras que las Series N°1 y N°2 habían alcanzado aproximadamente el 59% y 67% respectivamente. Esto indica que la Serie N°3 desarrolló una proporción importante de su retracción durante las primeras edades de secado, mientras que las Series N°1 y N°2 presentaron un desarrollo más gradual de la deformación.

Si bien las mayores pérdidas de masa observadas se asociaron, en términos generales, con mayores deformaciones de retracción, esta relación no se presentó de manera estrictamente proporcional entre las series. La Serie N°3 presentó tanto la mayor pérdida de masa como la mayor retracción al término del periodo de monitoreo; sin embargo, las diferencias observadas en la evolución temporal de ambos fenómenos muestran que su desarrollo no fue equivalente durante todo el periodo experimental.

5.3 COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y MODELOS DE PREDICCIÓN

5.3.1 Parámetros utilizados para la aplicación de los modelos

Con el fin de determinar la capacidad predictiva de los modelos ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* (2020), en la Tabla N°11 se recopilieron los parámetros requeridos por cada formulación a partir de las propiedades, condiciones y variables registradas durante el programa experimental. Con esta información se obtuvieron las curvas teóricas de retracción por secado para cada una de las series estudiadas mediante los modelos previamente descritos.

Tabla N° 11 Parámetros utilizados para aplicación de modelos de predicción de retracción por secado.

Parámetros	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
Resistencia a la compresión a 28 días [MPa]	49,6	33,5	34,1
Propiedades de la mezcla			
Asentamiento [mm]	230	230	250
Tipo de cemento	R / 32,5 R		
Tipo de agregado	Granito		
Contenido de cemento [kg/m³]	425	500	500
Contenido de agua [kg/m³]	210	242	242
Contenido de árido [kg/m³]	1617	1561	1561
Porcentaje de árido fino [%]	93%	100%	100%
Relación agua /cemento	0,49	0,48	0,48
Relación árido /cemento	3,80	3,12	3,12
Efectos del diseño y construcción			
Relación Volumen/Superficie [mm]	21,27		
Área de sección transversal [mm²]	10000		
Perímetro en contacto con atmósfera [mm]	400		
Efectos del ambiente			
Humedad relativa [%]	50		
Temperatura ambiente [°C]	17		
Temperatura de curado [°C]	23		

A partir de los parámetros definidos y de las curvas teóricas obtenidas para cada formulación, en las siguientes secciones se realiza la comparación entre las predicciones de los modelos y los resultados experimentales promedio registrados durante el período de monitoreo. Esta comparación permite observar la correspondencia entre la evolución experimental de la retracción por secado y las tendencias estimadas por cada modelo para las distintas series estudiadas. Para ello, se presentan las curvas experimentales y teóricas de cada serie considerando el período de medición disponible en cada caso.

5.3.2 Modelos predictivos Serie N°1

En la Serie N°1, como se observa en la Figura N°29, la curva experimental presenta una evolución creciente de la retracción durante todo el período de monitoreo, alcanzando valores intermedios entre las predicciones de ACI (1997) y Bažant et al. (2015). Durante las primeras edades, los resultados experimentales presentan mayor proximidad con Bažant et al. (2015) y *fib* (2020); sin embargo, a medida que aumenta la edad, la curva experimental continúa desarrollándose mientras ambos modelos tienden a estabilizarse, generando una subestimación creciente. Por otra parte, ACI (1997) sobreestima la retracción durante gran parte del período. En cuanto a la forma de las curvas, la evolución experimental presenta mayor similitud con Bažant et al. (2015), mientras que *fib* (2020) muestra una mayor proximidad inicial, pero se distancia progresivamente debido a su estabilización temprana.

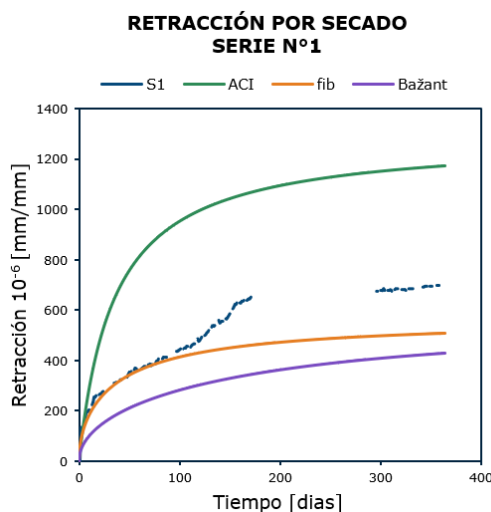


Figura N° 29 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°1 .

5.3.3 Modelos predictivos Serie N°2

En la Serie N°2, la Figura N°30 muestra una evolución creciente de la retracción experimental durante el período de monitoreo, manteniéndose entre las predicciones de ACI (1997) y Bažant et al. (2015), al igual que lo observado en la Serie N°1. Durante las primeras edades, los resultados experimentales presentan una proximidad marcada con el modelo ACI (1997). Si bien esta diferencia aumenta progresivamente con la edad, la curva experimental mantiene una mayor cercanía en magnitud con este modelo que con *fib* (2020). Por otra parte, Bažant et al. (2015) presenta valores consistentemente inferiores a los experimentales, aunque su evolución creciente sostenida se asemeja a la tendencia de la curva experimental.

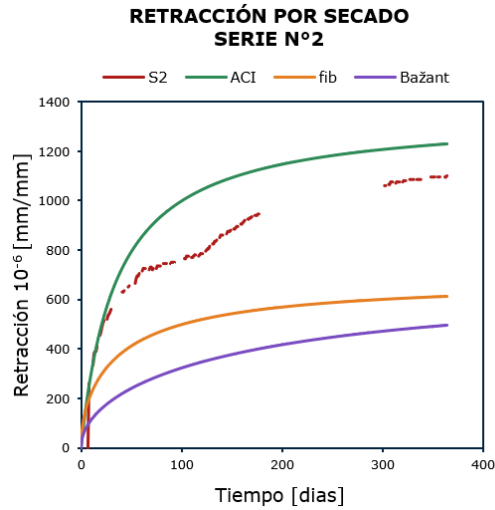


Figura N° 30 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°2.

5.3.4 Modelos predictivos Serie N°3

En la Serie N°3, de acuerdo con la Figura N°31 se observa un comportamiento diferente al de las series anteriores, destacando la mayor proximidad entre la curva experimental y la predicción de ACI (1997), tanto en magnitud como en su evolución general. La retracción experimental presenta un incremento pronunciado durante las primeras edades y posteriormente continúa desarrollándose de manera progresiva, manteniéndose próxima a la estimación de ACI (1997). En contraste, los modelos Bažant et al. (2015) y *fib* (2020) presentan valores considerablemente inferiores durante todo el periodo de monitoreo.

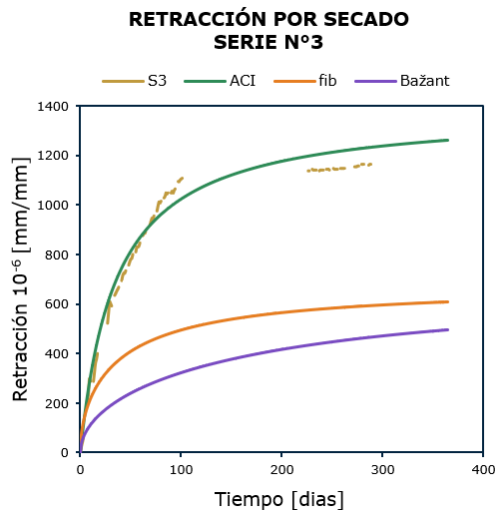


Figura N° 31 Comparación de curvas de retracción por secado experimental y teóricas para Serie N°3.

5.4 CALIBRACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS

Los análisis presentados en las Figuras anteriores evidenciaron diferencias entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales obtenidos para las distintas series estudiadas. Si bien los modelos evaluados lograron reproducir parcialmente la evolución de la retracción por secado, se observaron discrepancias tanto en la magnitud de las deformaciones como en su desarrollo temporal. Por esta razón, se realizó una calibración de las curvas teóricas mediante la aplicación de factores de ajuste, con el objetivo de mejorar la concordancia entre las predicciones de los modelos y los resultados experimentales registrados durante el período de monitoreo.

La calibración de los modelos se realizó a partir de la comparación entre las deformaciones de retracción por secado estimadas experimentalmente y las obtenidas teóricamente para las distintas edades consideradas en el análisis. El factor de calibración se determinó como el promedio de las razones entre la magnitud experimental y la teórica, como se presenta en la Ec. (29).

$$FC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{exp,i}}{\varepsilon_{teo,i}} \quad (29)$$

Donde:

- FC = Factor de calibración promedio;
- n = Número de edades consideradas en la comparación;
- $\varepsilon_{exp,i}$ = Retracción por secado experimental para edad i , en $[10^{-6} \text{ mm/mm}]$;
- $\varepsilon_{teo,i}$ = Retracción por secado estimada por modelo para edad i , en $[10^{-6} \text{ mm/mm}]$.

A partir de la Ec. (29), se determinaron los factores de calibración correspondientes a cada modelo predictivo y serie estudiada. Estos valores permiten cuantificar la relación entre las deformaciones estimadas por cada formulación y las registradas experimentalmente, permitiendo evaluar el grado de ajuste de las predicciones teóricas respecto de los resultados experimentales. Los factores de calibración obtenidos se presentan en la Tabla N°12.

Tabla N° 12 Factores de calibración obtenidos para modelos predictivos

Modelos	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
ACI (1997)	0,550	0,843	0,956
Bažant et al. (2015)	1,703	2,444	2,882
<i>fib</i> (2020)	1,206	1,638	1,867

5.4.1 Calibración modelo ACI (1997)

La Figura N°32 presenta los resultados de la calibración del modelo ACI (1997) para las tres series estudiadas. En la Serie N°1, con un FC de 0,550, la curva calibrada reproduce adecuadamente la tendencia general de los datos experimentales, aunque se observan desviaciones en edades intermedias donde la curva experimental presenta mayor variabilidad; hacia el final del período, el modelo tiende a subestimar la deformación experimental. En la Serie N°2, con un FC de 0,843, el modelo calibrado logra un buen ajuste durante todo el período de monitoreo, aunque hacia edades avanzadas también se observa una subestimación de la deformación experimental. En la Serie N°3, con un FC de 0,956, se observa el mejor ajuste entre las tres series, con la curva calibrada prácticamente superpuesta a los resultados experimentales durante la mayor parte del periodo evaluado.

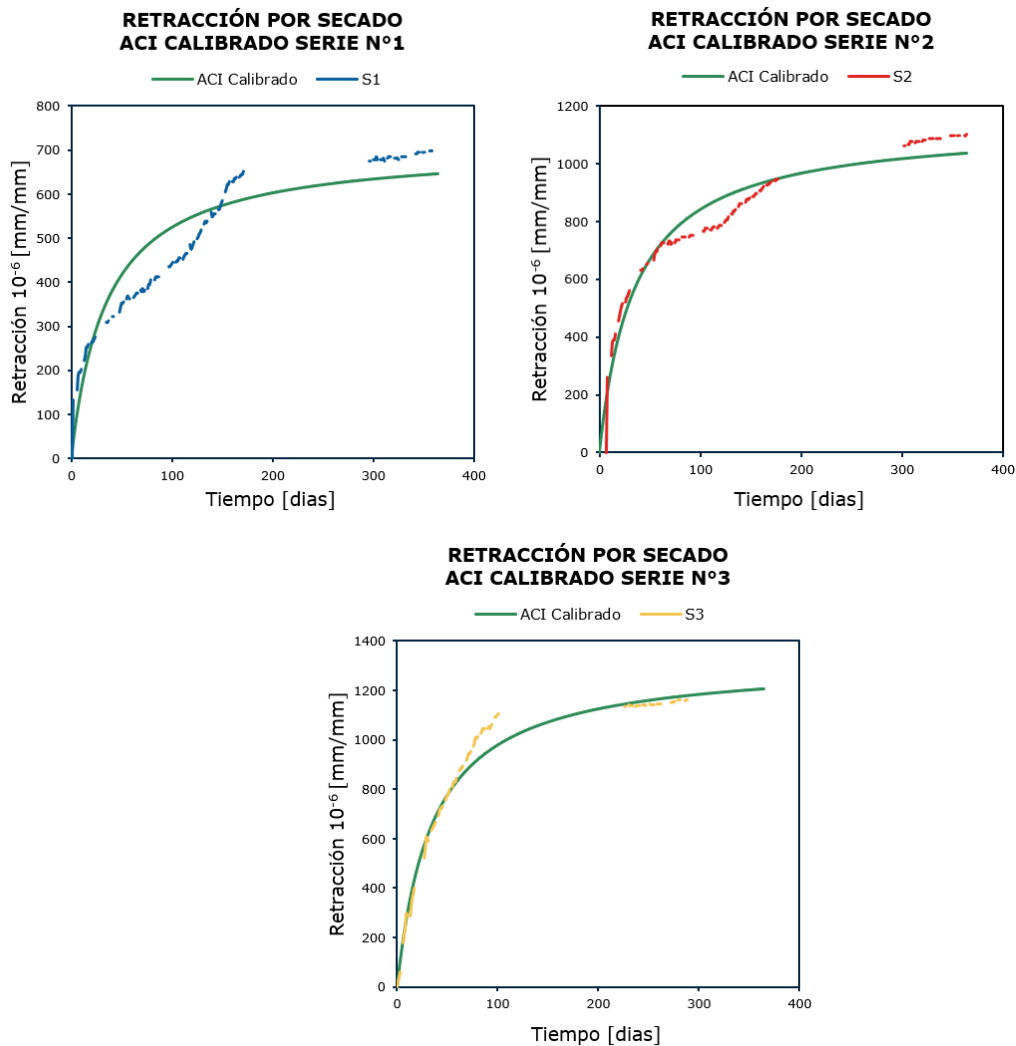


Figura N° 32 Calibración del modelo ACI (1997) para las tres series estudiadas.

5.4.2 Calibración modelo Bažant et al. (2015)

Los resultados de la calibración del modelo Bažant et al. (2015) se muestran en la Figura N°33 para tres series evaluadas. En la Serie N°1, con un FC de 1,703, la curva calibrada logra un ajuste adecuado con los datos experimentales, reproduciendo tanto la magnitud como la tendencia de desarrollo de la retracción. En la Serie N°2, con un FC de 2,444, el modelo calibrado reproduce la tendencia general de la curva experimental durante las primeras edades, aunque hacia el final del período tiende a sobreestimar la deformación experimental. En la Serie N°3, con un FC de 2,882, se observa la mayor discrepancia entre las tres series, con la curva calibrada sobreestimando de manera más marcada los valores experimentales hacia edades avanzadas.

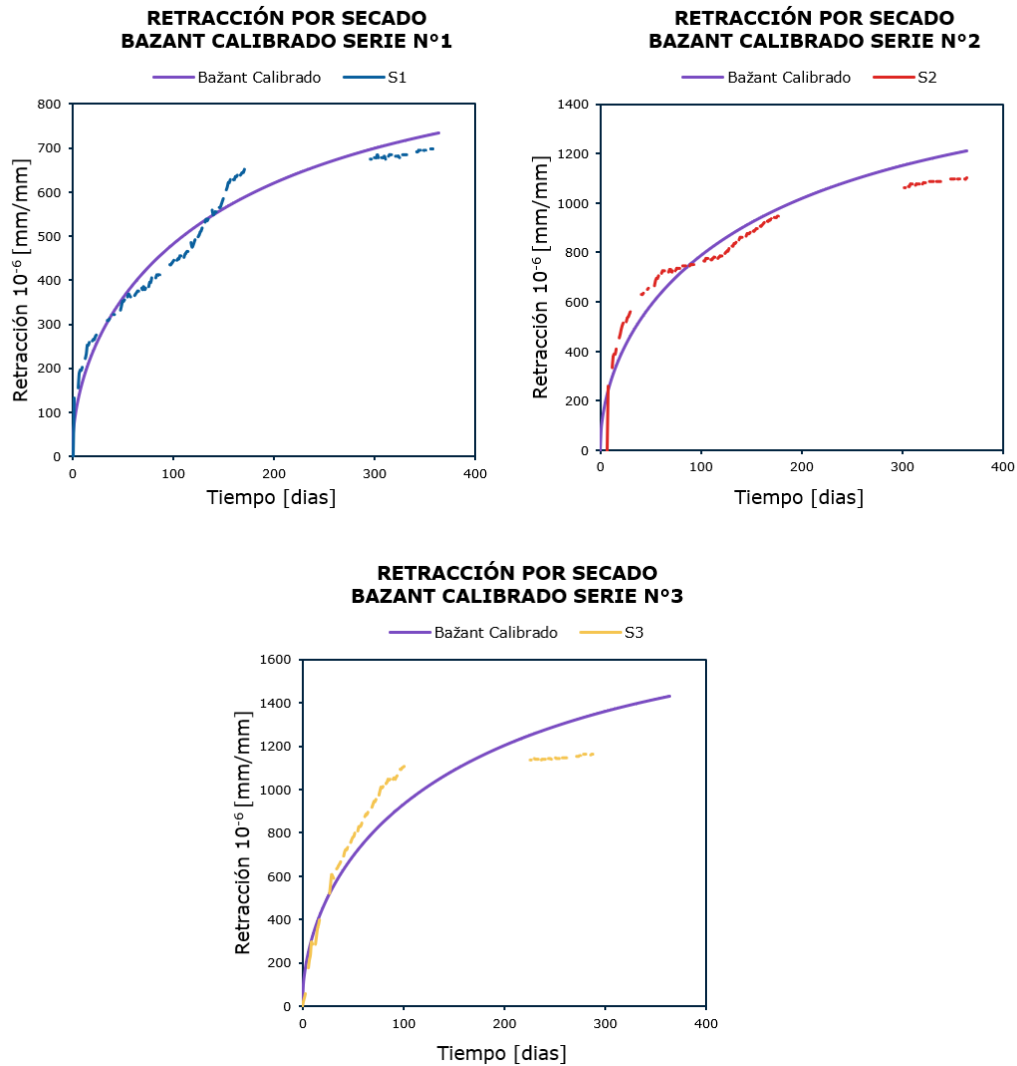


Figura N° 33 Calibración del modelo Bažant et al. (2015) para las tres series estudiadas.

5.4.3 Calibración modelo *fib* (2020)

A partir de la Figura N°34, se observa el desempeño del modelo *fib* (2020) calibrado en comparación con los resultados experimentales de las tres series. En la Serie N°1, con un FC de 1,206, la curva calibrada reproduce adecuadamente los valores experimentales durante las primeras edades, aunque hacia el final del periodo tiende a subestimar la deformación experimental debido a la estabilización temprana del modelo. En la Serie N°2, con un FC de 1,638, se observa un comportamiento similar, con un buen ajuste inicial que se deteriora progresivamente a medida que la curva experimental continúa desarrollándose mientras el modelo se estabiliza. En la Serie N°3, con un FC de 1,867, se presenta la misma tendencia de manera acentuada, con una subestimación creciente hacia edades avanzadas producto de la estabilización prematura del modelo frente al desarrollo sostenido de la retracción experimental.

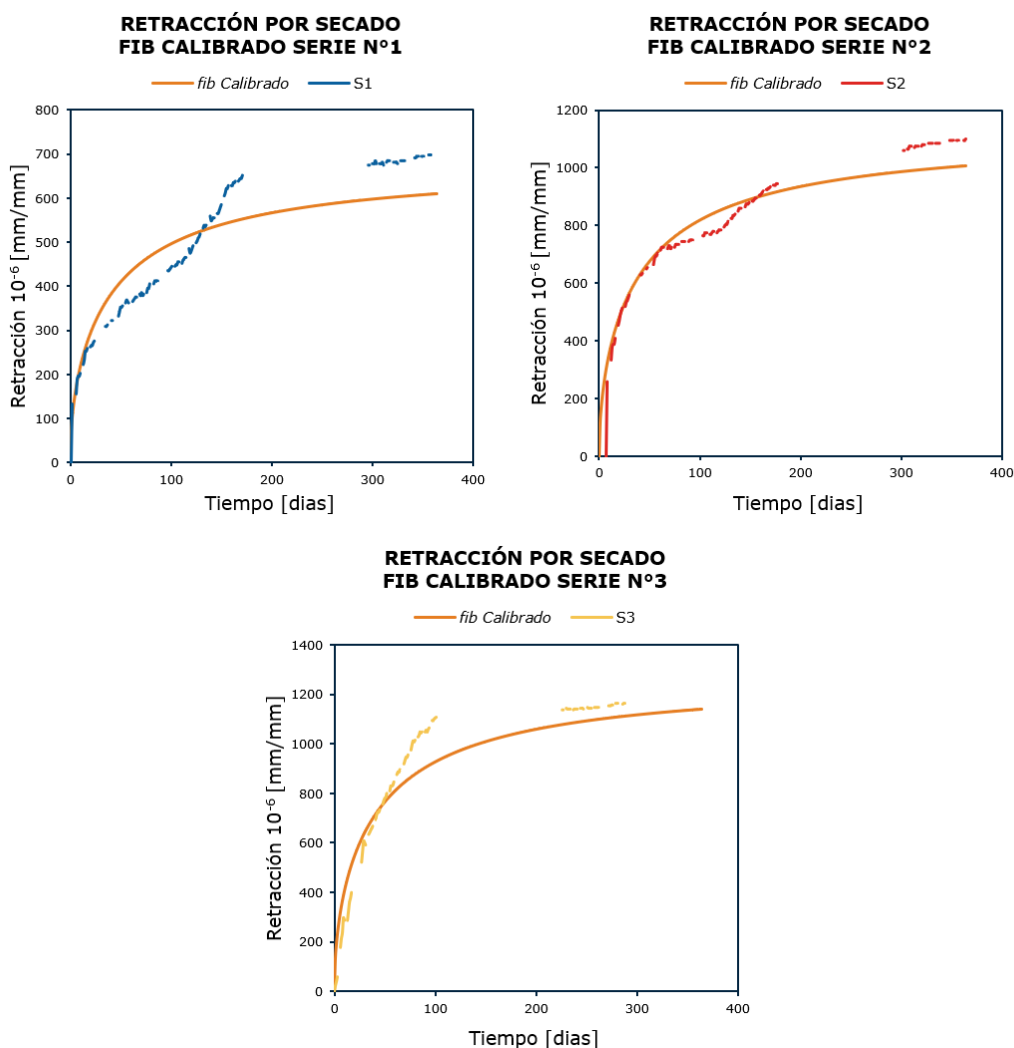


Figura N° 34 Calibración del modelo *fib* (2020) para las tres series estudiadas.

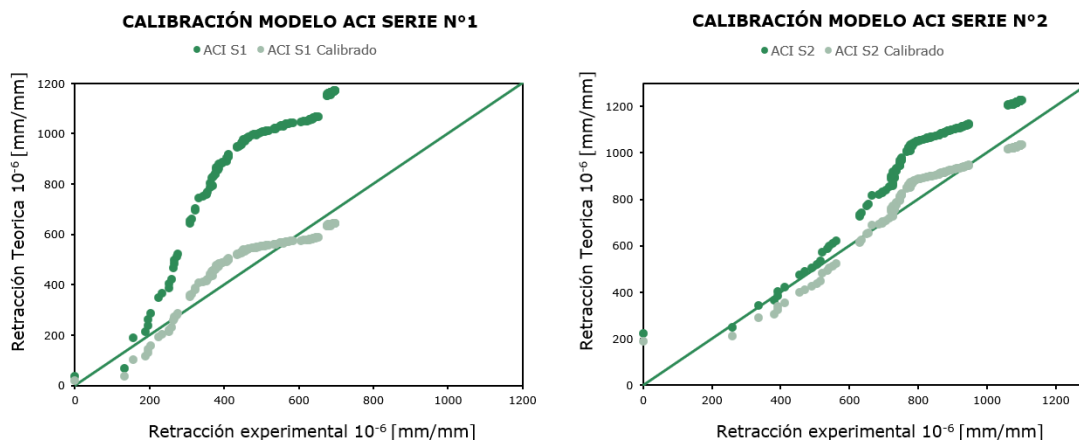
5.5 EVALUACIÓN DEL AJUSTE DE LOS MODELOS CALIBRADOS

Con el propósito de representar gráficamente el ajuste alcanzado mediante la calibración, se compararon las deformaciones de retracción por secado estimadas por cada modelo con los valores obtenidos experimentalmente para las tres series estudiadas. Esta comparación se realizó mediante diagramas de dispersión, en los cuales el eje horizontal corresponde a la retracción experimental y el eje vertical a la retracción teórica. Asimismo, se incorporó una recta de identidad con pendiente igual a uno, que representa la igualdad entre las deformaciones teóricas y experimentales.

En cada gráfico se presentan los resultados del modelo original y aquellos obtenidos después de aplicar los factores de calibración determinados previamente. Los puntos oscuros representan las estimaciones obtenidas con los modelos sin calibrar, mientras que los puntos claros corresponden a las estimaciones obtenidas después de la calibración. La distribución de ambos conjuntos de datos respecto de la recta de identidad permite observar las variaciones producidas por este procedimiento y describir el nivel de proximidad entre las deformaciones teóricas y experimentales.

5.5.1 Evaluación ajuste modelo ACI (1997)

En la Figura N°35 se presenta la relación entre las deformaciones de retracción por secado obtenidas experimentalmente y las estimadas mediante el modelo ACI (1997). En las Series N°1 y N°2, los resultados sin calibrar se ubican principalmente por encima de la recta de identidad y muestran una separación creciente a medida que aumenta la retracción experimental. Después de aplicar la calibración, los puntos se desplazan hacia la recta y presentan una mayor proximidad respecto de los valores experimentales. En cuanto a la Serie N°3, tanto los resultados originales como los calibrados se distribuyen cerca de la recta de identidad, por lo que la separación entre ambos conjuntos de puntos es menos evidente gráficamente.



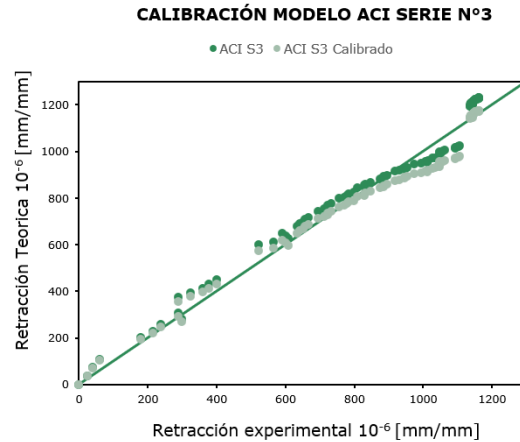
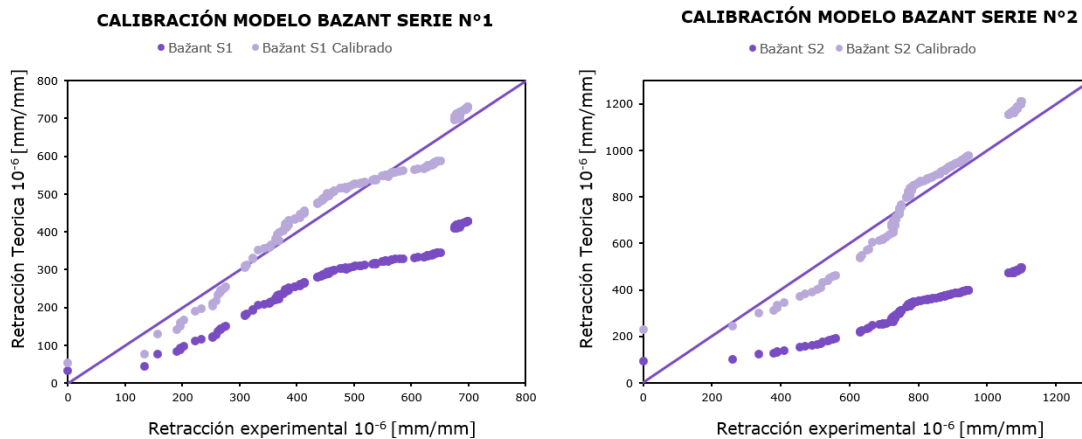


Figura N° 35 Diagramas de dispersión del modelo ACI (1997) para las tres series estudiadas.

5.5.2 Evaluación ajuste modelo Bažant et al. (2015)

Respecto del modelo Bažant et al. (2015), los resultados representados en la Figura N°36 muestran que las estimaciones sin calibrar se sitúan predominantemente por debajo de la recta de identidad en las tres series. La separación respecto de esta línea aumenta hacia las mayores deformaciones experimentales. Tras aplicar la calibración, los puntos se desplazan hacia la recta y se distribuyen alrededor de ella, aunque su posición varía según la serie y el intervalo analizado. En determinados tramos, las estimaciones calibradas se ubican por encima de la recta, mientras que en otros permanecen por debajo.



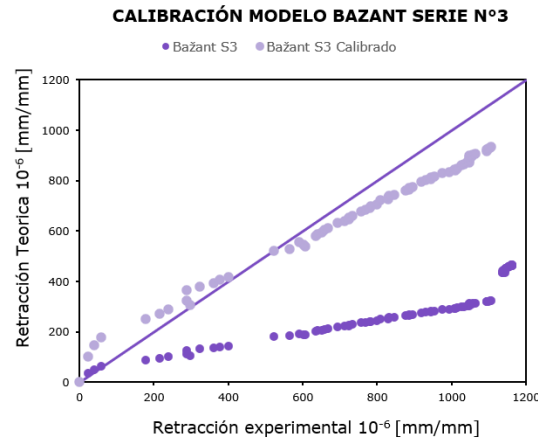
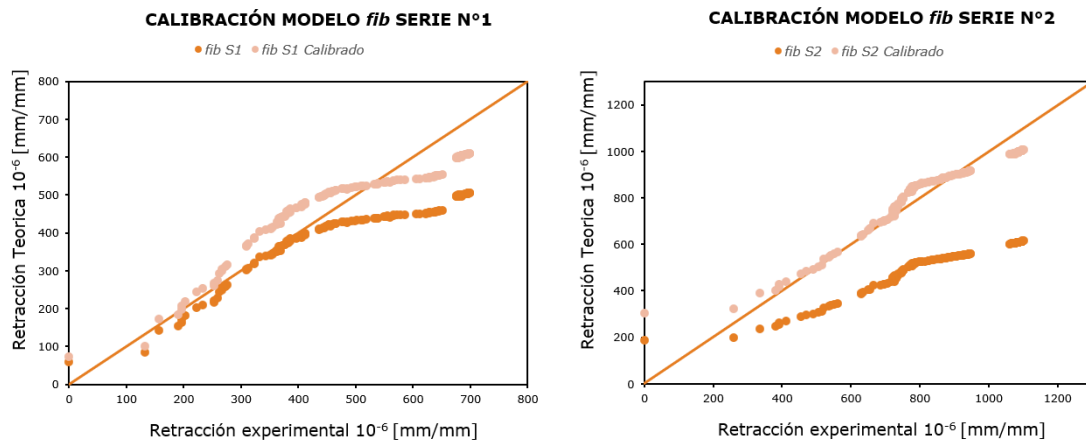


Figura N° 36 Diagramas de dispersión del modelo Bazant et al. (2015) para las tres series estudiadas.

5.5.3 Evaluación ajuste modelo *fib* (2020)

Los resultados obtenidos correspondientes al modelo *fib* (2020), presentados en la Figura N°37, muestran que las estimaciones sin calibrar se ubican principalmente por debajo de la recta de identidad en las tres series. Asimismo, la distancia respecto de esta línea aumenta hacia los valores superiores de retracción experimental. Por su parte, los puntos calibrados presentan una distribución más próxima a la recta, puesto que se sitúan alrededor o por encima de ella en los intervalos iniciales e intermedios, mientras que tienden a ubicarse por debajo en el tramo correspondiente a las mayores deformaciones experimentales.



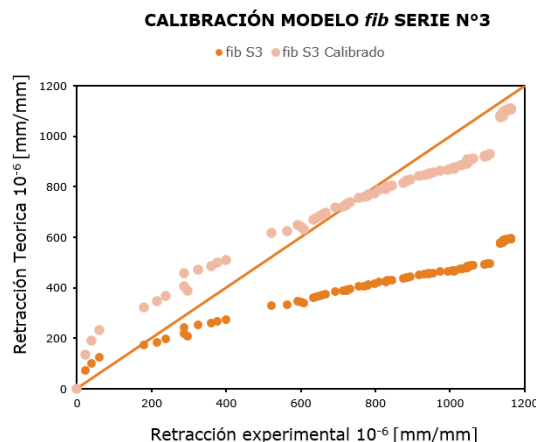


Figura N° 37 Diagramas de dispersión del modelo *fib* (2020) para las tres series estudiadas.

CAPÍTULO 6: DISCUSIONES

Los resultados experimentales evidenciaron diferencias en la magnitud y evolución temporal de la retracción por secado de las tres series estudiadas. La Serie N°1, reforzada con 15 [kg/m³] de fibras de acero y 3,5 [kg/m³] de macrofibras sintéticas, presentó las menores pérdidas de masa y deformaciones. Por su parte, la Serie N°2, con 4 [kg/m³] de macrofibras sintéticas, registró valores intermedios, mientras que la Serie N°3, con 10 [kg/m³] de macrofibras sintéticas, alcanzó los valores más elevados. Esta coincidencia en el orden de la pérdida de masa y la retracción permite establecer una asociación entre la pérdida de humedad y el desarrollo de la retracción, consistente con el mecanismo físico mediante el cual la salida de agua desde la estructura porosa genera tensiones internas y una reducción de volumen en la pasta cementicia (Sakata, 1983; Vinkler y Vítek, 2016).

La Serie N°3 a su vez presentó el desarrollo inicial más acelerado, concentrando una proporción importante de su pérdida de masa y de su retracción durante las primeras edades, mientras que las Series N°1 y N°2 mostraron una evolución más gradual. La ecuación empleada para modelar la pérdida de masa reprodujo adecuadamente las curvas experimentales mediante la calibración individual de sus parámetros para cada serie. Aunque se observó una asociación entre la pérdida de masa y la retracción, esta no fue estrictamente proporcional, ya que la deformación también depende de factores como el volumen de pasta, la proporción y rigidez de los agregados, la porosidad, la relación agua/cemento y las condiciones de curado.

Las Series N°2 y N°3 presentaron un mayor contenido de cemento y una menor proporción de agregados que la Serie N°1. Estas diferencias pudieron contribuir a las mayores deformaciones observadas, debido a que la pasta cementicia constituye la fase principalmente susceptible a la retracción, mientras que los agregados restringen internamente su contracción. Esta interpretación resulta concordante con Pickett (1956), Lyse (1959) y ACI (2005), quienes relacionan el aumento del volumen de pasta y la disminución de la proporción de agregados con un mayor desarrollo de la retracción.

El comportamiento de las series también pudo estar influenciado por el tipo y dosificación de las fibras. Su capacidad para restringir las deformaciones depende de propiedades como la rigidez, la longitud, el contenido y la adherencia con la matriz. Las fibras de acero, debido a su mayor módulo de elasticidad, pueden ejercer una restricción superior a la proporcionada por las fibras sintéticas (Bentur y Mindess, 2007). No obstante, al considerar el conjunto de las tres series, las mezclas estudiadas presentaron diferencias en distintos componentes y no se contó con un hormigón de referencia sin fibras. Por ello, no es posible atribuir exclusivamente a las fibras las diferencias registradas ni establecer una relación causal directa. Su posible influencia debe entenderse como una interpretación sustentada en los antecedentes teóricos.

En particular, las Series N°2 y N°3 presentan una dosificación base equivalente, diferenciándose principalmente en el contenido de macrofibras sintéticas. En este caso, el aumento de 4 a 10 [kg/m³] estuvo acompañado por una mayor retracción por secado y una evolución más acelerada de la deformación durante las primeras edades. Sin embargo, considerando el número limitado de series y probetas estudiadas, este comportamiento debe interpretarse como una tendencia experimental observada y no como una relación causal generalizable entre el contenido de macrofibras y la magnitud de la retracción.

Las diferencias observadas entre la Serie N°1 y las Series N°2 y N°3 no pueden asociarse exclusivamente a la incorporación de fibras, debido a que las dosificaciones también presentan variaciones en el contenido de cemento, agua, agregados, aditivos y adiciones minerales. En particular, la Serie N°1 incorporó humo de sílice y utilizó aditivos distintos en tipo y dosificación respecto de las otras mezclas. Si bien estos componentes no fueron considerados como variables independientes en las formulaciones predictivas aplicadas, pueden modificar la microestructura, porosidad y comportamiento frente al secado del hormigón. No obstante, debido a que estas variables no fueron aisladas experimentalmente, no es posible cuantificar su contribución individual a las diferencias de retracción observadas.

La comparación con los modelos predictivos mostró que ninguna formulación original representó uniformemente las tres series. ACI (1997) sobreestimó principalmente la retracción de las Series N°1 y N°2, pero presentó una mayor proximidad con la Serie N°3. Por el contrario, Bažant et al. (2015) y *fib* (2020) subestimaron las deformaciones experimentales, especialmente en las series que alcanzaron los valores más elevados. En particular, *fib* (2020) mostró una aproximación favorable durante las primeras edades, pero su estabilización anticipada aumentó progresivamente la diferencia respecto de las mediciones. Estas diferencias pueden relacionarse con que las formulaciones fueron desarrolladas utilizando materiales, bases experimentales y condiciones distintas de las consideradas en esta investigación. Aunque incorporan variables como la humedad relativa, edad de inicio del secado, geometría, resistencia, tipo de cemento y características de la dosificación, ninguna incluye directamente el tipo y contenido de fibras. Esto pudo limitar su capacidad para reproducir el comportamiento específico de los hormigones analizados, sin que ello implique necesariamente una deficiencia general de los modelos.

Como parte de esta investigación, se propuso aplicar un factor multiplicativo de corrección uniforme a cada combinación de modelo y serie. Los factores inferiores a uno

redujeron las sobreestimaciones de ACI (1997), mientras que los factores superiores a uno incrementaron las predicciones de Bažant et al. (2015) y *fib* (2020). En general, este procedimiento permitió corregir la magnitud de las estimaciones y mejorar su proximidad con los resultados experimentales. La menor corrección fue requerida por ACI (1997) para la Serie N°3, lo que confirma que su formulación original ya presentaba una concordancia favorable para esa mezcla.

Al comparar estos resultados con los factores K_G propuestos por Videla et al. (2001), debe considerarse que dichos autores analizaron los modelos ACI (1992), CEB (1993) y B3 (1995), para los cuales obtuvieron valores de 1,82, 1,62 y 1,36, respectivamente. En la presente investigación, en cambio, se emplearon formulaciones posteriores ACI (1997), *fib* (2020) y Bažant et al. (2015). La comparación mostró tendencias consistentes entre los modelos CEB (1993) y *fib* (2020), así como entre B3 (1995) y Bažant et al. (2015), puesto que en ambos casos fue necesario incrementar las predicciones originales. En contraste con el modelo ACI (1997) que requirió de factores inferiores a la unidad 0,550, 0,843 y 0,956 para las Series N°1, N°2 y N°3, lo que evidencia una sobreestimación de la retracción. Este comportamiento difiere del observado por Videla et al. (2001) para ACI (1992), cuyo factor K_G de 1,82 indica que fue necesario aumentar la predicción del modelo.

Sin embargo, la proximidad entre algunos valores no implica que los factores sean directamente equivalentes. Videla et al. (2001) ajustaron separadamente la magnitud y la evolución temporal de la retracción hidráulica mediante los factores K_G y K_C , respectivamente. El factor K_G se aplicó a la retracción hidráulica última de los modelos, mientras que K_C modificó la función dependiente del tiempo. En la presente investigación, en cambio, solo se utilizó un único factor multiplicativo sobre la predicción completa de cada modelo. En ACI (1997) y Bažant et al. (2015), este ajuste puede asociarse matemáticamente con una corrección de la magnitud de la retracción. En *fib* (2020), al no existir una variable explícita de retracción última en la formulación empleada, debe interpretarse como un factor global de escala aplicado al resultado completo del modelo. Por consiguiente, la comparación realizada permite contrastar la dirección y magnitud general de las correcciones, pero no atribuir a los factores el mismo significado físico o matemático.

Tras la calibración, el modelo de Bažant et al. (2015) presentó una mejor representación de la evolución temporal de la retracción, debido a que mantuvo una tendencia creciente durante el periodo de análisis, acorde con el comportamiento experimental, sin exhibir la estabilización anticipada observada en las demás formulaciones. No obstante, sus predicciones calibradas tendieron a superar las deformaciones experimentales hacia edades avanzadas. Desde el punto de vista del diseño, esta sobreestimación puede considerarse conservadora, aunque no representa necesariamente una mayor precisión. La aplicación de un factor constante corrigió principalmente la magnitud de las predicciones, sin modificar la función que determina su velocidad y forma de desarrollo. Por esta razón, las curvas calibradas conservaron diferencias de pendiente respecto de las mediciones experimentales. Esta limitación fue particularmente visible en *fib* (2020), cuya estabilización anticipada continuó restringiendo la representación de las deformaciones finales. A diferencia del procedimiento desarrollado por Videla et al. (2001), en esta investigación no se incorporó un factor independiente equivalente a K_C , para calibrar la función temporal.

En consecuencia, la calibración propuesta constituye una primera aproximación para adaptar la magnitud de las predicciones a las condiciones estudiadas, pero no representa una modificación general de las formulaciones originales. Los factores determinados están condicionados por las dosificaciones, las fibras, los materiales, la geometría de las probetas, las condiciones ambientales y la duración del monitoreo. Por lo tanto, su utilización en hormigones diferentes requiere una validación experimental previa. Asimismo, la cantidad limitada de probetas y la exclusión de una probeta de la Serie N°2 reducen la base de datos disponible para representar la variabilidad propia del material.

En términos generales, los resultados permitieron caracterizar la pérdida de masa y la retracción de las tres series, evaluar el desempeño de ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* (2020), y proponer factores específicos para mejorar sus predicciones. La calibración redujo las diferencias globales de magnitud y el modelo de Bažant et al. (2015) presentó la mejor representación de la evolución temporal después del ajuste. Sin embargo, el procedimiento no corrigió completamente las diferencias de pendiente y estabilización de las curvas. Por lo tanto, su principal aporte consiste en proporcionar un ajuste inicial aplicable a los hormigones y condiciones del programa experimental, cuya generalización deberá evaluarse mediante investigaciones complementarias.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

A partir del programa experimental desarrollado, fue posible caracterizar la evolución de la pérdida de masa y de la retracción en tres series de hormigones reforzados con fibras: la Serie N°1, con 15 [kg/m³] de fibras de acero y 3,5 [kg/m³] de macrofibras sintéticas; la Serie N°2, con 4 [kg/m³] de macrofibras sintéticas; y la Serie N°3, con 10 [kg/m³] de macrofibras sintéticas. Además, se evaluó la capacidad predictiva de los modelos ACI (1997), Bažant et al. (2015) y *fib* (2020). En las tres series se observó un rápido desarrollo de la pérdida de masa y de la retracción durante las primeras edades, seguido de una disminución gradual de su velocidad. La Serie N°3 registró los valores más elevados, seguida por la Serie N°2 y finalmente, por la Serie N°1. En particular, la Serie N°1 presentó el mejor comportamiento frente a la retracción por secado entre las dosificaciones evaluadas, al registrar la menor deformación final y un desarrollo más gradual durante el periodo de monitoreo. Esta serie alcanzó una retracción de 698×10^{-6} [mm/mm], inferior a los 1102×10^{-6} [mm/mm] y 1162×10^{-6} [mm/mm] registrados por las Series N°2 y N°3, respectivamente.

La ecuación empleada para modelar la pérdida de humedad reprodujo adecuadamente las curvas experimentales promedio. Asimismo, se observó una asociación entre la pérdida de humedad y la retracción por secado, debido a que las series que presentaron mayor pérdida de masa también desarrollaron mayores deformaciones. Sin embargo, esta relación no fue directamente proporcional, lo que indica que el comportamiento del hormigón depende también de factores como la dosificación, el volumen de pasta, la proporción y rigidez de los agregados, la microestructura y las características de las fibras.

Las diferencias observadas entre las mezclas no pueden atribuirse exclusivamente al tipo o contenido de fibras, puesto que sus dosificaciones también variaron en otros

componentes y no se contó con un hormigón de referencia sin fibras. En consecuencia, no fue posible aislar ni cuantificar individualmente la influencia de cada variable.

Ninguno de los modelos originales representó uniformemente las tres series. ACI (1997) tendió a sobreestimar la retracción de las Series N°1 y N°2, mientras que Bažant et al. (2015) y *fib* (2020) subestimaron principalmente las mayores deformaciones. Aunque *fib* (2020) presentó una aproximación favorable durante las primeras edades, su estabilización anticipada incrementó las diferencias hacia el final del periodo analizado.

Los factores de corrección propuestos mejoraron la concordancia general entre las predicciones y los resultados experimentales. Los factores inferiores a la unidad redujeron las sobreestimaciones de ACI (1997), mientras que aquellos superiores a la unidad incrementaron las estimaciones de Bažant et al. (2015) y *fib* (2020). La comparación con Videla et al. (2001) permitió identificar tendencias similares en algunos modelos, pero sus factores no son directamente equivalentes debido a las diferencias en los procedimientos de calibración.

Luego del ajuste, Bažant et al. (2015) presentó la mejor representación de la evolución temporal entre las formulaciones evaluadas, al mantener una tendencia creciente concordante con los resultados experimentales. Además, hacia edades avanzadas, entregó estimaciones conservadoras al superar las deformaciones medidas. Sin embargo, el factor constante solo corrigió la magnitud de las predicciones, por lo que permanecieron diferencias de pendiente y estabilización.

Los factores obtenidos son específicos para los materiales, dosificaciones, fibras y condiciones experimentales estudiadas, por lo que no deben aplicarse directamente a otros hormigones sin validación previa. La cantidad limitada de probetas, la exclusión de una probeta de la Serie N°2 y la ausencia de una mezcla sin fibras también restringen la generalización de los resultados.

En términos generales, se cumplió el objetivo de caracterizar experimentalmente la pérdida de masa y retracción de los hormigones reforzados con fibras, evaluar el desempeño de las formulaciones seleccionadas y proponer factores de calibración que mejoraron la aproximación global de los modelos a las mediciones realizadas. No obstante, estos factores no corrigieron completamente las diferencias en la evolución temporal de las predicciones.

Como proyección de esta investigación, se considera pertinente ampliar el programa experimental mediante un mayor número de probetas y dosificaciones, incluyendo una mezcla de referencia sin incorporación de fibras. Asimismo, se recomienda mantener constantes los demás componentes de las mezclas, con el propósito de aislar y evaluar la influencia del tipo y contenido de fibras sobre la retracción por secado. Finalmente, resulta necesario estudiar procedimientos de calibración que permitan ajustar tanto la magnitud de las predicciones como su evolución temporal.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS

- ACI Committee 209. (1982). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*. (Reapproved 1992). American Concrete Institute.
- ACI Committee 209. (1992). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*. (ACI 209R-92, Reapproved 1997). American Concrete Institute.
- ACI Committee 209. (2005). *Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete*. (ACI 209.1R-05). American Concrete Institute.
- ACI Committee 224. (2001). *Control of cracking in concrete structure*. (ACI 224R-01). American Concrete Institute.
- ACI Committee 544. (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. (ACI 544.1R-96, Reapproved 2002). American Concrete Institute.
- Al-Saleh, S. A. y Al-Zaid, R. Z. (2006). *Effects of drying conditions, admixtures, and specimen size on shrinkage strains*. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1985-1991. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.005>
- Andrade, C. y Sanjuán, M. A. (2021). *Carbon dioxide uptake by pure portland and blended cement pastes*. *Developments in the built environment*, 8, Artículo 100063. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100063>
- Bazant, Z. y Baweja, S. (1995). *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – model B3*. *Materials and Structures*, 28(6), 357-365. <https://doi.org/10.1007/BF02473152>
- Bazant, Z. P., Hubler, M. H., Wendner, R. y RILEM Technical Committee TC-242-MDC. (2015). *Model B4 for creep, drying shrinkage, and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability*. *Materials and Structures*, 48(3), 753-770. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0485-2>
- Benboudjema, F., Meftah, F. y Torrenti, J. M. (2005). *Structural effects of drying shrinkage*. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(11), 1195-1199. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2005\)131:11\(1195\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:11(1195))
- Bentur, A. y Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Blanks, R. F., Vidal, E. N., Prince, W. H. y Russell, F. M. (1940). *The Properties of Concrete Mixtures*. *Journal of The American Concrete Institute*, 36, 433-476.

- Branson, D. E. y Christianson, M. L. (1971). *Time dependent Concrete Properties Related to Design – Strength and Elastic Properties, Creep and Shrinkage. Symposium Paper*, 27, 257-278. [10.14359/17187](https://doi.org/10.14359/17187)
- Cabrera, J. G., Cusens, A. R. y Brookes-Wang, Y. (1992). *Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete. Magazine of Concrete Research*, 44(106), 149-155. <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.160.149>
- Comité Euro-International du Béton (CEB). (1993). *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990*. Thomas Telford Ltd.
- Fernández Cánovas, M. (1999). *Hormigón: Adaptado a la Instrucción de Cementos RC-97 y a la Institución de Hormigón Estructural EHE-98* (5th ed.).
- Fu, D., Xia, C., Xu, S., Zhang, C. y Jia, X. (2022). *Effect of concrete composition on drying shrinkage behavior of ultra-high-performance concrete. Journal of Building Engineering*, 62, Artículo 105333. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105333>
- Grež, F. (2004). *Estudio del fenómeno de retracción en hormigones modificados con polímeros. Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María*. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/59604>
- Instituto Nacional de Normalización. (2016). *Hormigón – Requisitos Generales*. (NCh 170 Of. 2016).
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento*. (NCh 1017 Of. 2009).
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio*. (NCh 1018 Of. 2009).
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). *Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams*. (NCh 1019 Of. 2009).
- Instituto Nacional de Normalización. (2010). *Hormigón y mortero – Métodos de ensayo – Determinación de los cambios de longitud*. (NCh 2221 Of. 2010).
- International Federation for Structural Concrete (fib). (2023). *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. Ernst & Sohn.
- Lyse, I. (1959). *The shrinkage and creep of concrete. Magazine of Concrete Research*, 11(33), 143-150. <https://doi.org/10.1680/mac.1959.11.33.143>

- Markovski, G., Čećez, M. y Šahinagić-Isović, M. (2012). *Shrinkage strain of concrete – causes and types*. *Građevinar*, 64(9), 727–734. <https://doi.org/10.14256/JCE.719.2012>
- Mazzoli, A., Monosi, S. y Plescia, E. S. (2015). *Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods*. *Construction and Building Materials*, 101(1), 596-601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090>
- Mora-Raucha, J., Gettu, R. y Aguado, A. (2009). *Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage*. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.011>
- Muller, H. S. y Pristl, M. (1993). *Creep and Shrinkage of Concrete at Variable Ambient Conditions*. *Creep and Shrinkage of Concrete: Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, Z. P. Bazant and I. Carol. E&FN Spon.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of concrete* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Norambuena, C. (2000). *La retracción en hormigones para pavimentos*. *Memoria de pregrado*, Universidad Técnica Federico Santa María. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/52546>
- O'Moore, L., Dux, P. F., Morris, P. H. y Dao, V. T. N. (2010). *Plastic Shrinkage Cracking of Concrete*. *Australian Journal of Structural Engineering*, 10(3), 207-214. <http://dx.doi.org/10.1080/13287982.2010.11465045>
- Perenchio, W. F. (1997). *The Drying Shrinkage Dilemma Some Observations and Questions About Drying Shrinkage and its Consequence*. *Concrete Construction*, 42(4), 379-383. <https://es.scribd.com/document/489993656/Drying-shinkage-dilemma>
- Persson, B. (2002). *Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete*. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1229-1237. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00764-0](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00764-0)
- Pezo, J. (2002). *Retracción de hormigones autocompactantes elaborados con cemento de alta resistencia*. *Memoria de pregrado*, Universidad Técnica Federico Santa María. <https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/67940>
- Pickett, G. (1956). *Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage*. *Journal of The American Concrete Institute*, 52(36), 581-590. <https://archive.org/details/EffectOfAggregateOnShrinkageOfConcreteAndHypothesisConcerning/page/585/mode/1up>

- Polpaico. (2018). *Retracción plástica [Informe técnico]*. <https://www.polpaico.cl/wp-content/uploads/2023/05/HDS-RETRACCION-PLASTICA.pdf>
- Ramírez, R., Chagoyén, E. L. y Martirena, J. F. (2019). *Assessment of factors influencing the development of drying shrinkage in concretes produced in Cuba*. *Obras y Proyectos*, 26, 100-112. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132019000200100%20>
- Sakata, K. (1983). *A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete*. *Cement and Concrete Research*, 13(2), 216-224. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90104-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90104-7)
- Shurbert-Hetzel, C., Daneshvar, D., Robisson, A., y Shafei, B. (2023). *Data-enabled comparison of six prediction models for concrete shrinkage and creep*. *Case Studies in Construction Material*, 19, Artículo e02406. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02406>
- Tazawa, E. y Miyazawa, S. (1995). *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste*. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 281-287. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00010-0)
- Tazawa, E. y Miyazawa, S. (1995). *Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete*. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1633-1638. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00159-x](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00159-x)
- Videla, C., Covarrubias, J. P., y Masana, C. (2001). *Calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica a hormigones fabricados con cementos chilenos*. *Revista Ingeniería de Construcción*, 16(1), 5-17.
- Vinkler, M. y Vítek, J. L. (2016). *Drying concrete: experimental and numerical modeling*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), Artículo 04016070. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001577](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001577)
- Wang, X., Chang, H., Li, S., Jia, Y., Kong, Z., Wang, Y., Liu, J. y Feng, P. (2024). *Influence of low vacuum and high temperature condition moisture transport and dry shrinkage of mature concrete*. *Journal of Building Engineering*, 95, Artículo 110262. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110262>
- Xue, L., Zhang, Z., Liu, H., Jiang, Y. y Wang, H. (2022). *Drying shrinkage behavior of hybrid alkali activated cement (HAAC) mortars*. *Construction and Building Materials*, 316, Artículo 126068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126068>
- Yin, Z., Ge, M., Yang, Y. y Wu, Y. (2011). *An experimental study on the influence of curing temperature on autogenous shrinkage of high strength/performance concrete*. 2011

CAPÍTULO 9: ANEXOS

9.1 DATOS OBTENIDOS EN MEDICIÓN DE PROBETAS

Tabla N° 13 Datos obtenidos de pérdida de masa y retracción por secado de probetas estudiadas.

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
0	0	0	0			0
1	1	5	7	0		23
2	1	11	12	133		40
3			18			59
4						
5		23				
6	7	26	32	156		178
7	9	28	37	190	0	215
8	10	31	41	196	260	238
9	12		48	196		297
10	13		52	203		287
11						
12		42			335	
13	18	45	62	223	381	287
14	20	47	66	233	391	324
15	21	50	68	253	391	360
16	22	52	70	253	411	376
17	23		72	259		400
18						
19		61			456	
20	23	63		263	471	
21	23	66		266	491	
22	24	68		266	506	
23	25	69		273	516	
24	25			276		
25						
26		70			521	
27		71	91		536	522
28		72	93		541	565
29		74	94		551	608
30		75	95		561	601
31			96			591
32						

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
33						
34			102			634
35	31		103	309		641
36	31		104	309		651
37	31		105	313		657
38			106			667
39						
40						
41	32	86	110	323	631	693
42	32	86	112	323	631	713
43		86	113		636	723
44			113			723
45			114			733
46						
47		88			651	
48	33	88	118	333	656	756
49	33		119	343		769
50	33		120	353		779
51	34		121	353		783
52	34		122	356		799
53						
54		90			666	
55	35	91	125	363	686	809
56	34	91	126	369	696	829
57	34	92	127	366	696	829
58	34	93	129	363	706	832
59			131			845
60						
61		94			716	
62	35	93	134	366	726	875
63	35	93	135	369	726	885
64	37	94	136	373	726	885
65	36		137	376		895
66	37			376		
67						
68		95			721	
69	40	95	141	382	731	918
70	41	96	142	379	731	931
71	40	96	143	386	721	944
72	39	97	143	379	726	944
73	39		144	382		954
74						
75		98			726	

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
76	41	101	147	386	736	974
77	41	101	149	396	736	994
78	41	101	149	396	736	1010
79	42	102	150	406	736	1007
80	42		151			1014
81						
82		102			746	
83	44	103	153	406	746	1027
84	44	104	154	412	746	1034
85	44	105	154	412	746	1047
86	44	106	154	412	746	1043
87	44		154	412		1047
88						
89		107			746	
90		108	155		751	1047
91		109	155		751	1053
92		109	156		751	1047
93		109	156		751	1057
94			156			1063
95						
96						
97	46		158	436		1093
98	46		158	436		1093
99	46		158	439		1100
100	46		158	442		1103
101	46		159	446		1106
102						
103		113			766	
104	47	113		446	766	
105	48	113		449	776	
106	48	113		449	776	
107	48	113		456	776	
108	48			456		
109						
110		114			771	
111	49	115		452	771	
112	49	115		459	776	
113	49	116		462	781	
114	49	116		466	781	
115	49			466		
116						
117		118			776	
118	51	118		486	781	

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
119	51	118		476	786	
120	51	118		479	786	
121	51	118		486	786	
122	51			492		
123						
124		120			796	
125	52	120		499	801	
126	52	121		502	806	
127	53	120		509	806	
128	54	121		512	816	
129	54			519		
130						
131		122			826	
132	55	123		532	826	
133	55	124		539	836	
134	55	125		536	836	
135	56	125		539	841	
136						
137						
138		126			851	
139	56	127		560	861	
140	57	127		549	861	
141	57	128		552	861	
142	57			555		
143	58			555		
144						
145		130			866	
146	58	131		565	876	
147	59	131		565	876	
148	59	132		572	876	
149	59	133		579	881	
150	59			585		
151						
152		133			886	
153	60	134		605	886	
154	60	134		612	891	
155	61	134		622	896	
156	60	135		622	896	
157	60			629		
158						
159		136			906	
160	61	136		629	906	
161	61	137		629	911	

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
162	61	136		635	916	
163	62	136		635	921	
164	63			639		
165						
166		137			926	
167	63	137		639	926	
168	63	137		642	931	
169	63	138		645	931	
170	63	138		645	936	
171	64			652		
172						
173		139			941	
174		139			941	
175		139			941	
176		139			946	
177		139			946	
178						
179						
180						
181						
182						
183						
184						
185						
186						
187						
188						
189						
190						
191						
192						
193						
194						
195						
196						
197						
198						
199						
200						
201						
202						
203						
204						

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
205						
206						
207						
208						
209						
210						
211						
212						
213						
214						
215						
216						
217						
218						
219						
220						
221						
222						
223						
224						
225						
226			203			1136
227			203			1136
228						
229						
230			203			1143
231			203			1139
232			203			1139
233			203			1139
234			203			1139
235						
236						
237			203			1136
238			204			1139
239			204			1139
240			204			1139
241			204			1139
242						
243						
244			204			1143
245			205			1143
246			205			1143
247			205			1139

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
248						
249						
250						
251			206			1146
252			206			1143
253			206			1143
254			206			1143
255			207			1143
256						
257						
258			207			1146
259			207			1146
260			207			1146
261			207			1146
262			207			1146
263						
264						
265						
266						
267						
268						
269						
270						
271						
272			206			1152
273			207			1152
274			207			1152
275			207			1156
276			207			1156
277						
278						
279			208			1162
280			208			1162
281			208			1162
282						
283						
284						
285						
286			207			1159
287			207			1162
288			206			1162
289						
290						

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
291						
292						
293						
294						
295						
296	88			675		
297	88			675		
298						
299						
300	88			678		
301	88			678		
302	88	175		678	1061	
303	88	175		685	1061	
304	88			678		
305						
306		176			1066	
307	88	176		678	1066	
308	89	176		678	1077	
309	89	176		678	1077	
310	88	176		682	1077	
311	88			675		
312						
313		176			1071	
314	89	177		682	1077	
315	89	177		685	1077	
316	90	177		685	1077	
317	90	177		685	1077	
318						
319						
320		177			1077	
321	90	178		682	1082	
322	91	178		682	1082	
323	91	178		682	1082	
324	91			682		
325	91			678		
326						
327		178			1087	
328	92	179		685	1087	
329	91	179		685	1087	
330	91	179		685	1087	
331	91	179		685	1087	
332	91			685		
333						

Tiempo [días]	Pérdida de masa [g]			Retracción por secado [10^{-6} mm/mm]		
	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3	Serie N°1	Serie N°2	Serie N°3
334		180			1087	
335		179			1087	
336		180			1087	
337		180			1087	
338		180			1087	
339						
340						
341						
342	90			692		
343	91			692		
344	91			695		
345	91			695		
346	91			695		
347						
348		179			1097	
349	91	180		695	1097	
350	90	180		695	1097	
351	91	180		695	1097	
352		180			1097	
353						
354						
355		181			1097	
356	91	181		698	1097	
357	91	181		698	1097	
358	91			698		
359						
360						
361						
362		180			1097	
363		180			1097	
364		179			1102	