

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES FÍSICAS Y DE
TRANSPORTE EN HORMIGONES COMERCIALES DE LA REGIÓN”**

Estudiante: Navarrete Malén Evelin.

Director: Ing. Civil Ariel González

Co-Director: Dr. Ing. Lautaro R. Santillán

Agradecimientos

A mi director, Ariel González, por acompañarme con su experiencia y su mirada práctica desde el primer día, por la generosidad con la que compartió su conocimiento del hormigón y por la buena onda con la que hizo más amenos los días de trabajo en la planta.

A mi co-director, Lautaro Santillán, por guiarme a lo largo de todo el proceso, por su predisposición y por compartir conmigo su conocimiento y su mirada crítica en cada etapa del trabajo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, por la formación recibida durante toda la carrera. En particular, al Laboratorio de Hormigón y a su equipo de trabajo, por el acompañamiento técnico y el espacio brindado para el desarrollo experimental de este trabajo.

A Hormigonera del Interior (HDI S.R.L.), por hacer posible este trabajo a través de la provisión de los materiales, el acceso a sus instalaciones y la información técnica compartida.

A mi familia, por el apoyo incondicional, el aliento y la paciencia durante todos estos años de carrera. Sin ellos este camino no habría sido posible.

A mis amigos y compañeros que me dio la facultad, por hacer que el tránsito por estos años fuera mucho más liviano y, sobre todo, compartido.

A Ignacio, que me acompaña desde el 2020, por haber estado en cada etapa de este camino – incluso ayudándome en el laboratorio – y por apoyarme siempre.

Resumen

La durabilidad del hormigón armado constituye un factor determinante en la vida útil de las estructuras y se encuentra estrechamente vinculada a sus propiedades físicas y de transporte. En Argentina, el reglamento CIRSOC 201 establece requisitos prestacionales para hormigones expuestos a ambientes de agresividad media a alta, definiendo límites para las propiedades de transporte.

En el presente trabajo se evaluaron experimentalmente las propiedades mecánicas, físicas y de transporte de cinco hormigones comerciales elaborados con materias primas de la región, abarcando tres categorías resistentes (H21, H25 y H30) y dos tipos de cemento de uso habitual: Cemento Portland con Filler Calcáreo (CPF 40) y Cemento Portland Puzolánico (CPP 40 ARS). Cada mezcla fue sometida a dos regímenes de curado – húmedo (CH) y seco (CS) – con el objetivo de analizar la incidencia conjunta del nivel resistente, el tipo de cemento y las condiciones de curado sobre el comportamiento del material.

Se realizaron ensayos de consistencia (IRAM 1536), contenido de aire (ASTM C231), peso unitario (IRAM 1562), resistencia a la compresión simple (IRAM 1546), velocidad de succión capilar (IRAM 1871) y absorción y densidad (ASTM C642).

Los resultados evidenciaron una fuerte influencia del régimen de curado sobre el desarrollo de la resistencia mecánica y de las propiedades de transporte, con un efecto más pronunciado en mezclas de mayor nivel resistente. El tipo de cemento se identificó como el factor de mayor incidencia sobre la VSC, donde los hormigones con CPP 40 ARS presentaron reducciones entre el 30% y el 50% respecto de sus pares con CPF 40, evidenciando el efecto refinador de las puzolanas sobre la red capilar.

El análisis de las correlaciones mostró una relación inversa clara entre la resistencia a la compresión y absorción, mientras que la VSC no presentó una correlación directa con la resistencia, confirmando que este parámetro depende fundamentalmente de la conectividad y tortuosidad de la red porosa más que de la porosidad total.

Se espera que este trabajo contribuya al desarrollo de las capacidades técnicas del Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue.

Palabras clave: hormigón comercial, durabilidad, velocidad de succión capilar, curado, cemento puzolánico.

Abstract

The present work addresses the experimental evaluation of five commercial concretes produced in the region, with the aim of characterizing their fresh and hardened state properties and analyzing the influence of cement type and curing regime on their mechanical and transport-related performance. The evaluated mixtures combine three strength categories (H21, H25, and H30) with two commercially available cement types — CPF 40 with limestone filler and CPP 40 ARS with pozzolanic additions — and were tested under two curing regimes: dry curing (DC) and wet curing (WC).

The experimental program included fresh state tests (slump, air content, and unit weight) and hardened state tests aimed at evaluating both mechanical properties (compressive strength) and transport properties related to durability (capillary suction velocity according to IRAM 1871 standard, and absorption and density according to ASTM C642).

The results showed that cement type is the factor with the greatest influence on transport properties: mixtures containing pozzolanic CPP 40 ARS cement exhibited capillary suction velocity values significantly lower than their counterparts with CPF 40 cement, with reductions ranging from 30 to 50 % for equal strength categories. Wet curing demonstrated a positive effect on the mechanical strength of all mixtures, as well as a reduction in capillary suction velocity for medium- and high-strength mixtures. The correlation analysis between parameters revealed an inverse correlation between compressive strength and absorption, while no significant correlation was found between compressive strength and capillary suction velocity, which highlights the relevance of incorporating this test as a complementary tool for the characterization of concrete durability.

The relative trends identified constitute a methodologically valid contribution and open specific lines of continuity, oriented toward verification under strictly controlled laboratory conditions and toward the analysis of additional transport mechanisms.

Keywords: commercial concrete, durability, capillary suction velocity, curing, pozzolanic cement.

Índice General

1.	Introducción	1
1.	Marco teórico y antecedentes	2
2.1.	Durabilidad del hormigón	2
2.2.	Estructura porosa del hormigón	2
2.3.	Fenómenos de transporte en el hormigón	3
2.4.	Influencia del curado en la durabilidad.....	4
2.5.	Influencia del tipo de cemento	5
2.	Materiales y metodología	5
3.1.	Materiales	6
3.1.1.	Agregados.....	6
3.1.2.	Cementos	6
3.1.3.	Aditivos.....	7
3.1.4.	Agua de amasado	7
3.2.	Dosificación y Regímenes de Curado	7
3.2.1.	Diseño de mezclas industriales	7
3.2.2.	Elaboración y curado de probetas (Norma IRAM 1534)	9
3.3.	Ensayos en Estado Fresco	10
3.3.1.	Ensayo de consistencia (Norma IRAM 1536)	10
3.3.2.	Contenido de aire (Norma ASTM C231)	12
3.3.3.	Peso unitario por unidad de volumen (Norma IRAM 1562)	12
3.4.	Ensayos en Estado Endurecido.....	13
3.4.1.	Ensayo de compresión (Norma IRAM 1546)	13
3.4.2.	Ensayo de VSC (Norma IRAM 1871)	14
3.4.3.	Ensayo de absorción y densidad (Norma ASTM C642)	15
3.5.	Implementación de procedimientos experimentales	16
4.	Resultados y análisis.....	18
4.1.	Ensayos en estado fresco	18
4.1.1.	Ensayo de Consistencia (IRAM 1536)	18
4.1.2.	Contenido de aire (ASTM C231)	19
4.1.3.	Peso unitario por unidad de volumen (IRAM 1562)	19
4.2.	Estado endurecido	20
4.2.1.	Ensayo de compresión (Norma IRAM 1546)	20

4.2.2. Ensayo de VSC (Norma IRAM 1871)	21
4.2.3. Ensayo de Absorción y Densidad (Norma ASTM C642)	41
4.3. Correlaciones	43
5. Conclusiones	45
5.1. Estudios futuros	46
Bibliografía	47

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de fenómenos de transporte.....	4
Figura 2. Equipamiento utilizado para la elaboración de probetas.....	9
Figura 3. Conservación inicial de probetas tras el moldeo.	10
Figura 4. (a) Curado húmedo en pileta. (b) Curado seco con envoltura de film.	10
Figura 5. Esquema de ensayo de asentamiento – Cono de Abrams.....	11
Figura 6. Determinación del asentamiento. (a) Equipamiento utilizado. (b) Medición del asentamiento sobre el hormigón recién desmoldado.....	11
Figura 7. Determinación del contenido de aire conforme norma ASTM C231.	12
Figura 8. Determinación del peso unitario por unidad de volumen (PUV) según norma IRAM 1562.	13
Figura 9. Equipamiento empleado para el ensayo de Resistencia a la Compresión Simple. (a) Prensa hidráulica. (b) Probeta posicionada previa al inicio del ensayo.....	14
Figura 10. Probeta tras ensayo de resistencia a la compresión simple.	14
Figura 11. Ensayo de velocidad de succión capilar (VSC) conforme norma IRAM 1871. (a) Probetas impermeabilizadas previas al ensayo. (b) Probetas durante la ejecución del ensayo, en contacto con la lámina de agua.	15
Figura 12. Ensayo de absorción y densidad conforme norma ASTM C642. (a) Probetas previas al ensayo. (b) Probetas en el horno durante el proceso de secado.....	16
Figura 13. Procedimiento de impermeabilización lateral de doble barrera. (a) Aplicación de primera capa de pintura epoxi y segunda capa de cinta de aluminio. (b) Probetas con sistema de impermeabilización completo, listas para el acondicionamiento previo al ensayo.	17
Figura 14. Preparación de probetas tras el corte transversal.....	18
Figura 15. Valores de asentamiento obtenidos según norma IRAM 1536.	18
Figura 16. Contenido de aire incorporado [%] para las cinco mezclas evaluadas.	19
Figura 17. Peso unitario por unidad de volumen [kg/m^3] de las mezclas evaluadas en estado fresco, según norma IRAM 1562.....	20
Figura 18. Resistencia a la compresión a 28 días [MPa] discriminadas según régimen de curado.	21
Figura 19. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H30F bajo régimen de curado seco (CS).	22
Figura 20. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H30F bajo régimen de curado húmedo (CH).	22

Figura 21. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H30F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°5.	23
Figura 22. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H30F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.....	24
Figura 23. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25F bajo régimen de curado seco (CS).	25
Figura 24. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25F bajo régimen de curado húmedo (CH).	25
Figura 25. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.....	26
Figura 26. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.....	27
Figura 27. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21F bajo régimen de curado seco (CS).	29
Figura 28. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21F bajo régimen de curado húmedo (CH).	29
Figura 29. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.....	30
Figura 30. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.....	31
Figura 31. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25P bajo régimen de curado seco (CS).	32
Figura 32. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25P bajo régimen de curado húmedo (CH).	33
Figura 33. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25P bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.....	34
Figura 34. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25P bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.....	35
Figura 35. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21P bajo régimen de curado seco (CS).	36
Figura 36. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21P bajo régimen de curado húmedo (CH).	36
Figura 37. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21P bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.....	37

Figura 38. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21P bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.....	38
Figura 39. Valores promedio de velocidad de succión capilar para hormigones con cemento CPF 40, discriminada por tipo de curado.	40
Figura 40. Velocidad de succión capilar para hormigones con cemento CPP 40 ARS, discriminada por tipo de curado.	41
Figura 41. Absorción de agua [%] para las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el régimen de curado, según norma ASTM C642.	42
Figura 42. Densidad aparente [kg/m ³] de las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el régimen de curado, según norma ASTM C642.	43
Figura 43. Correlación entre la velocidad de succión capilar y la absorción para las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el tipo de cemento empleado (puntos oscuros: cemento CPF 40; puntos claros: cemento CPP 40 ARS).	44
Figura 44. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Absorción.	44
Figura 45. Correlación entre VSC y Resistencia a la Compresión.	45

Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades agregado fino – Arena de río.....	6
Tabla 2. Propiedades agregado grueso – Canto rodado (6/25 mm).	6
Tabla 3. Propiedades Cemento Portland Fillerizado.....	6
Tabla 4. Propiedades Cemento Portland Puzolánico.....	7
Tabla 5. Aditivos utilizados.	7
Tabla 6. Dosificación de las mezclas evaluadas.	8
Tabla 7. Velocidad de succión capilar – Mezcla H30F.	24
Tabla 8. Velocidad de succión capilar – Mezcla H25F.	28
Tabla 9. Velocidad de succión capilar – Mezcla H21F.	31
Tabla 10. Velocidad de succión capilar – Mezcla H25P.	35
Tabla 11. Velocidad de succión capilar – Mezcla H21P.	39

Simbología utilizada

<i>ARS</i>	Alta Resistencia a los Sulfatos
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CH</i>	Curado Húmedo
<i>CIRSOC</i>	Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles
<i>CPF</i>	Cemento Portland con Filler Calcáreo
<i>CPP</i>	Cemento Portland Puzolánico
<i>CS</i>	Curado Seco
<i>C-S-H</i>	Silicato de Calcio Hidratado
<i>FAIN</i>	Facultad de Ingeniería
<i>HDI</i>	Hormigonera del Interior S.R.L.
<i>INTI</i>	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
<i>IRAM</i>	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
<i>LHO</i>	Laboratorio de Hormigones
<i>PUV</i>	Peso Unitario por Unidad de Volumen
<i>SSS</i>	Saturado Superficie Seca
<i>TMN</i>	Tamaño Máximo Nominal
<i>UNCo</i>	Universidad Nacional del Comahue
<i>VSC</i>	Velocidad de Succión Capilar
<i>H21F</i>	Hormigón H21 elaborado con cemento CPF 40
<i>H21P</i>	Hormigón H21 elaborado con cemento CPP 40 ARS
<i>H25F</i>	Hormigón H25 elaborado con cemento CPF 40
<i>H25P</i>	Hormigón H25 elaborado con cemento CPP 40 ARS
<i>H30F</i>	Hormigón H30 elaborado con cemento CPF 40
<i>A</i>	Peso seco de la probeta [g]
<i>a/c</i>	Relación agua / cemento
<i>Abs</i>	Absorción de agua [%]
<i>B</i>	Peso saturado superficie seca [g]

C	Peso sumergido [g]
Den	Densidad aparente [kg/m ³]
f_c	Resistencia característica de diseño a la compresión [MPa]
R_c	Resistencia a la compresión simple [MPa]
R^2	Coefficiente de determinación de la regresión lineal
t	Tiempo [s]
$\sqrt{t}$	Raíz cuadrada del tiempo [$\sqrt{s}$]
VSC	Velocidad de succión capilar [g/(m ² · $\sqrt{s}$)]

1. Introducción

Tradicionalmente, la calidad del hormigón ha sido evaluada mediante su resistencia a la compresión simple. Sin embargo, en las últimas décadas, se ha reconocido que alcanzar un determinado nivel resistente no garantiza que una estructura cumpla con su vida útil de diseño. Es por esto, que la durabilidad ha pasado a ser un factor determinante, siendo entendida como la capacidad del material mantener sus características de servicio a lo largo de su período de vida útil, frente a las condiciones de exposición esperadas.

La durabilidad del hormigón está vinculada en gran parte con la permeabilidad y a su microestructura. El transporte de sustancias – ya sea en forma líquida o gaseosa – ocurre a través de la red de poros capilares y microfisuras presentes en la matriz cementicia (Shafiq, N. y Cabrera, J.G., 2004). Esta red de poros determina la facilidad con la que los agentes externos penetran; una red altamente conectada aumenta la vulnerabilidad del hormigón frente a agentes externos agresivos, facilitando los procesos de degradación.

Las características de la estructura porosa del hormigón, dependen de varios factores como ser: la relación agua-cemento, factor de hidratación, la composición química de los materiales ligantes, las condiciones ambientales iniciales, las propiedades en el estado fresco, la calidad de los procesos de colocación, compactación y curado, etc.

El curado inicial, resulta de vital importancia sobre todo en determinados climas (secos y calurosos) dado que un buen curado reduce significativamente las fisuras por inestabilidad volumétrica del hormigón en edades tempranas, a la vez que favorece una hidratación completa del cemento (mayor factor de hidratación del cemento).

Ante dicha problemática, el reglamento CIRSOC 201 (201, 2005) establece requisitos prestacionales específicos para las propiedades de transporte en ambientes de agresividad moderada a muy alta. La evaluación conjunta de la resistencia a la compresión, la absorción, la densidad y la velocidad de succión capilar, permite obtener una visión integral de la calidad del hormigón. Analizar estas propiedades en función del tipo de cemento y del régimen de curado permite interpretar la evolución de la estructura porosa y de su impacto en la vida útil.

En función de lo expuesto, el presente trabajo aborda la evaluación experimental de los hormigones comerciales de la región, con materias primas locales, analizando el efecto de distintos tipos de cemento y sometidos a diferentes condiciones de curado. Los resultados serán comparados con valores de referencia normativos para verificar la conformidad con los requisitos de durabilidad e identificar posibles tendencias o fuentes de variabilidad asociadas al origen industrial del material y a las condiciones de ensayo.

1. Marco teórico y antecedentes

2.1. Durabilidad del hormigón

La durabilidad del hormigón tiene un rol fundamental en el desempeño de las estructuras de hormigón armado. La misma se define, de acuerdo con el reglamento *CIRSOC 201* (201, 2005), como la capacidad que tiene el hormigón de una estructura de resistir las acciones del medio ambiente, las cuales pueden ser de naturaleza física, química o físico-química y pueden provocar la degradación de la estructura por efectos distintos a las cargas de diseño.

Tradicionalmente, el ensayo de resistencia a compresión simple fue utilizado como un parámetro general de la calidad del hormigón. Sin embargo, se ha demostrado que el nivel resistente no alcanza por sí solo para garantizar una calidad mínima durante todo el periodo de vida útil de una estructura (Basheer, L., Kropp, J. y Cleland, D.J., 2001). Esto se debe a que existen varios procesos de degradación que pueden generarse en una estructura de hormigón (diferentes tipos de ataques a la durabilidad) y que afectan sus propiedades mecánicas y de servicio (Toirac Corral, 2009).

Muchos de estos procesos de degradación, se encuentran vinculados a la penetración de agentes agresivos externos hacia el interior del hormigón. Por esta razón, la durabilidad del hormigón se encuentra en muchos casos, estrechamente vinculada a su capacidad de resistir el transporte de agua, gases e iones agresivos hacia su interior, ya sea en forma líquida o gaseosa, a través de su red de poros y de microfisuras que conforman la microestructura de la matriz cementicia (Shafiq, N. y Cabrera, J.G., 2004).

En este contexto, la evaluación de la durabilidad del hormigón no puede limitarse únicamente al control de la resistencia mecánica, sino que requiere la caracterización de parámetros físicos y de transporte. La medición de estos parámetros constituye una herramienta fundamental que permite estimar el comportamiento del hormigón frente al ingreso de agua y agentes agresivos, así como también analizar su desempeño y adecuación a las exigencias reglamentarias.

2.2. Estructura porosa del hormigón

El hormigón se caracteriza por ser un material poroso, con un complejo sistema de vacíos, capilares y microfisuras, que abarcan diferentes ordenes de magnitud (desde macroporos a microporos). De acuerdo con su tamaño y origen, estos vacíos se clasifican principalmente en: poros de gel, poros capilares y huecos de aire. Cada parte de este sistema de poros tiene injerencia en diferentes características del hormigón. Los huecos de aire se deben al aire atrapado durante el mezclado del hormigón (intrínseco), mientras gran parte de la porosidad capilar del hormigón es el resultado del agua de la mezcla que no reacciona con el cemento y que, al evaporarse, deja canales en la estructura.

Los poros capilares conforman la red de poros más relevante desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón, con un tamaño que oscila generalmente entre los 10 nm y 10µm. Tal como señalan (Shafiq, N. y Cabrera, J.G., 2004), esta red facilita el paso para el transporte de

fluidos en función de su conectividad y distribución, destacando que aquellos poros con diámetros superiores a los 50 nm son los que más influyen en la permeabilidad y la succión capilar al conformar la denominada “red macro-capilar”. Una red altamente conectada y de mayor tamaño incrementa la permeabilidad, permitiendo el ingreso de agentes agresivos hacia el interior de la matriz cementicia y a la zona de interfaz entre la pasta y el agregado. En ese sentido varios autores destacan que el coeficiente de sorción capilar se ve fuertemente afectado por la calidad de la zona de transición, (He, Z.-M., Long, G.-C. y Xie, Y.-J., 2012).

Las propiedades de transporte no dependen únicamente de la cantidad de poros presentes, sino de su grado de interconectividad. Una estructura con poros mayormente aislados no presenta los mismos riesgos frente a la penetración de agua y agentes agresivos que una red de poros altamente conectada. El desarrollo de esta estructura porosa es dinámico y depende de la composición de los materiales, las condiciones de curado inicial y la duración del mismo.

Además de la conectividad de los poros, existe el concepto de tortuosidad. La tortuosidad representa la complejidad geométrica de los caminos disponibles para el transporte de fluidos e iones dentro de la red porosa: no es lo mismo, por ejemplo, un poro recto y de espesor uniforme, que uno sinuoso y con variaciones en su diámetro. Aunque ambos representen la misma porosidad absoluta, el mecanismo de transporte en cada uno puede verse fuertemente afectado. A igualdad de porosidad total, una red capilar más tortuosa puede reducir significativamente la velocidad de transporte.

2.3. Fenómenos de transporte en el hormigón

El agua y los agentes agresivos externos penetran la matriz cementicia a través de diferentes mecanismos físicos de transporte debido a la estructura porosa del hormigón. Estos mecanismos dependen principalmente del tamaño, la distribución y la conectividad de poros y condicionan la velocidad con la que los agentes externos penetran dicho material.

Los fenómenos de transporte se clasifican principalmente en permeabilidad, absorción y difusión (Figura 1). La permeación es la convección de un fluido por gradiente de presiones, mientras que el fenómeno de difusión no se trata de una convección de fluido, sino del movimiento de iones dentro del fluido por un gradiente de concentraciones.

Por su parte, la absorción capilar es uno de los mecanismos de transporte más relevante en condiciones habituales de exposición. En el mismo, los líquidos son succionados (convección de fluidos) hacia el interior del hormigón debido a la acción de la tensión superficial en los poros capilares, pudiendo transportar en su interior, por ejemplo, sustancias deletéreas (Taus & Zega, 2006).

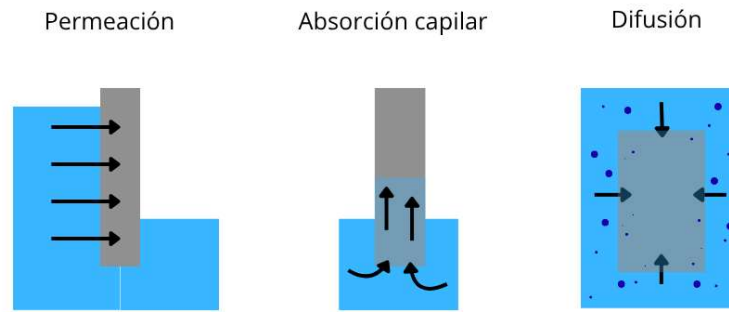


Figura 1. Diagrama de fenómenos de transporte.

Uno de los parámetros que ha ganado mayor aceptación para calificar las propiedades durables de un hormigón, es el parámetro Velocidad de Succión Capilar (VSC) o “sorptivity” en la literatura internacional. Este valor, cuyo método de obtención se encuentra normalizado en todos los reglamentos más importantes y que cuenta con una amplia aceptación por su facilidad y robustez experimental, ha demostrado una buena correlación con el desempeño durable del hormigón en numerosos estudios.

En nuestro país, el ensayo de Velocidad de Succión Capilar está reglamentado en la norma IRAM 1871, mientras que los reglamentos CIRSOC 200 y 201 establecen valores máximos para este parámetro, permitiendo determinar si el material presenta una adecuada capacidad durable en ambientes de agresividad moderada a alta, con el objetivo de asegurar la vida útil de la estructura.

2.4. Influencia del curado en la durabilidad

El curado del hormigón es el proceso de control del contenido de humedad y de la temperatura durante las etapas tempranas de endurecimiento, cuyo objetivo es permitir el desarrollo adecuado de la hidratación del cemento. Las condiciones de curado inicial constituyen un factor significativo en el control de la porosidad y en la formación de la red de poros en los distintos tipos de hormigón (Shafiq, N. y Cabrera, J.G., 2004).

Un curado adecuado favorece la formación de productos de hidratación, dando lugar a una microestructura más densa y menos permeable. Por el contrario, un curado deficiente, especialmente a edades tempranas, puede interrumpir el proceso de hidratación del cemento, generando una estructura porosa con mayor conectividad entre poros capilares y, en consecuencia, una superficie más vulnerable al ingreso de agua y agentes agresivos.

Los métodos de curado pueden clasificarse, en términos generales, en aquellos que aseguran un aporte externo de humedad – como el curado húmedo mediante inmersión o mantenimiento de la superficie saturada – y aquellos que buscan limitar la pérdida de agua desde el interior del hormigón – denominados métodos de curado seco – los cuales impiden la evaporación del agua de la mezcla con barreras físicas como envolturas de film plástico o membranas impermeables.

Estudios sobre hormigones expuestos a diferentes condiciones de curado (Taus, V. L. y Zega, C. J, 2006) confirman que la deficiencia de curado resulta un factor de mayor impacto para la durabilidad que incluso la propia composición de ciertos agregados. Es por ello, que el control del curado inicial resulta fundamental no solo para garantizar que el hormigón alcance la resistencia requerida, sino también para asegurar las prestaciones de durabilidad necesarias para cumplir con la vida útil de diseño.

2.5. Influencia del tipo de cemento

La composición del cemento utilizado en la elaboración del hormigón es uno de los factores determinantes en la configuración de su microestructura. El uso de distintos tipos de cemento, especialmente aquellos que incorporan adiciones minerales – como puzolanas – genera cambios significativos en las propiedades de transporte y, como consecuencia, en la durabilidad del material.

El uso de cementos mezclados con adiciones puzolánicas (como ser ceniza volante, puzolana natural, humo de sílice, entre otras) influye significativamente en la porosidad total. La reacción puzolánica constituye un proceso secundario de formación de compuestos cementicios, mediante la reacción entre las fases amorfas silíceas/aluminosas y el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland. Esta “hidratación secundaria” del cemento, produce un mayor contenido de C-S-H en el largo plazo, reduciendo fuertemente la porosidad, no solo en términos de porosidad total sino también en términos de tortuosidad de los capilares. Vale destacar que también las adiciones puzolánicas tienen una gran eficiencia en la zona de transición, que es naturalmente rica en hidróxidos de calcio (portlandita) y que mediante la reacción puzolánica es transformada en gel de sílice (He, Z.-M., Long, G.-C. y Xie, Y.-J., 2012). Esta reacción secundaria permite lograr un mejor desempeño en el hormigón frente al transporte de fluidos, siendo el curado inicial muy importante (Shafiq, N. y Cabrera, J.G., 2004).

Finalmente, el uso de cementos con adiciones no solo responde a criterios de durabilidad, sino también a la necesidad de reducir el impacto ambiental en la industria de la construcción. Como señala (Mehta, 2001), la sustitución parcial del Clinker por subproductos industriales es una de las estrategias más viables para lograr un hormigón más sostenible sin comprometer la vida útil.

2. Materiales y metodología

Se presenta a continuación los materiales utilizados y la metodología seleccionada para conocer las propiedades físicas y de transporte de los hormigones estudiados. Las tareas experimentales fueron realizadas en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Comahue (LHO-FAIN) y en el Laboratorio de control de Calidad de la empresa Hormigonera del Interior (HDI SRL), que además proveyó las mezclas evaluadas en el presente Proyecto Integrador Profesional.

La metodología adoptada comprende tres etapas:

- Caracterización de los materiales componentes.

- Control de las mezclas en estado fresco y moldeo bajo diferentes condiciones de curado.
- Determinación de los parámetros de resistencia, transporte de fluidos y durabilidad en estado endurecido.

De esta manera, se busca establecer la base técnica de las mezclas comerciales, evaluar las variables iniciales que condicionan la formación de la red capilar y analizar la interacción entre el tipo de cemento y método de curado empleado, evaluando su incidencia en la porosidad y la capacidad de transporte de fluidos en el hormigón.

3.1. Materiales

Para el desarrollo del programa se seleccionaron materiales de uso frecuente en la región de Neuquén, con el objetivo de que las mezclas evaluadas sean representativas de la producción local y compatibles con los criterios establecidos en el reglamento CIRSOC 201.

3.1.1. Agregados

Se utilizó una arena de río como agregado fino y canto rodado (6/25 mm) como agregado grueso, ambos provenientes de canteras propias de HDI SRL. Las propiedades físicas de los mismos fueron determinadas según procedimientos normalizados y se presentan a continuación:

Propiedades - Agregado fino – Arena de río	
Propiedad	Valor
Densidad relativa (SSS)	2,61
Absorción [%]	1,4%
Módulo de finura	2,3

Tabla 1. Propiedades agregado fino – Arena de río.

Propiedades - Agregado grueso – Canto rodado 10/20	
Propiedad	Valor
Densidad relativa (SSS)	2,61
TMN [mm]	19

Tabla 2. Propiedades agregado grueso – Canto rodado (6/25 mm).

3.1.2. Cementos

Se evaluaron hormigones con dos tipos de cemento Portland de uso comercial, ambos provistos por la firma Loma Negra (planta de Zapala, Neuquén), con diferente composición y mismo nivel de categoría resistente (40). La principal diferencia entre ambos radica en su composición: mientras que el CPF-40 contiene filler calcáreo, el CPP-40-ARS incorpora puzolana natural como adición mineral activa.

Propiedades – Cemento Portland Fillerizado	
Propiedad	Valor
Superficie específica Blaine [m ² /kg]	399
Resistencia a la compresión 28d [MPa]	45,2

Tabla 3. Propiedades Cemento Portland Fillerizado.

Propiedades – Cemento Portland Puzolánico	
Propiedad	Valor
Superficie específica Blaine [m ² /kg]	427
Resistencia a la compresión 28d [MPa]	43,6
Categoría frente a los sulfatos IRAM 50001	ARS (alta resistencia a los sulfatos)

Tabla 4. Propiedades Cemento Portland Puzolánico.

Los cementos presentan finuras similares y niveles resistentes similares, lo cual los vuelve comparables. Ambos cementos contienen adiciones minerales que pueden diluir el efecto del cemento: edades tempranas del filler calcáreo puede actuar como un estímulo de la hidratación, mientras que la puzolana natural tiene su efecto en el mediano/largo plazo, a través del proceso de hidratación secundaria que es capaz de generar.

La diferente cinética de hidratación y generación de resistencia por parte de cada cemento podría generar un desarrollo diferente en la microestructura de los hormigones, y por ende en sus propiedades mecánicas y durables.

3.1.3. Aditivos

Con el fin de mejorar la trabajabilidad de las mezclas sin modificar significativamente la relación agua/cemento, se emplearon aditivos químicos provistos por la firma GCP Applied Technologies:

Aditivo	Tipo y rango	Densidad [g/m ³]
MIRA 319	Reductor de agua – Rango Medio	1,240
DARACEM 19	Reductor de agua – Rango Alto	1,180

Tabla 5. Aditivos utilizados.

La incorporación de estos aditivos permite mejorar la fluidez y capacidad de compactación del hormigón sin incorporar agua, contribuyendo a la reducción de la porosidad y, en consecuencia, a la mejora de las propiedades durables.

3.1.4. Agua de amasado

Se utilizó agua apta para la elaboración de las mezclas.

3.2. Dosificación y Regímenes de Curado

3.2.1. Diseño de mezclas industriales

Las mezclas evaluadas en el presente trabajo fueron provistas por la empresa Hormigonera del Interior (HDI SRL) y corresponden a diseños de uso comercial representativos de la producción local. Se seleccionaron cinco formulaciones que combinan dos variables principales: categoría resistente y tipo de cemento utilizado:

Nomenclatura de las mezclas:

El código de identificación adoptado para cada formulación corresponde a la siguiente estructura:

$$H[\text{resistencia característica en número}]/[\text{tipo de cemento}]$$

Donde:

- *H*: indica que se trata de hormigón.
- *Número*: corresponde a la resistencia característica de diseño en MPa, equivalente a las categorías H21¹, H25 y H30 según reglamento CIRSOC 201.
- *F*: identifica mezclas elaboradas con cemento CPF 40 (Cemento Portland con Filler Calcáreo).
- *P*: identifica mezclas elaboradas con cemento CPP 40 ARS (Cemento Portland Puzolánico).

Los materiales componentes incluyen: agua de amasado, cemento (CPF 40 o CPP 40 ARS según corresponda), arena de río como agregado fino, agregado grueso en fracciones 10/20, y los aditivos químicos MIRA 319 (plastificante) y DARACEM 19 (superfluidificante), incorporados para garantizar la trabajabilidad requerida.

Las proporciones de cada componente se presentan en la siguiente tabla:

Código	Descripción	Agua [kg/m ³]	CPF 40 [kg/m ³]	CPP 40 [kg/m ³]	Arena [kg/m ³]	10/20 [kg/m ³]	Mira 319 [kg/m ³]	Daracem 19 [kg/m ³]
H21F	H21 con Filler	137	285	-	870	1094	0,95	1,14
H21P	H21 con Puzolánico	140	-	290	855	1080	1,10	1,25
H25F	H25 con Filler	146	305	-	850	1070	1,05	1,22
H25P	H25 con Puzolánico	155	-	315	805	1060	1,20	1,4175
H30F	H30 con Filler	161	335	-	796	1063	1,1725	1,4405

Tabla 6. Dosificación de las mezclas evaluadas.

Se observa en las dosificaciones que, para una misma categoría resistente, las mezclas elaboradas con CPP 40 ARS requieren una mayor cantidad de cemento y de agua respecto de sus pares con CPF 40. Esto a su vez, incrementa la demanda de agua para alcanzar una trabajabilidad equivalente.

La incorporación de los aditivos permite alcanzar la consistencia requerida sin necesidad de incrementar la relación agua/cemento.

¹ La designación "H21" utilizada en este documento responde a la nomenclatura comercial habitual en la región, a los fines normativos y de evaluación según el Reglamento CIRSOC 201 (2005), este material se asimila a la clase resistente H20 (resistencia característica a compresión de 20 MPa).

3.2.2. Elaboración y curado de probetas (Norma IRAM 1534)

Se siguieron los criterios generales de la norma IRAM 1534 para la elaboración de las muestras de hormigón. El proceso de moldeado se ejecutó mediante la consolidación por capas, aplicando la energía de compactación normalizada mediante una varilla metálica. Una vez moldeadas, las probetas permanecieron protegidas de la evaporación durante las primeras 24 horas hasta el momento del desmolde.

Luego, las muestras fueron sometidas a dos regímenes de curado definidos para esta investigación, con el fin de evaluar su impacto en la evolución de la porosidad.

- El curado húmedo según norma se llevó a cabo en condiciones de saturación y temperatura controlada, favoreciendo las reacciones de hidratación.
- El curado en seco se realizó mediante la protección de las probetas con papel film, sellando las mismas luego del desmolde, con el fin de verificar la eficacia de barreras físicas en la retención del agua de la mezcla, simulando condiciones de obra.



Figura 2. Equipamiento utilizado para la elaboración de probetas.



Figura 3. Conservación inicial de probetas tras el moldeo.

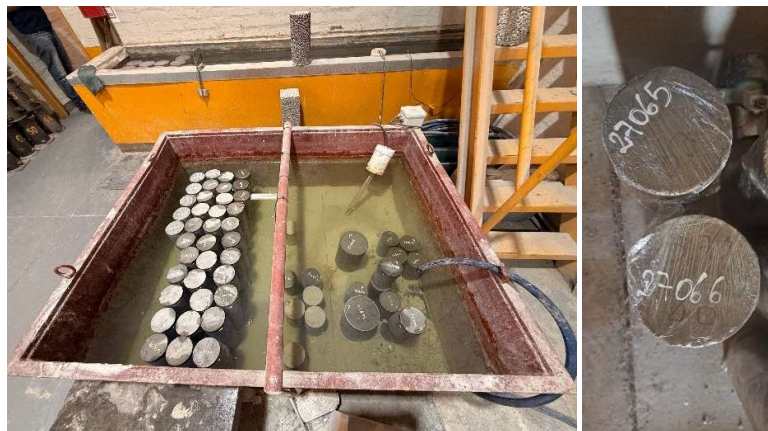


Figura 4. (a) Curado húmedo en pileta. (b) Curado seco con envoltura de film.

3.3. Ensayos en Estado Fresco

3.3.1. Ensayo de consistencia (Norma IRAM 1536)

La caracterización de las mezclas se realizó mediante el ensayo de asentamiento utilizando el tronco de cono de acuerdo con los lineamientos generales de la norma IRAM 1536. Este procedimiento permite determinar la consistencia del hormigón, siendo un indicador directo de su fluidez y trabajabilidad, dichas propiedades resultan fundamentales para garantizar la correcta puesta en obra y compactación. Esto a su vez – tal como se mencionó en el marco teórico – condiciona la porosidad final del material endurecido.

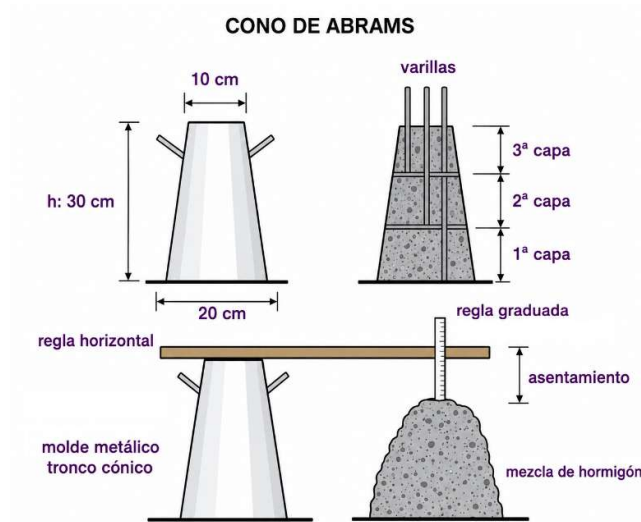


Figura 5. Esquema de ensayo de asentamiento – Cono de Abrams.

El ensayo consiste en el llenado del molde normalizado en tres capas de igual volumen, compactando cada una de ellas mediante 25 golpes con una varilla de acero para asegurar la uniformidad. Tras el enrasado superior y el retiro vertical del molde, se mide el descenso experimentado por la masa de hormigón respecto a la altura original del cono.

Este valor de asentamiento permite clasificar la mezcla y verificar si la fluidez obtenida en el laboratorio o en la recepción del hormigón elaborado coincide con el diseño de la mezcla previsto para asegurar la calidad estructural y la futura durabilidad del elemento.

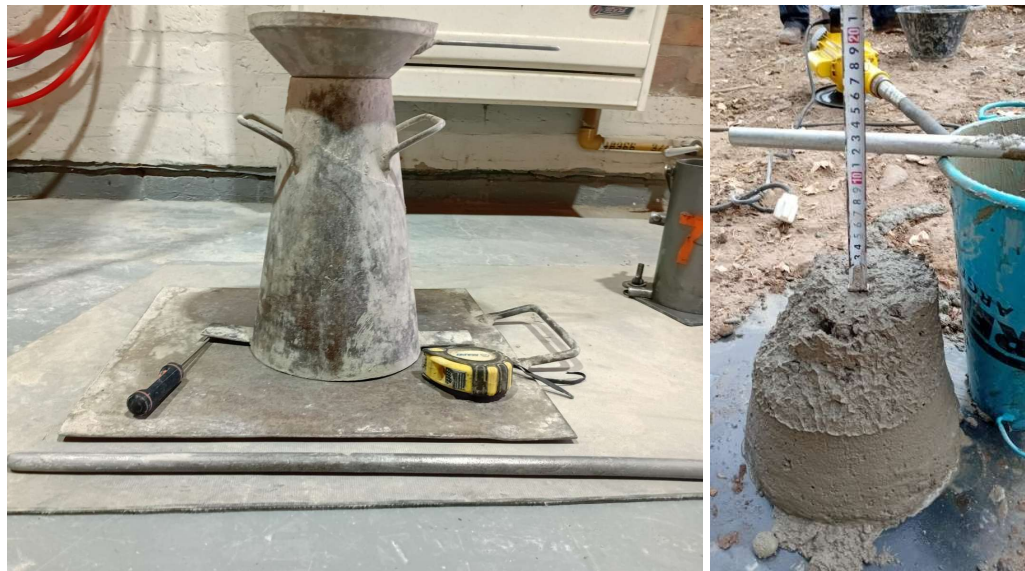


Figura 6. Determinación del asentamiento. (a) Equipamiento utilizado. (b) Medición del asentamiento sobre el hormigón recién desmoldado.

3.3.2. Contenido de aire (Norma ASTM C231)

Se realizó una evaluación del contenido de aire en las mezclas en estado fresco siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C231. El mismo resulta fundamental para el control de calidad, ya que la presencia de vacíos en la matriz cementicia influye directamente tanto en la densidad del material como en su resistencia final.

El procedimiento se basa en la aplicación de presión sobre una muestra de hormigón colocada en un recipiente estanco. Utilizando el medidor de aire (tipo B), se somete a la mezcla a una presión conocida, observando la reducción de volumen del aire atrapado. Esta técnica permite discriminar el porcentaje de aire incorporado respecto al volumen total de la mezcla. La medición resulta útil para verificar que el aire atrapado se mantenga dentro de los límites de diseño, garantizando una microestructura equilibrada que no comprometa la porosidad capilar ni la capacidad protectora del recubrimiento.



Figura 7. Determinación del contenido de aire conforme norma ASTM C231.

3.3.3. Peso unitario por unidad de volumen (Norma IRAM 1562)

La determinación de la densidad del hormigón fresco se realizó siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1562. Este parámetro representa la masa del hormigón por unidad de volumen, constituyendo un indicador del control de calidad, ya que una variación en el peso unitario respecto al valor de diseño puede indicar desviaciones en la dosificación de los materiales, variaciones en contenido de aire o deficiencias en el proceso de consolidación.

El procedimiento consistió en el llenado de un recipiente de peso y volumen conocido, compactando la mezcla en tres capas uniformes. Tras el enrasado de la superficie superior a modo de garantizar la precisión del volumen, se determinó la masa neta del hormigón. Finalmente, mediante la relación entre la masa obtenida y el volumen del recipiente, se obtiene la densidad de la mezcla.

$$PUV = \frac{\text{Masa de hormigón (kg)}}{\text{Volumen de hormigón (cm}^3\text{)}}$$



Figura 8. Determinación del peso unitario por unidad de volumen (PUV) según norma IRAM 1562.

3.4. Ensayos en Estado Endurecido

3.4.1. Ensayo de compresión (Norma IRAM 1546)

La evaluación de la capacidad resistente de los hormigones se realizó mediante el ensayo de compresión simple, siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1546 (IRAM, 1992). El ensayo de resistencia a la compresión es el método de ensayo y de control de calidad del hormigón más extendido en la industria. Esto se debe a que el mismo consiste en un procedimiento relativamente simple, con resultados sólidos, y debido a la extensa base de datos disponible que permite relacionar este parámetro con casi todos los parámetros relevantes del hormigón.

En nuestro caso, este ensayo permite verificar que las mezclas seleccionadas hayan alcanzado la resistencia de diseño, y sirve como indicador de la evolución de la hidratación del cemento bajo los diferentes regímenes de curado estudiados.

El procedimiento consiste en someter las probetas cilíndricas de 10x20 cm a una carga axial de compresión continua y progresiva, aplicada mediante una prensa hidráulica hasta alcanzar la rotura. El cociente entre la carga máxima registrada y el área de la probeta resulta en la Resistencia a Compresión del material (R_c), la cual se informa normalmente en MPa.

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{\text{Carga máxima (MN)}}{\text{Área efectiva probeta (m}^2\text{)}}$$



Figura 9. Equipamiento empleado para el ensayo de Resistencia a la Compresión Simple. (a) Prensa hidráulica. (b) Probeta posicionada previa al inicio del ensayo.



Figura 10. Probeta tras ensayo de resistencia a la compresión simple.

3.4.2. Ensayo de VSC (Norma IRAM 1871)

El ensayo de succión capilar permite cuantificar la capacidad de la red de poros del hormigón para absorber agua por el fenómeno de absorción capilar (tensión superficial). Este procedimiento evalúa específicamente el transporte de fluidos en condiciones no saturadas, simulando la exposición real de una estructura en contacto con la humedad del suelo o de lluvia.

En primer lugar, se tomaron las muestras según el procedimiento de la norma, obteniendo un disco de 50 mm de alto y 100 mm de diámetro de la parte central de la probeta original (10 cm

x 20 cm). En total se tomaron 10 probetas por cada mezcla, 5 correspondientes al estado húmedo, y 5 correspondientes al curado seco.

Los discos fueron impermeabilizados en su generatriz con una mano de pintura de caucho clorado y luego envueltas con una capa de cinta de aluminio. Esto asegura que flujo de agua sea estrictamente vertical y ascendente, a través de la sección transversal expuesta.

Posteriormente se pre acondiciona el estado de humedad de las probetas, mediante un proceso de secado en estufa a 50°C hasta alcanzar un valor de masa constante. De esta manera se elimina la variabilidad de contenido de humedad inicial.

Luego las probetas son sumergidas 3 ± 1 mm en agua apta, y pesadas en sucesivos intervalos de tiempo, según norma, para registrar la ganancia de masa. Con los datos obtenidos y mediante una regresión lineal se puede calcular la velocidad de succión capilar (VSC), representada como la pendiente de la recta resultante, en una gráfica de absorción por unidad de área en función de la raíz cuadrada del tiempo.



Figura 11. Ensayo de velocidad de succión capilar (VSC) conforme norma IRAM 1871. (a) Probetas impermeabilizadas previas al ensayo. (b) Probetas durante la ejecución del ensayo, en contacto con la lámina de agua.

3.4.3. Ensayo de absorción y densidad (Norma ASTM C642)

Para caracterizar la estructura interna de los hormigones y su porosidad, se realizó el procedimiento de la norma ASTM C642, que permite determinar la densidad y la absorción al agua de las muestras.

El procedimiento consiste en la obtención de tres estados de masa fundamentales para cada probeta. Primero, se somete a las probetas a un proceso de secado en horno a 110°C, durante

el cual se obtienen los pesos cada 24 horas, hasta alcanzar la masa constante (diferencia entre dos pesadas consecutivas menor al 0,5%), obteniéndose así el *Peso Seco (A)*. Posteriormente, se sumergen las probetas en agua a temperatura ambiente hasta alcanzar el estado de saturación, determinando el *Peso Saturado Superficie Seca (B)*. Luego, se obtiene el *Peso Sumergido (C)* de las muestras, utilizando una canasta sumergida en agua y una balanza apta para tal medición.

Con los resultados obtenidos se pueden calcular los parámetros buscados mediante las siguientes expresiones:

- Absorción: Porcentaje de agua respecto al peso seco.

$$Abs = \frac{B - A}{A} * 100$$

- Densidad: Relación de la masa seca con el volumen desalojado por la muestra.

$$Den = \frac{A}{B - C}$$



Figura 12. Ensayo de absorción y densidad conforme norma ASTM C642. (a) Probetas previas al ensayo.
(b) Probetas en el horno durante el proceso de secado.

3.5. Implementación de procedimientos experimentales

Los ensayos de durabilidad, que fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil, fueron implementados en el laboratorio por primera vez durante la ejecución de este plan experimental, lo que conllevó a una gran cantidad de obstáculos, limitaciones y aprendizajes realizados en conjunto con los integrantes del grupo de transferencia LHO, durante la ejecución de los trabajos.

En primer lugar, se tuvieron ciertas dificultades en el corte de las probetas, dado que se utilizaron máquinas de corte con mucho tiempo en desuso, y con ciertos defectos mecánicos. Esto resultó en que varias probetas no pudieron ser cortadas con la cara totalmente lisa, inclusive con desprendimientos de agregados. Este defecto también dificultó las tareas de impermeabilización lateral, y de exposición al pelo de agua. En el caso de las probetas de hormigón H30-F, se obtuvieron llamativamente más desprendimientos que con las otras mezclas, lo que además sugiere que este grupo pudo haber tenido algún problema adicional durante el transporte del material. Es sabido que las operaciones de corte, que imprimen en las probetas cargas dinámicas elevadas, pueden producir microfisuración de la matriz y de las interfaces.

En segundo lugar, el sistema de impermeabilización pudo haber tenido algunos defectos, dado que durante el secado de las probetas se observaron desprendimientos de la cinta de aluminio, y un leve cambio de color en su coloración. La separación de la capa de aluminio con la probeta, puede exponer defectos en la capa de pintura, incrementando las vías de ingreso de agua a la probeta y generando espacios capilares que incrementen el ingreso de agua.

Finalmente, vale mencionar que las condiciones de temperatura y humedad ambiente del laboratorio no pudieron ser controladas de manera activa durante todo el tiempo de los ensayos, debido a problemas edilicios.



Figura 13. Procedimiento de impermeabilización lateral de doble barrera. (a) Aplicación de primera capa de pintura epoxi y segunda capa de cinta de aluminio. (b) Probetas con sistema de impermeabilización completo, listas para el acondicionamiento previo al ensayo.



Figura 14. Preparación de probetas tras el corte transversal.

4. Resultados y análisis

4.1. Ensayos en estado fresco

4.1.1. Ensayo de Consistencia (IRAM 1536)

En la siguiente figura se presentan los valores de asentamiento obtenidos mediante el ensayo de consistencia (Norma IRAM 1536) para cada una de las mezclas evaluadas en estado fresco. Los resultados se expresan en centímetros y corresponden a una única determinación por mezcla.

Las mezclas se identifican según lo establecido en la Tabla 1 en la sección 4.2.1.

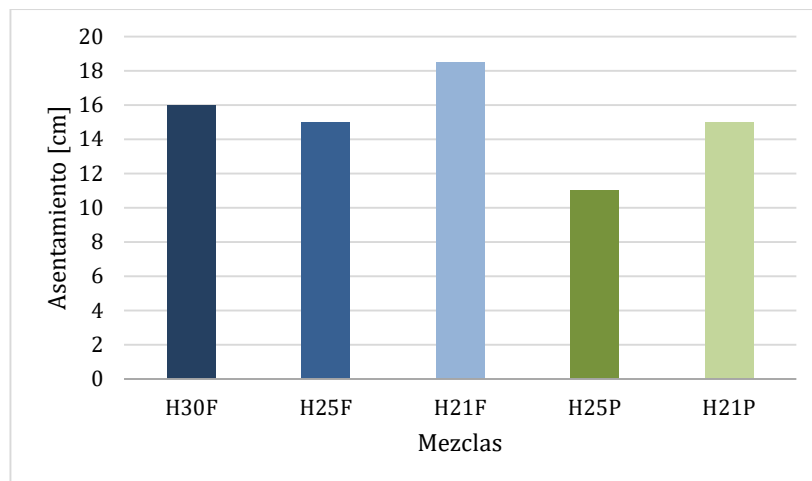


Figura 15. Valores de asentamiento obtenidos según norma IRAM 1536.

Los valores de asentamiento obtenidos se ubican en el rango de 11 a 18,5 cm, lo cual corresponde a mezclas de consistencia fluida, apropiadas para la puesta en obra.

Al comparar mezclas de igual categoría resistente, se observa que:

- La mezcla H21F registró el mayor asentamiento (18,5cm), superando en 3,5cm a su par puzolánico H21P (15cm).
- La mezcla H25F registró un mayor asentamiento (15cm), superando a su par puzolánico H25P (11cm).

Esta tendencia sugiere que las mezclas elaboradas con cemento CPF 40 exhiben mayor fluidez que los elaborados con CPP 40 en igualdad de condiciones de dosificación. Esto podría atribuirse a la mayor finura del cemento CPP 40, ya que incrementa la demanda de agua, o a una buena compatibilidad del fillerizado del cemento con los aditivos utilizados.

4.1.2. Contenido de aire (ASTM C231)

En la siguiente figura se presentan los valores de contenido de aire obtenidos mediante el ensayo de presión (Norma ASTM C231) para cada una de las mezclas evaluadas en estado fresco. Los resultados se expresan en porcentaje del volumen total de la mezcla y corresponden a una única determinación por mezcla.

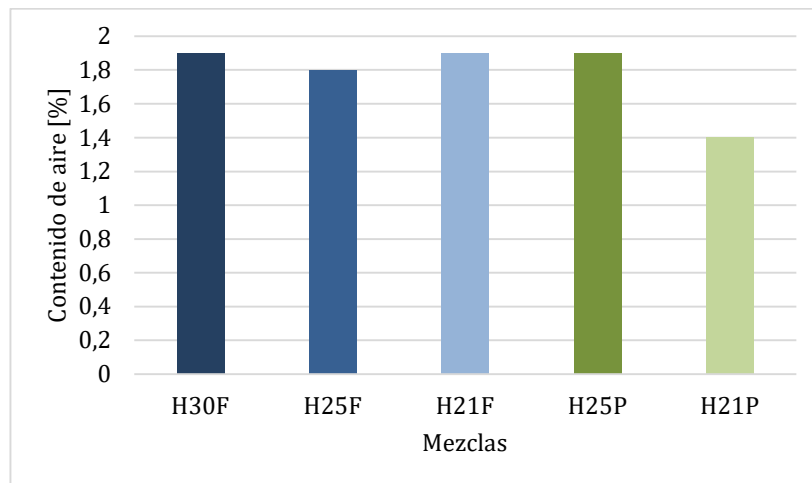


Figura 16. Contenido de aire incorporado [%] para las cinco mezclas evaluadas.

Los valores de contenido de aire registrados se encuentran en el rango de 1,4% a 1,9%, dentro del intervalo esperado para hormigones elaborados en condiciones normales.

4.1.3. Peso unitario por unidad de volumen (IRAM 1562)

En la siguiente figura se presentan los valores de peso unitario por unidad de volumen (PUV) obtenidos en estado fresco mediante el ensayo normalizado según IRAM 1562 para cada una de las mezclas evaluadas. Los resultados se expresan en kg/m^3 y corresponden a una única determinación por mezcla.

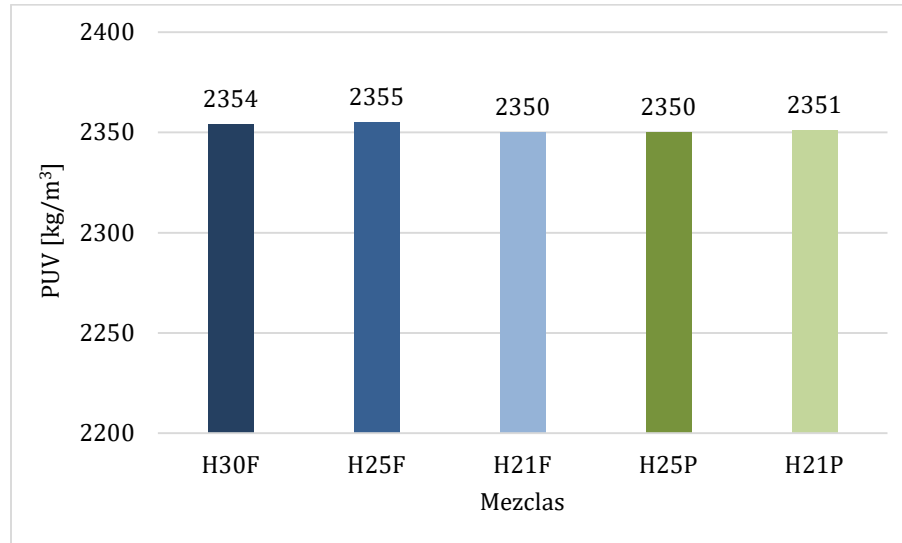


Figura 17. Peso unitario por unidad de volumen [kg/m³] de las mezclas evaluadas en estado fresco, según norma IRAM 1562.

Los valores de PUV obtenidos se ubican en un rango acotado, correspondientes a hormigones de densidad normal de acuerdo con los rangos típicos. La reducida variabilidad entre las mezclas muestra la consistencia del proceso de control en la dosificación y elaboración industrial por parte de la planta, independientemente del tipo de cemento y categoría resistente de la mezcla.

4.2. Estado endurecido

4.2.1. Ensayo de compresión (Norma IRAM 1546)

En la siguiente figura se presentan los valores de resistencia a la compresión a 28 días obtenidos mediante el ensayo de compresión simple (Norma IRAM 1546) para cada una de las mezclas evaluadas.

Las barras sólidas corresponden a probetas sometidas a curado seco (CS), mientras que las barras con trama horizontal corresponden a probetas bajo curado húmedo (CH).

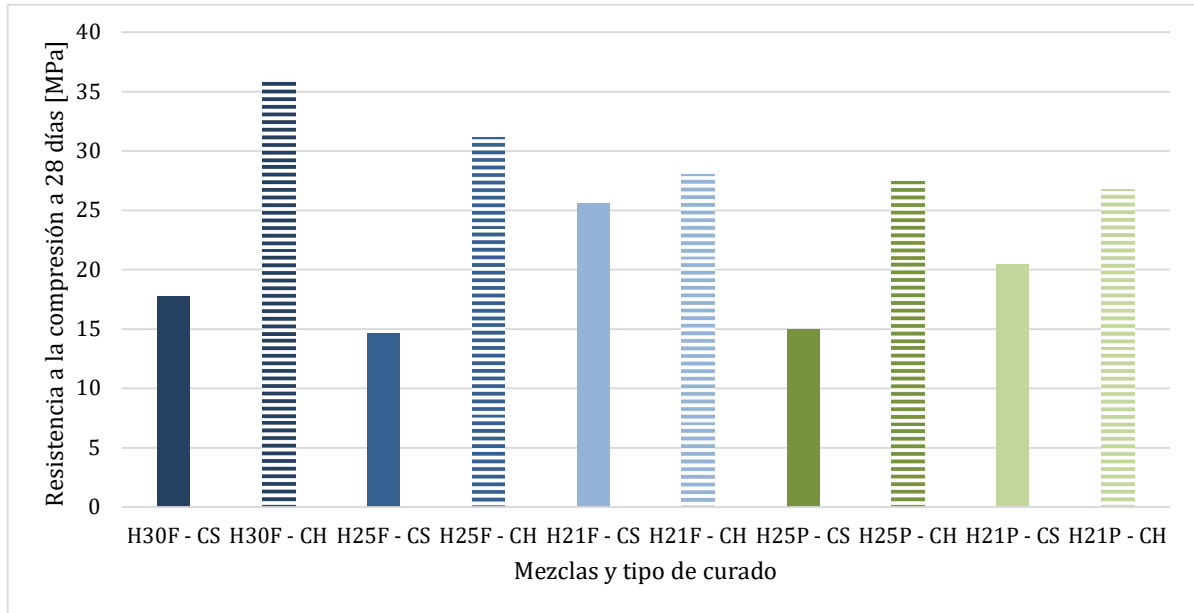


Figura 18. Resistencia a la compresión a 28 días [MPa] discriminadas según régimen de curado.

Los valores obtenidos evidencian una fuerte influencia del régimen de curado sobre el desarrollo de la resistencia mecánica. En términos generales, todas las mezclas sometidas a curado húmedo presentan valores superiores a sus pares bajo curado seco resultando consistente con la teoría. Se observa, además, que el impacto del tipo de curado es más pronunciado en mezclas de mayor nivel resistente, para ambos tipos de cemento.

Comparando según tipo de cemento, al comparar mezclas de igual categoría resistente bajo curado húmedo, las mezclas realizadas con CPF 40 presentan resistencias levemente superiores a sus pares con CPP 40 ARS, lo cual puede relacionarse al desarrollo más lento de las reacciones puzolánicas. En régimen de curado seco esta diferencia se vuelve menor al comparar los hormigones de nivel H25.

Finalmente, bajo el régimen de curado seco, se observan mezclas que no alcanzan la resistencia característica de diseño, lo cual resulta esperable bajo condiciones de curado deficiente, reflejando el impacto de la ausencia del aporte externo de humedad.

4.2.2. Ensayo de VSC (Norma IRAM 1871)

En este capítulo se presentan y analizan los resultados del ensayo de VSC según Norma IRAM 1871. Se presentan para cada grupo de muestras, el gráfico de ganancia de masa por unidad de área por la raíz cuadrada del tiempo, y las gráficas con las regresiones lineales para cada probeta. También se indican las probetas que fueron descartadas por problemas experimentales y los parámetros de ajuste R^2 .

Se presentarán los resultados organizados por mezcla, en orden decreciente de categoría resistente y agrupados por tipo de cemento (filler primero, luego puzolánico).

4.2.2.1. Mezcla H30F

A continuación, se presenta la evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H30F bajo curado seco y curado húmedo.

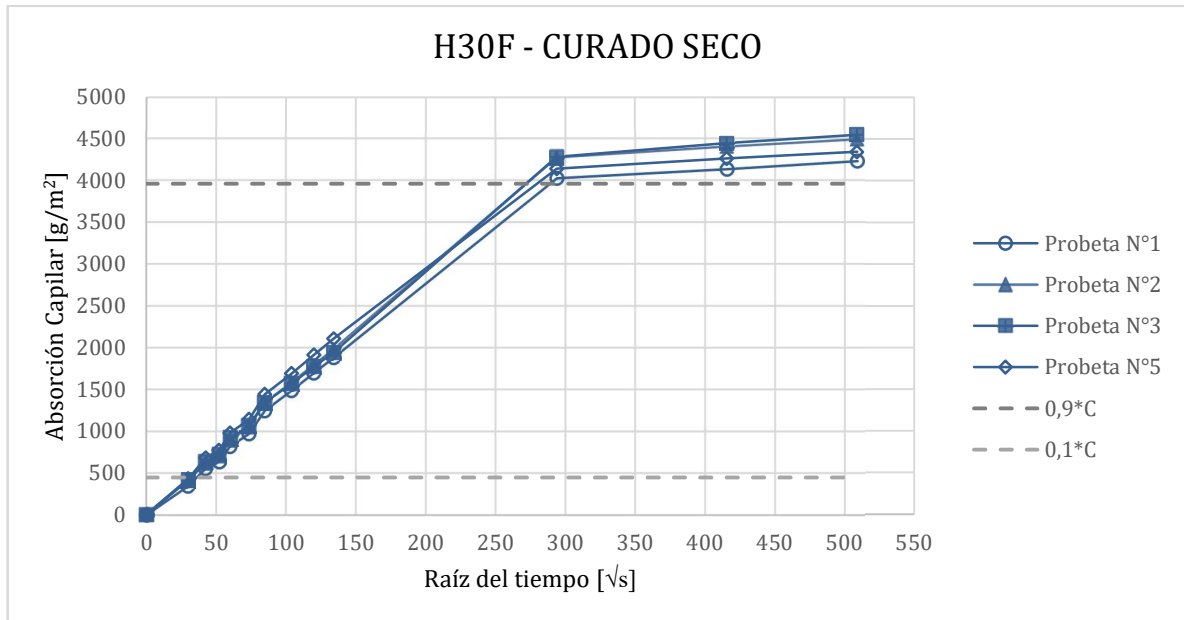


Figura 19. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H30F bajo régimen de curado seco (CS).

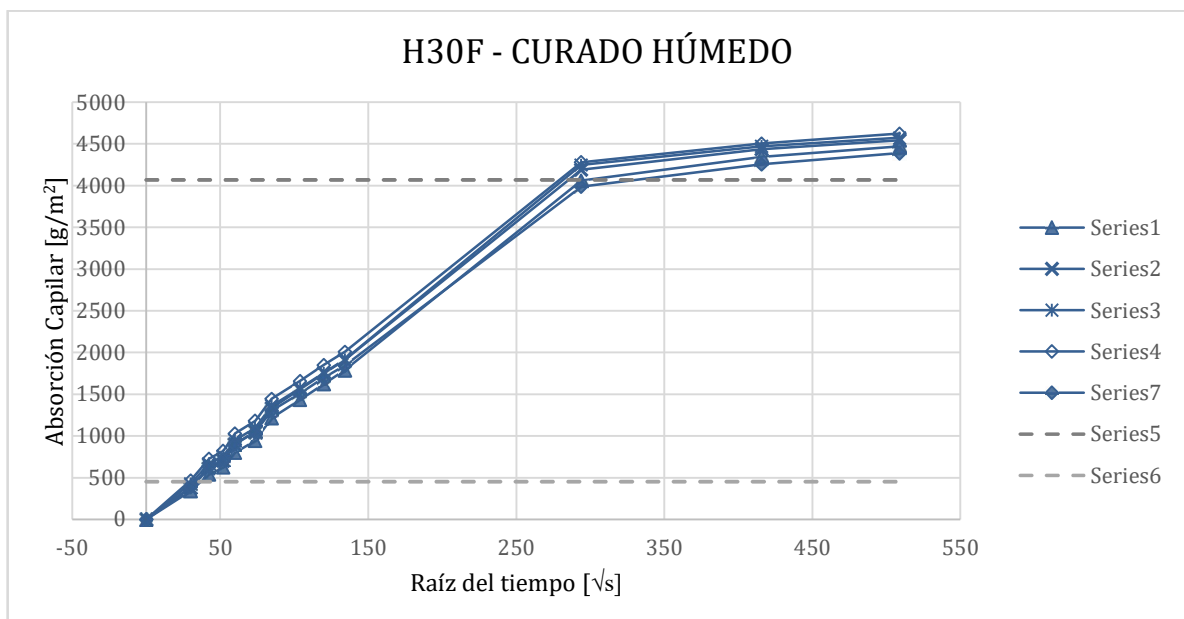


Figura 20. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H30F bajo régimen de curado húmedo (CH).

Las siguientes figuras muestran las regresiones lineales individuales de cada probeta, a partir de las cuales se calcularon los valores de VSC presentados en la tabla resumen al final. La probeta N°4 fue excluida del análisis debido a que se fracturó durante el corte previo al acondicionamiento.

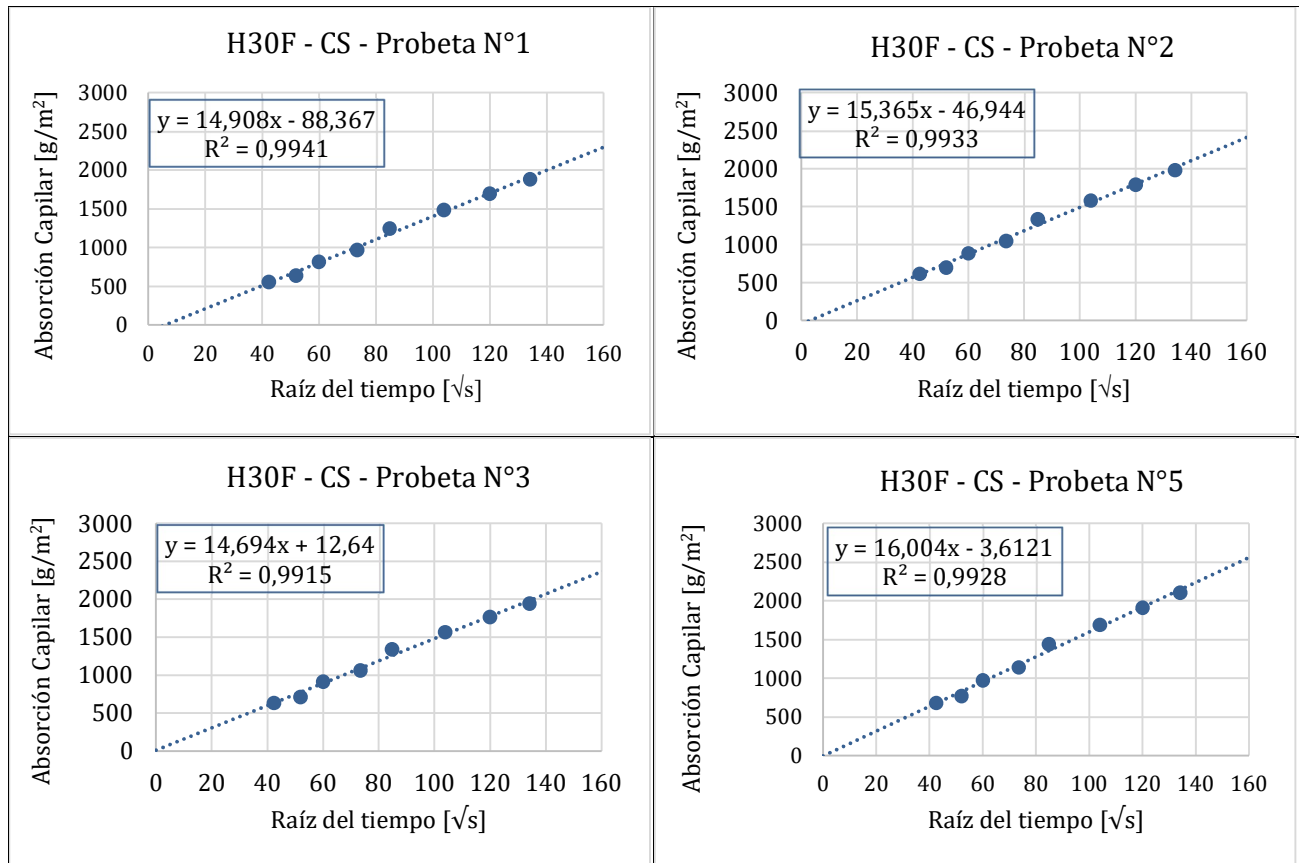
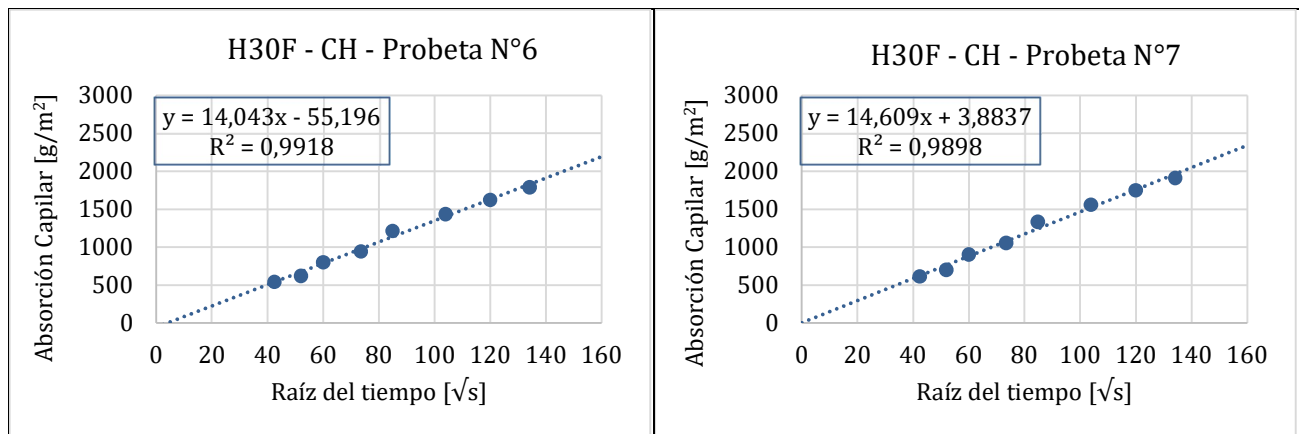


Figura 21. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H30F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°5.



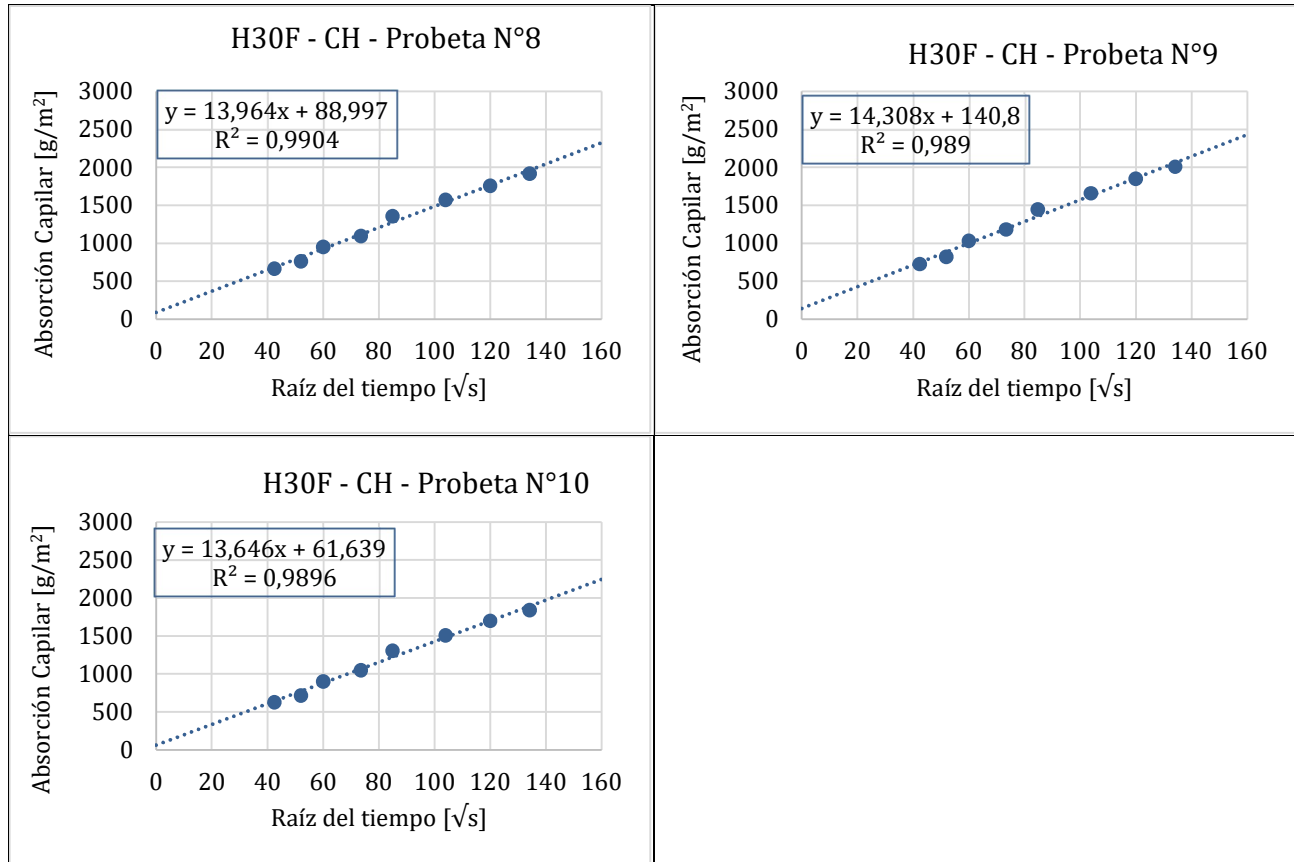


Figura 22. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H30F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.

Curado	N° de Probeta	VSC [g/(m²·√s)]	R²
CS	N°1	14,908	0,9941
CS	N°2	15,365	0,9933
CS	N°3	14,694	0,9915
CS	N°5	16,004	0,9928
CS	Promedio	15,243	-
CH	N°6	14,043	0,9918
CH	N°7	14,609	0,9898
CH	N°8	13,964	0,9904
CH	N°9	14,308	0,989
CH	N°10	13,646	0,9896
CH	Promedio	14,114	-

Tabla 7. Velocidad de succión capilar – Mezcla H30F.

Los valores observados en ambos regímenes de curado, con coeficientes de determinación por encima de 0,99 evidencian un buen ajuste al modelo lineal. Los valores promedio de VSC indican una reducción en las probetas sometidas al curado húmedo. Esto muestra una consistencia con

el marco teórico, dado que el aporte sostenido de humedad durante el curado favorece la continuidad de las reacciones de hidratación.

4.2.2.2. Mezcla H25F

A continuación, se presenta la evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25F bajo curado seco y curado húmedo.

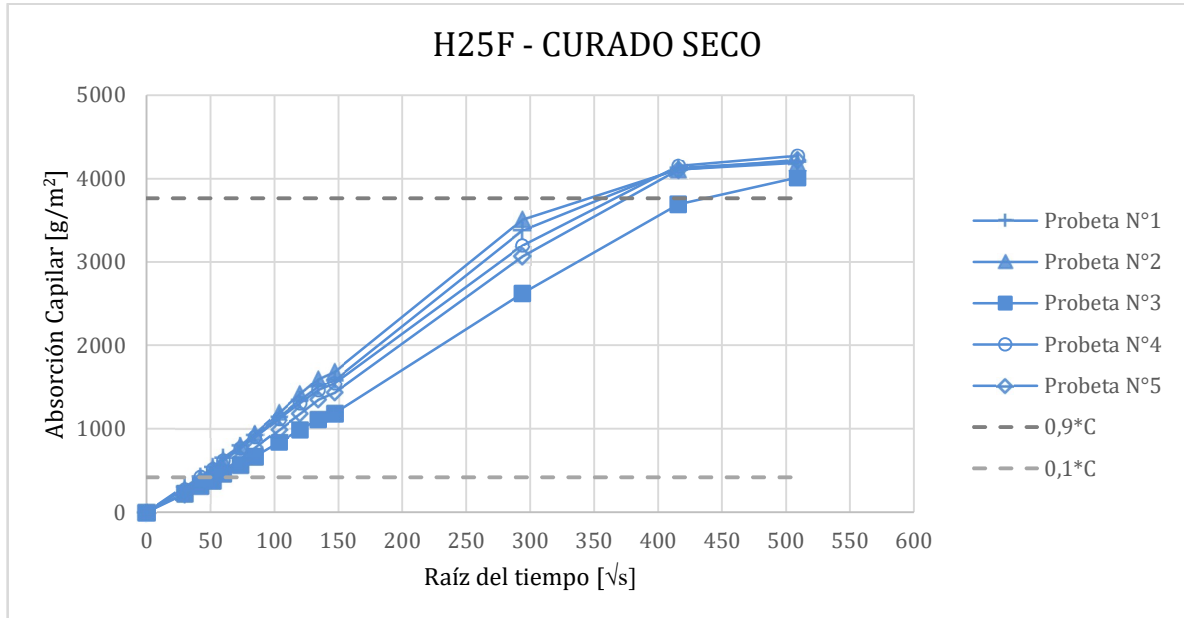


Figura 23. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25F bajo régimen de curado seco (CS).

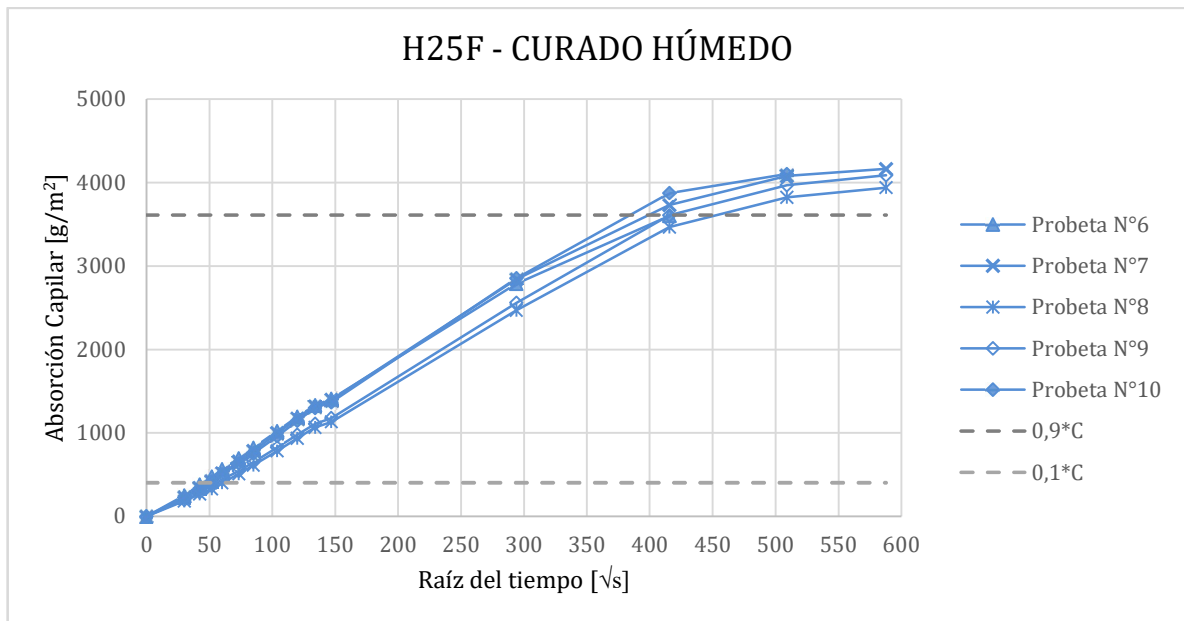


Figura 24. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25F bajo régimen de curado húmedo (CH).

Las siguientes figuras muestran las regresiones lineales individuales de cada probeta, a partir de las cuales se calcularon los valores de VSC presentados en la tabla resumen.

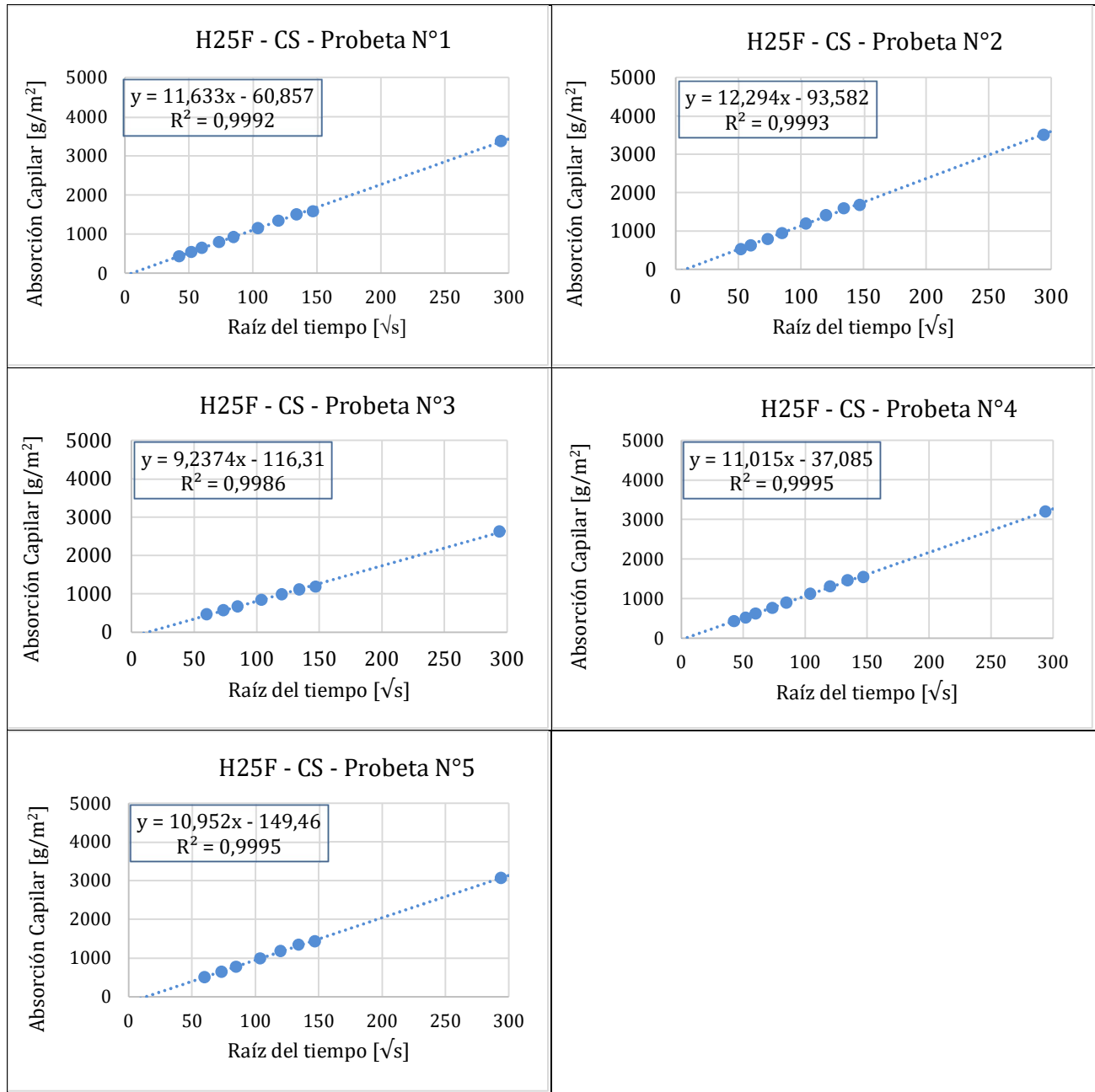


Figura 25. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.

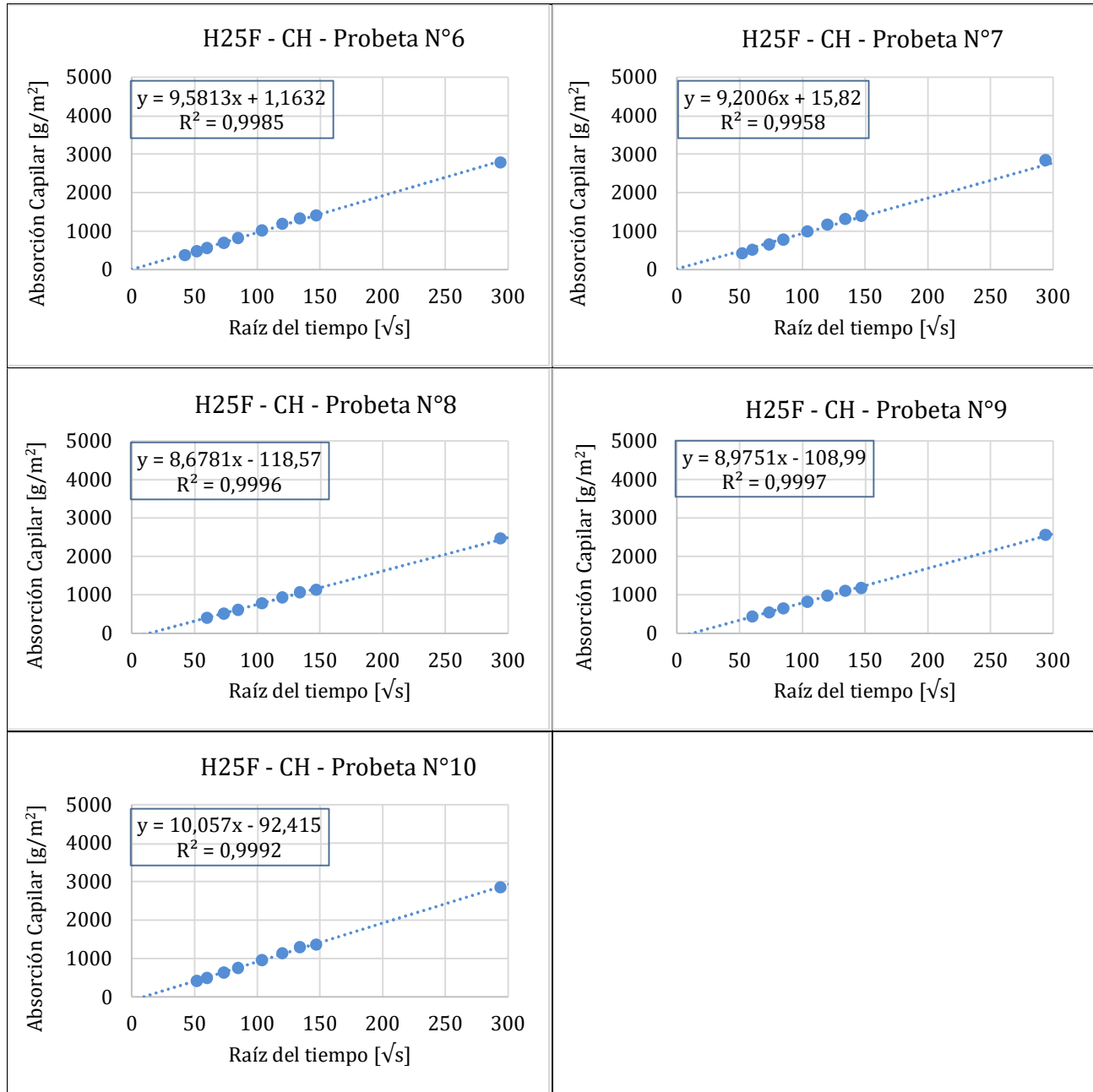


Figura 26. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.

Curado	N° de Probeta	VSC [g/(m ² ·√s)]	R ²
CS	N°1	11,633	0,9992
CS	N°2	12,294	0,9993
CS	N°3	9,2374	0,9986
CS	N°4	11,015	0,9995
CS	N°5	10,952	0,9995
CS	Promedio	11,0263	-
CH	N°6	9,5813	0,9985
CH	N°7	9,2006	0,9958
CH	N°8	8,6781	0,9996
CH	N°9	8,9751	0,9997
CH	N°10	10,057	0,9992
CH	Promedio	9,2984	-

Tabla 8. Velocidad de succión capilar – Mezcla H25F.

Si bien los coeficientes de determinación de las regresiones individuales presentaron un buen ajuste – con valores superiores al 0,99 – se observó una mayor dispersión entre probetas. Sin embargo, puede observarse una diferencia entre los valores promedio para curado seco y curado húmedo, lo cual resulta coherente, ya que una mezcla de menor categoría resistente presenta una estructura capilar más abierta, por lo que un curado eficiente resulta crítico para optimizar la absorción de la mezcla.

4.2.2.3. Mezcla H21F

A continuación, se presenta la evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21F bajo curado seco y curado húmedo.

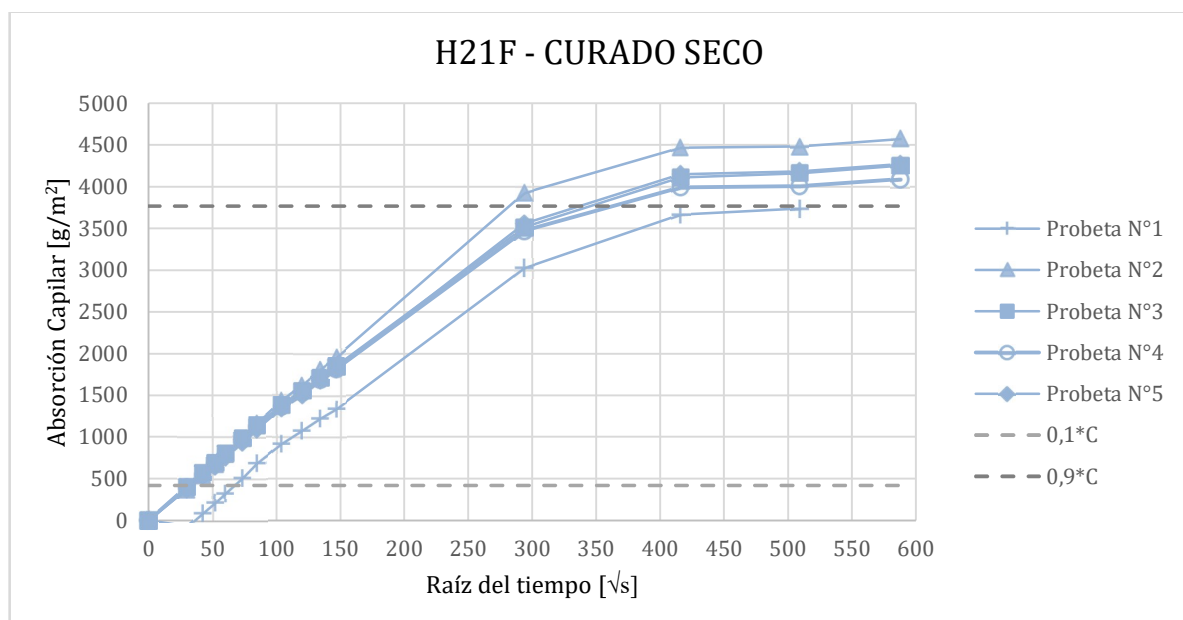


Figura 27. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21F bajo régimen de curado seco (CS).

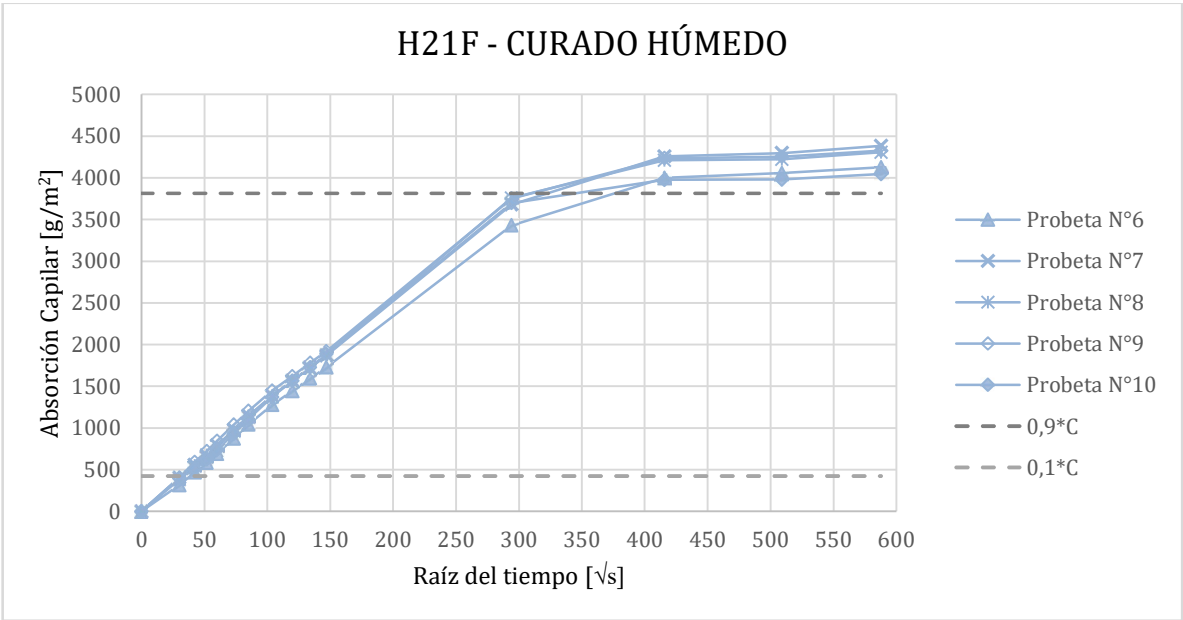
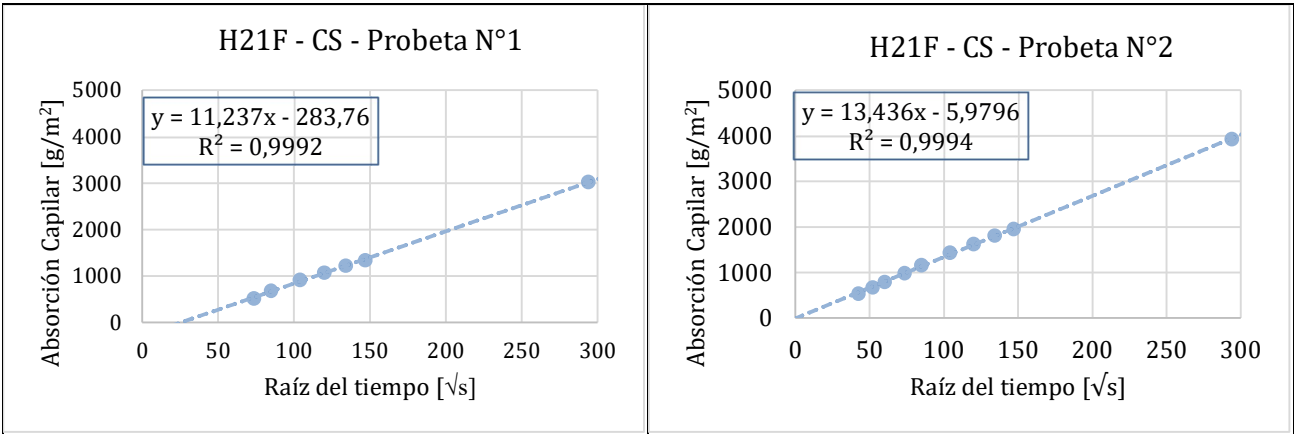


Figura 28. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21F bajo régimen de curado húmedo (CH).

Las siguientes figuras muestran las regresiones lineales individuales de cada probeta, a partir de las cuales se calcularon los valores de VSC presentados en la tabla resumen.



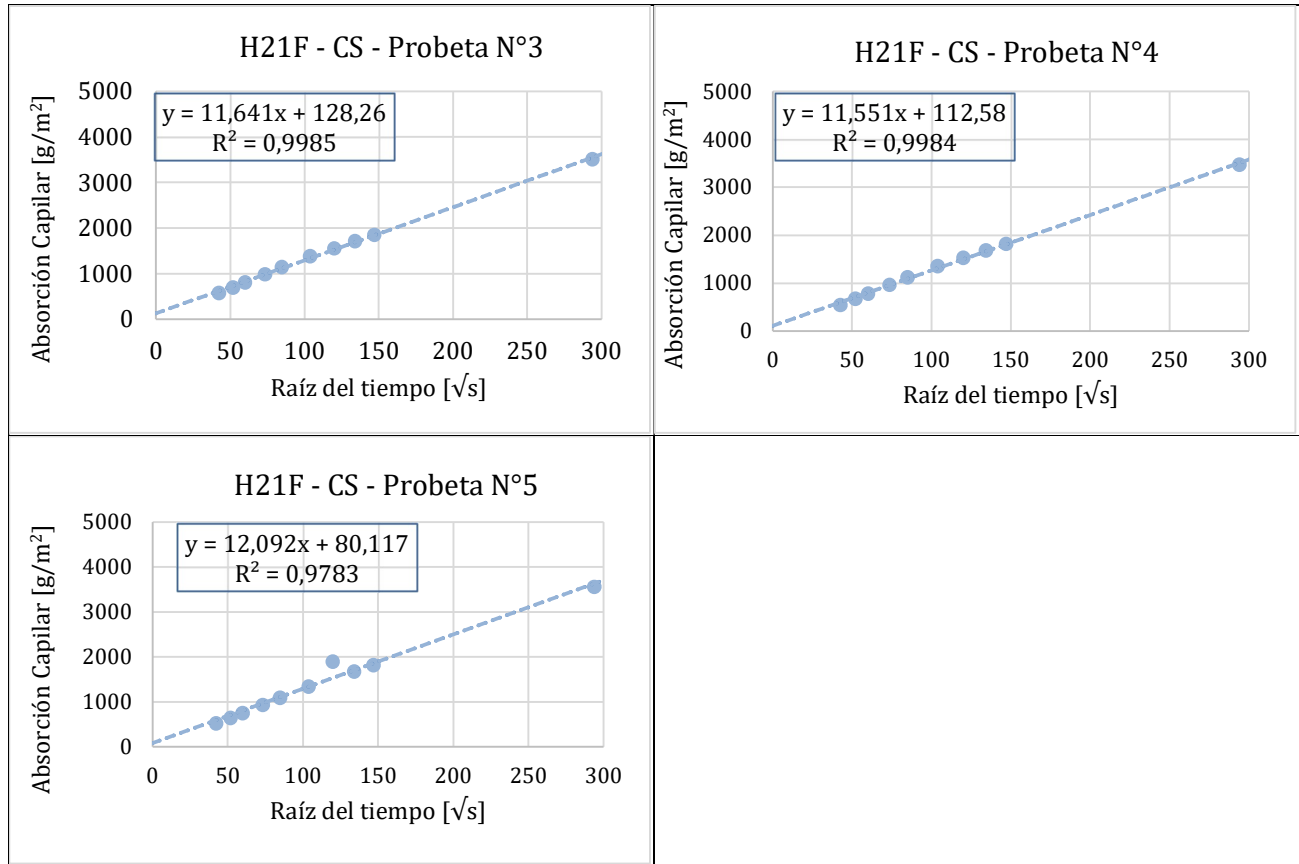
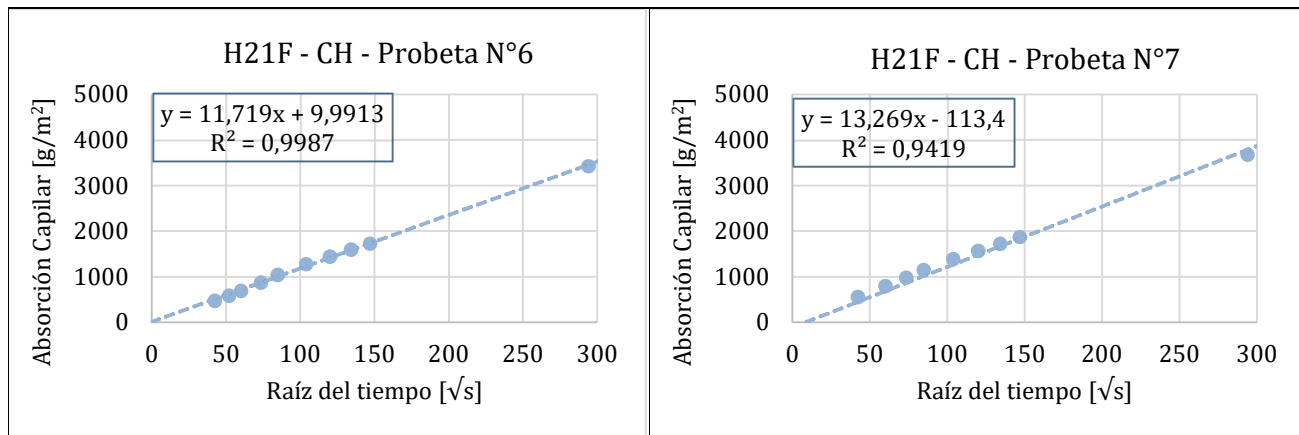


Figura 29. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21F bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.



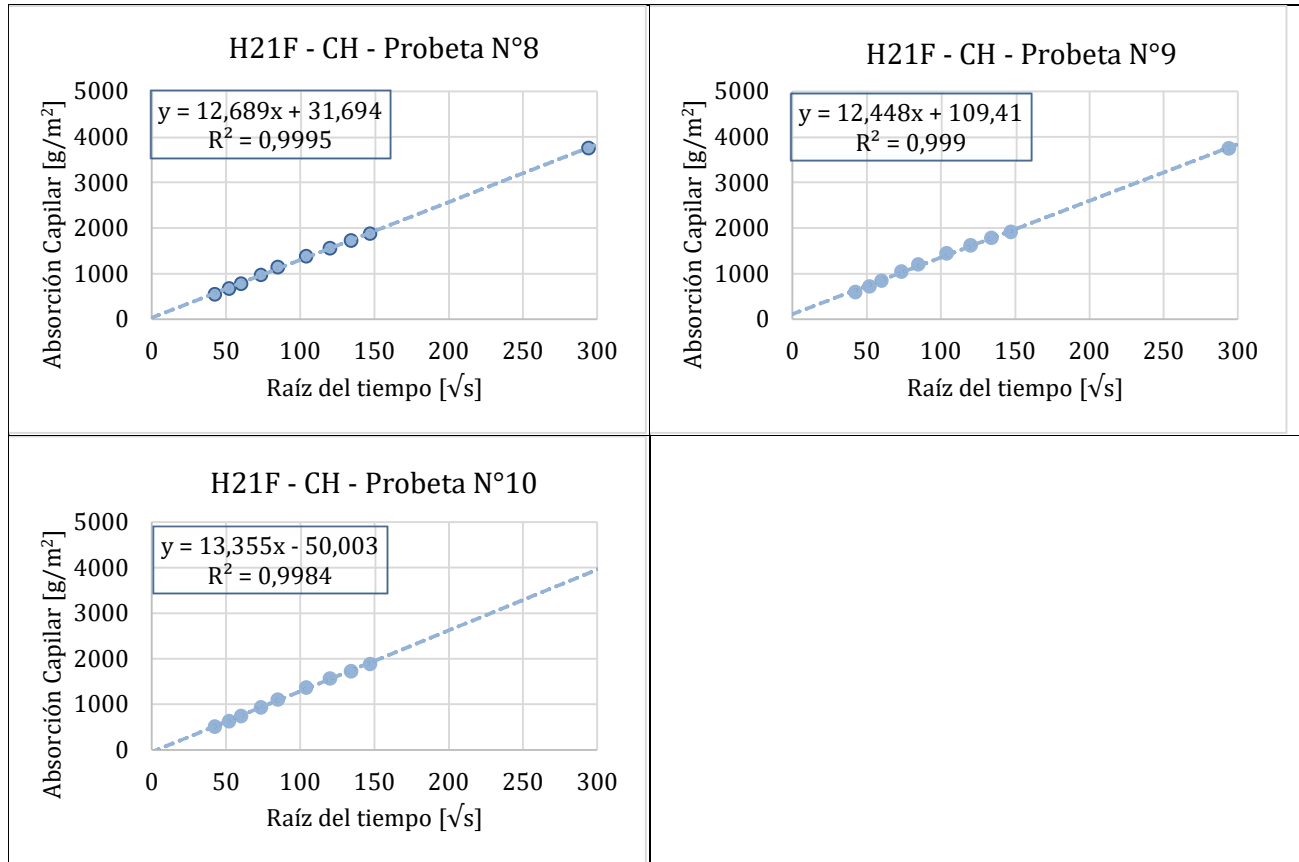


Figura 30. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21F bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.

Curado	N° de Probeta	VSC [g/(m²·√s)]	R²
CS	N°1	11,237	0,9992
CS	N°2	13,436	0,9994
CS	N°3	11,641	0,9985
CS	N°4	11,551	0,9984
CS	N°5	12,092	0,9783
CS	Promedio	11,989	-
CH	N°6	11,719	0,9987
CH	N°7	13,269	0,9419
CH	N°8	12,689	0,9995
CH	N°9	12,448	0,999
CH	N°10	13,355	0,9984
CH	Promedio	12,696	-

Tabla 9. Velocidad de succión capilar – Mezcla H21F.

Los valores obtenidos de las regresiones individuales presentaron en su mayoría coeficientes de determinación superiores a 0,99 indicando un buen ajuste al modelo teórico, con la excepción de las probetas N°5 de CS y la probeta N°7 de CH. Pese a estos menores ajustes ambas probetas

se conservaron en el cálculo del promedio dado que sus valores de VSC se ubican dentro del rango general del grupo y su exclusión no modifica significativamente las conclusiones del análisis.

Sin embargo, los valores promedio presentan una particularidad respecto de las mezclas anteriores: la velocidad de succión capilar en régimen de curado húmedo resultó superior a la de curado seco. Esta tendencia es contraria a la esperada, ya que el curado húmedo debería reducir la velocidad de succión capilar. De todas formas, la magnitud de la diferencia es relativamente pequeña y se encuentra en el rango de variabilidad experimental propia del ensayo, particularmente al considerar las condiciones reales de ejecución descritas previamente.

4.2.2.4. Mezcla H25P

A continuación, se presenta la evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25P bajo curado seco y curado húmedo.

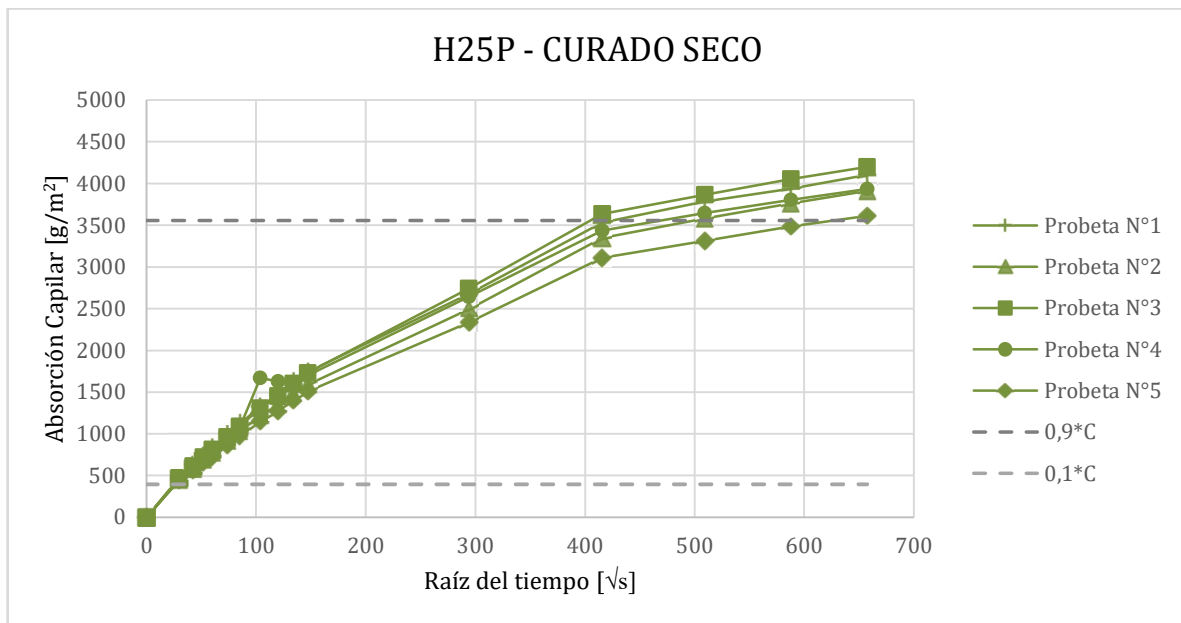


Figura 31. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25P bajo régimen de curado seco (CS).

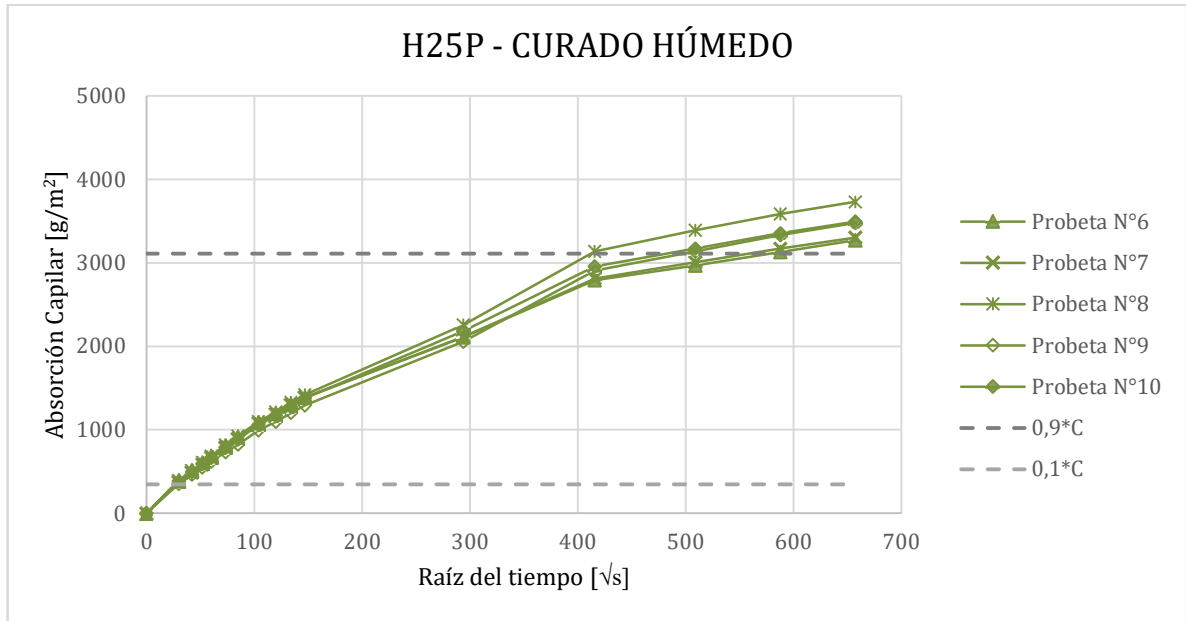
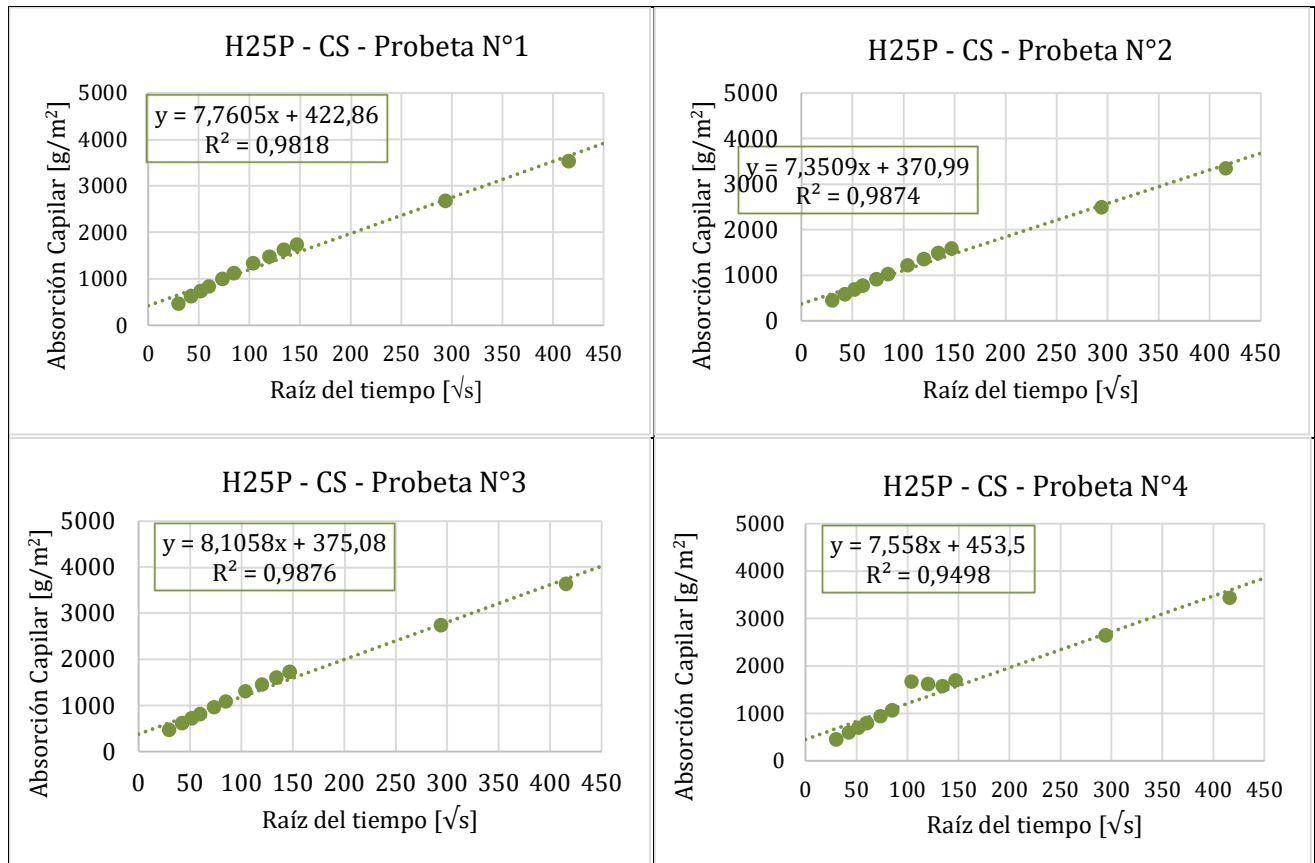


Figura 32. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H25P bajo régimen de curado húmedo (CH).

Las siguientes figuras muestran las regresiones lineales individuales de cada probeta, a partir de las cuales se calcularon los valores de VSC presentados en la tabla resumen.



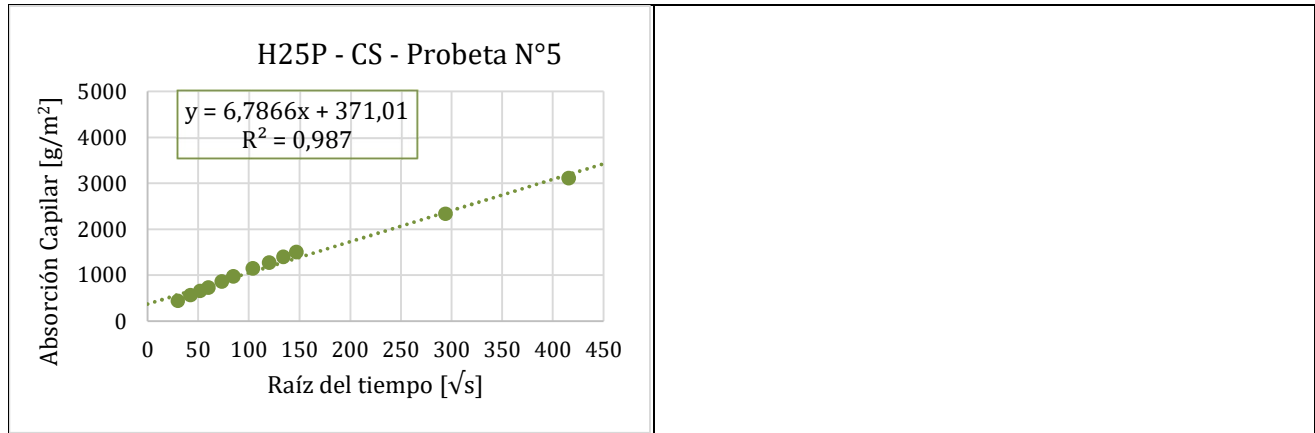
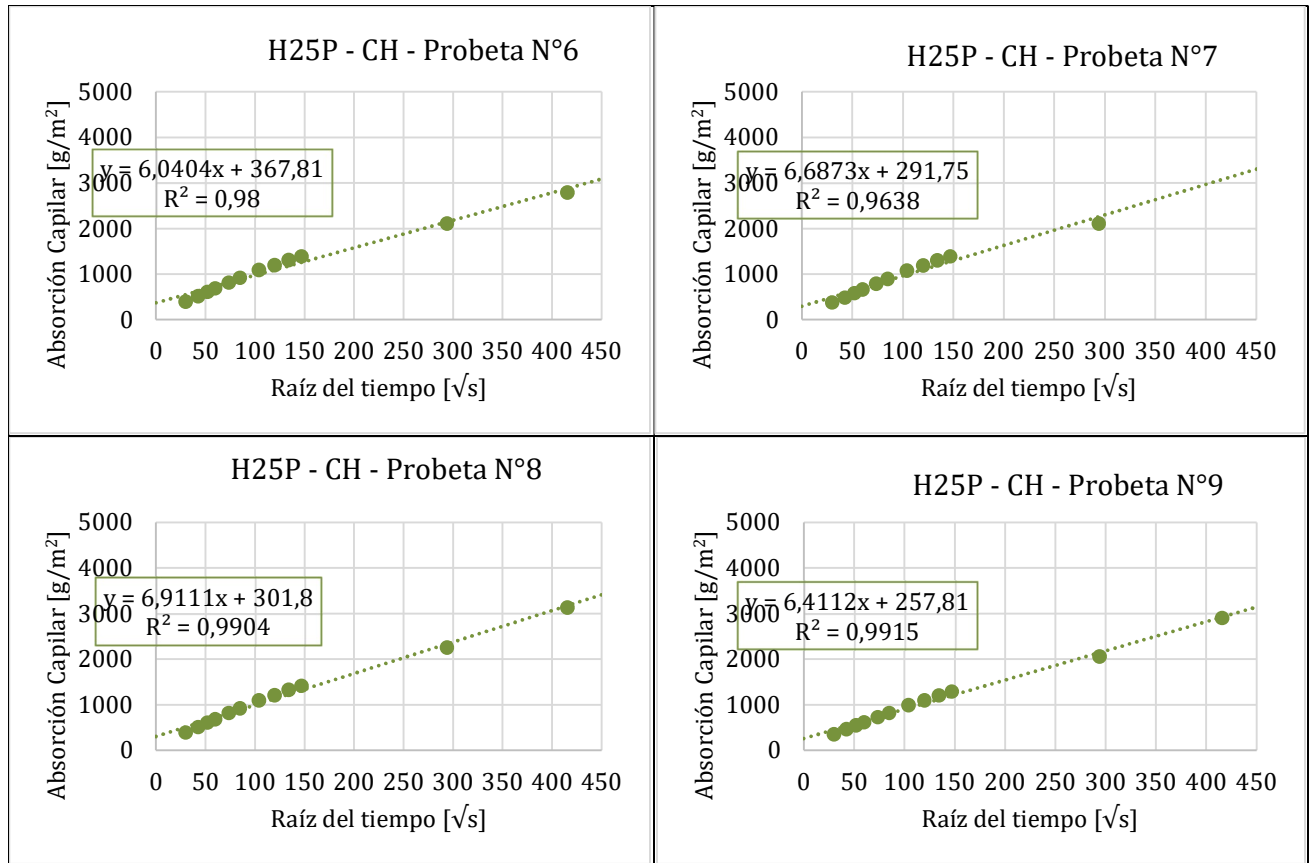


Figura 33. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25P bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.



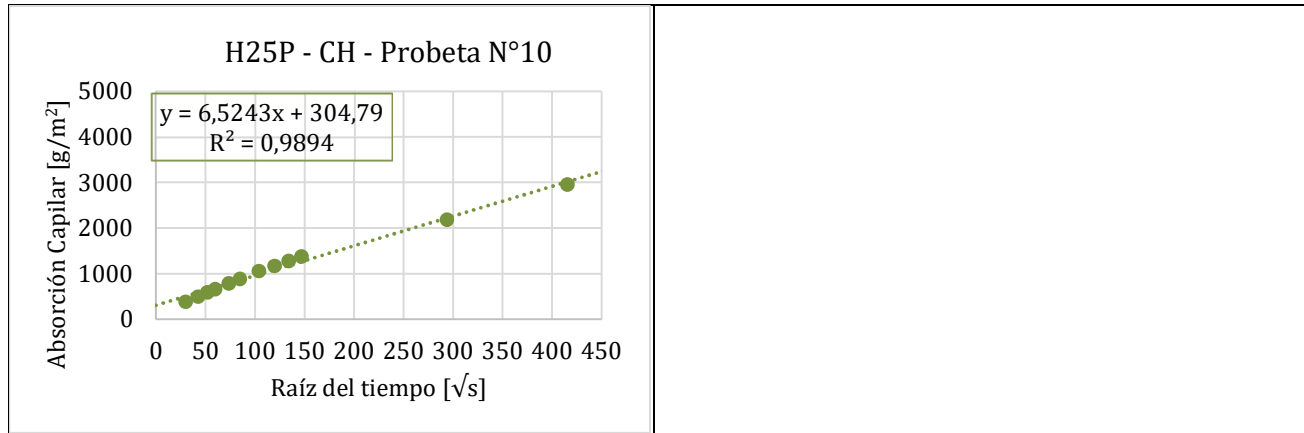


Figura 34. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H25P bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.

Curado	N° de Probeta	VSC [g/(m²·√s)]	R²
CS	N°1	7,7605	0,9818
CS	N°2	7,3509	0,9874
CS	N°3	8,1058	0,9876
CS	N°4	7,558	0,9498
CS	N°5	6,7866	0,987
CS	Promedio	7,5124	-
CH	N°6	6,0404	0,98
CH	N°7	6,6873	0,9638
CH	N°8	6,9111	0,9904
CH	N°9	6,4112	0,9915
CH	N°10	6,5243	0,9894
CH	Promedio	6,5149	-

Tabla 10. Velocidad de succión capilar – Mezcla H25P.

Los coeficientes de determinación de las regresiones individuales se mantuvieron mayormente por encima de 0,98 evidenciando un buen ajuste al modelo lineal, con excepción de las probetas N°4 de CS y N°7 de CH, cuyos ajustes resultaron algo inferior. Ambas probetas se conservaron en el cálculo del promedio dado que sus valores de VSC se ubican dentro del rango general del grupo.

Los valores promedio observados muestran una tendencia consistente con el marco teórico, donde se observa como el aporte de humedad durante el curado húmedo favorece el desarrollo de las reacciones de hidratación.

Resulta destacable, además, que los valores de VSC obtenidos para H25P resulten levemente menores que los registrados a su par de igual categoría resistente con cemento filler H25F. Esta diferencia evidencia el efecto refinador de las puzolanas sobre la red capilar del hormigón, ya que las mismas contribuyen a generar productos de hidratación adicionales que reducen la capacidad del hormigón de transportar agua por capilaridad.

4.2.2.5. Mezcla H21P

A continuación, se presenta la evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21P bajo curado seco y curado húmedo.

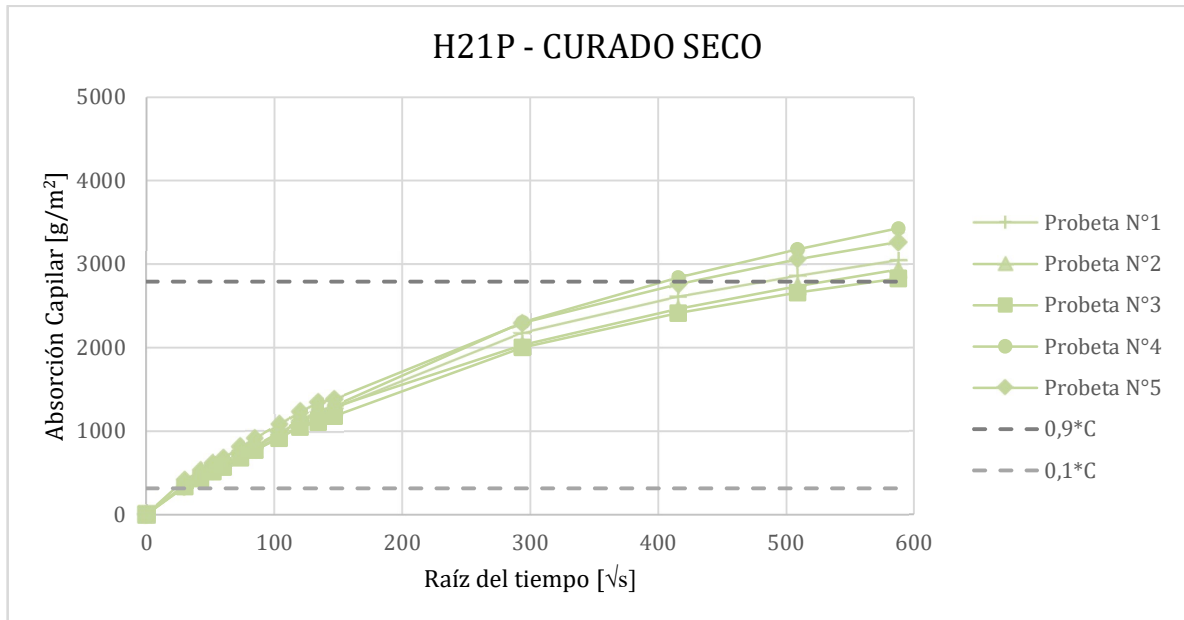


Figura 35. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21P bajo régimen de curado seco (CS).

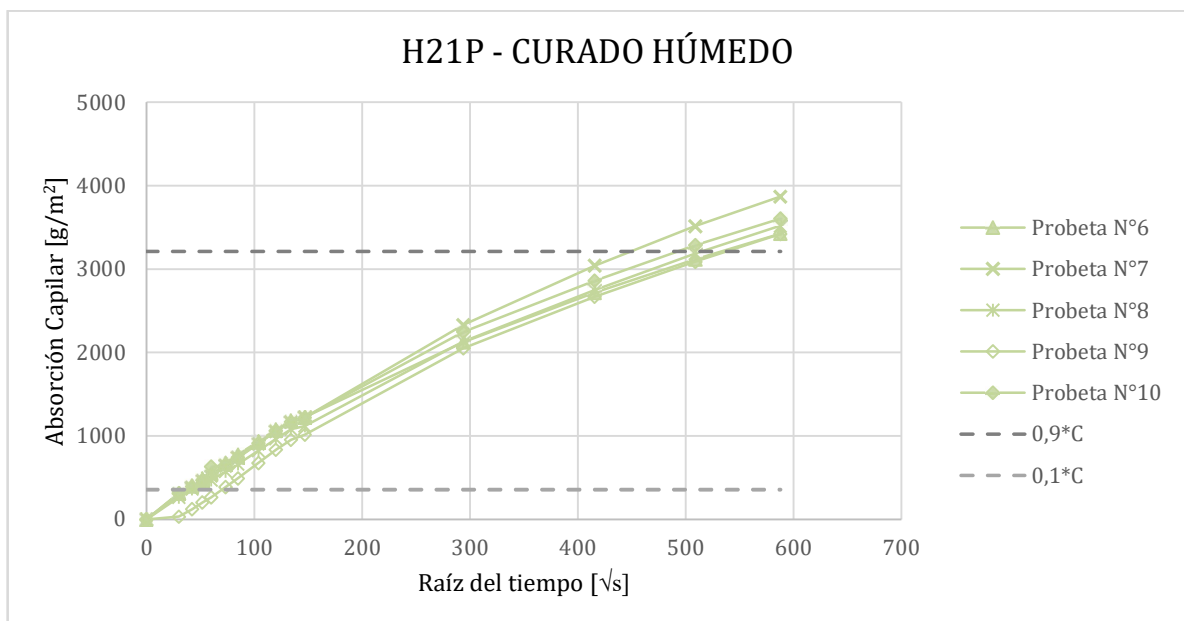


Figura 36. Evolución de la absorción capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para la mezcla H21P bajo régimen de curado húmedo (CH).

Las siguientes figuras muestran las regresiones lineales individuales de cada probeta, a partir de las cuales se calcularon los valores de VSC presentados en la tabla resumen.

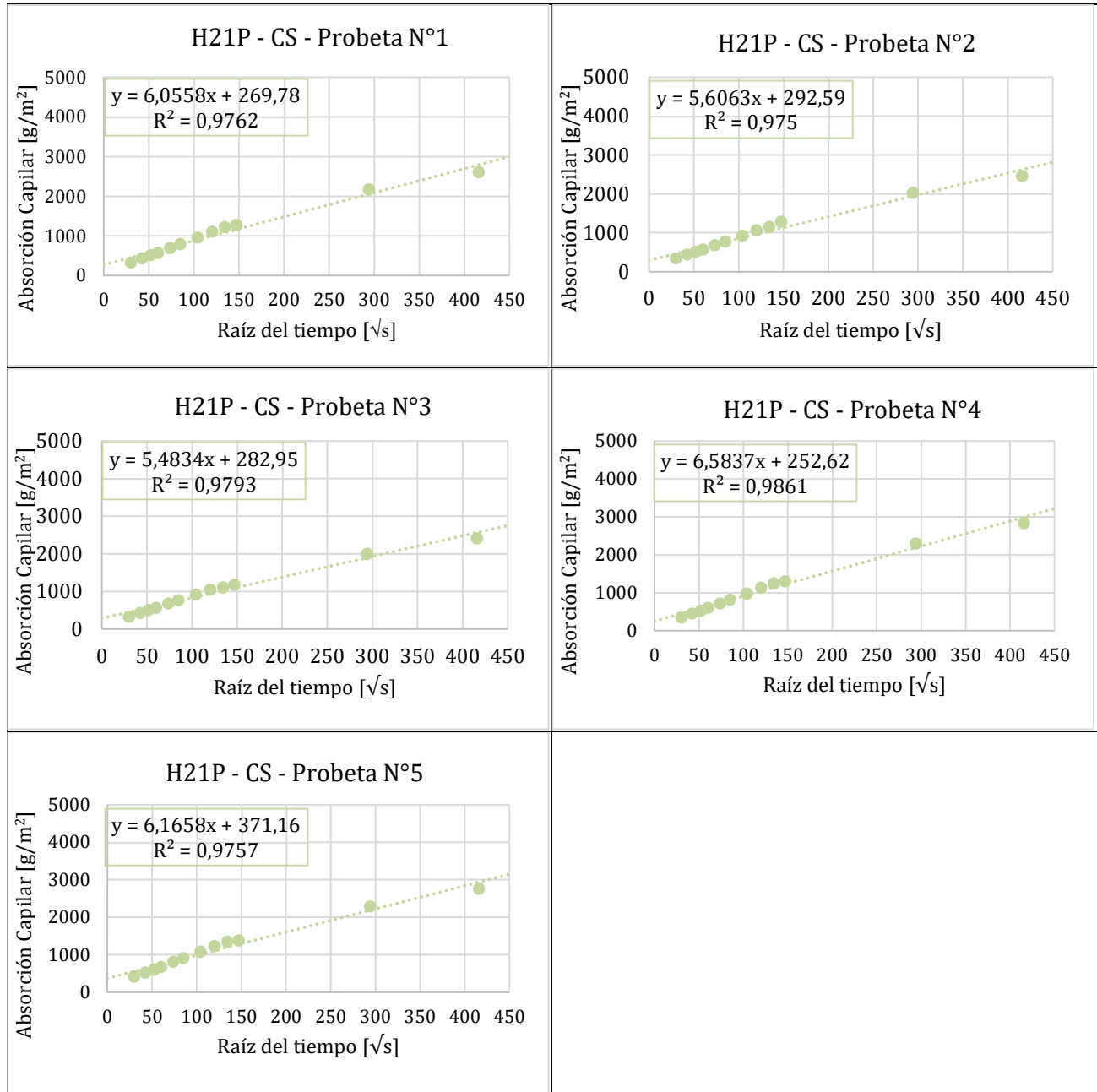


Figura 37. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21P bajo curado seco (CS): (a) Probeta N°1. (b) Probeta N°2. (c) Probeta N°3. (d) Probeta N°4. (e) Probeta N°5.

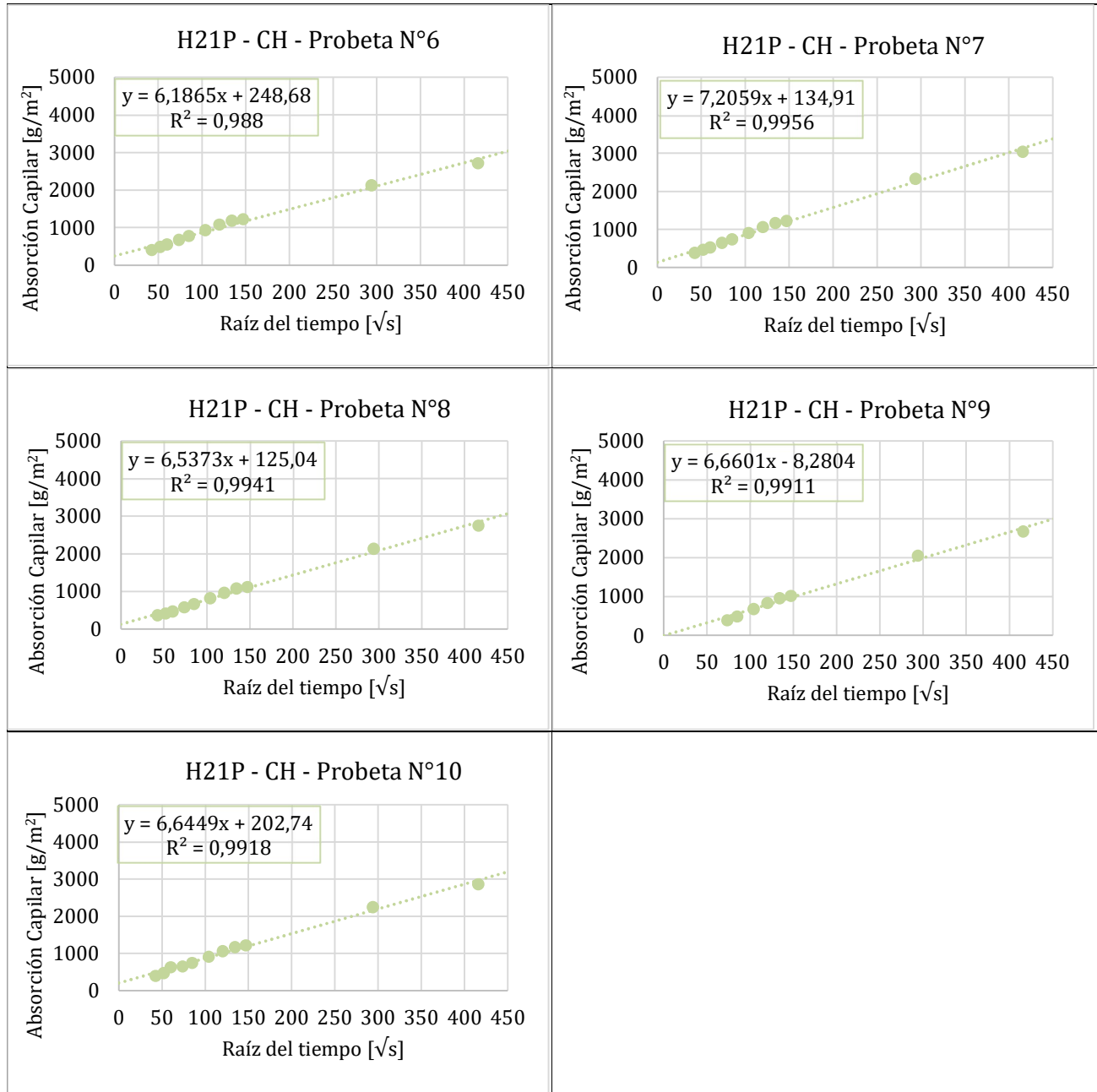


Figura 38. Regresiones lineales individuales aplicadas sobre el tramo lineal de cada probeta para la mezcla H21P bajo curado húmedo (CH): (a) Probeta N°6. (b) Probeta N°7. (c) Probeta N°8. (d) Probeta N°9. (e) Probeta N°10.

Curado	N° de Probeta	VSC [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$]	R^2
CS	N°1	6,0558	0,9762
CS	N°2	5,6063	0,975
CS	N°3	5,4834	0,9793
CS	N°4	6,5837	0,9861
CS	N°5	6,1658	0,9757

CS	Promedio	5,979	-
CH	N°6	6,1865	0,988
CH	N°7	7,2059	0,9956
CH	N°8	6,5373	0,9941
CH	N°9	6,6601	0,9911
CH	N°10	6,6449	0,9918
CH	Promedio	6,6469	-

Tabla 11. Velocidad de succión capilar – Mezcla H21P.

Los valores de los coeficientes de determinación de las regresiones individuales se mantuvieron por encima del 0,975 en todas las probetas, evidenciando un buen ajuste al modelo lineal.

Al igual que en lo observado en la mezcla H21F, la mezcla H21P presenta una tendencia contraria a la esperada, donde la VSC en curado húmedo resultó superior a la del curado seco. Esta inversión que se repite en las dos mezclas de menor categoría resistente independientemente del tipo de cemento empleado, sugiere que el fenómeno está vinculado al comportamiento característicos de los hormigones de baja resistencia, los cuales presentan estructuras capilares más sensibles a las variaciones de ensayo y acondicionamiento previo. En este sentido, las condiciones experimentales pudieron afectar a las mezclas de H21 independientemente de su tipo de cemento y régimen de curado.

Además de esta particularidad, resulta destacable que los valores de VSC obtenidos para H21P son los valores más bajos obtenidos en el ensayo, poniendo en evidencia el efecto significativo del cemento puzolánico.

4.2.2.6. Análisis comparativo

Luego de haber analizado el comportamiento individual de cada mezcla bajo los dos regímenes de curado, resulta significativo realizar un análisis comparativo global que permita identificar las tendencias generales del programa experimental.

En la Figura 39 se presentan los valores promedio de VSC para los hormigones elaborados con CPF, agrupados según régimen de curado.

Los resultados para el hormigón H30F resultan llamativos, dado que los valores obtenidos superan a los de las mezclas de menor categoría resistente, comportamiento contrario al esperable desde el punto de vista teórico. Las irregularidades superficiales observadas durante la etapa de preparación de las probetas pudieron generar microfisuración en las superficies de contacto con la lámina de agua, afectando la calidad del sistema de impermeabilización lateral y dando lugar a vías preferenciales de ingreso de agua, volviendo la muestra poco representativa de la realidad.

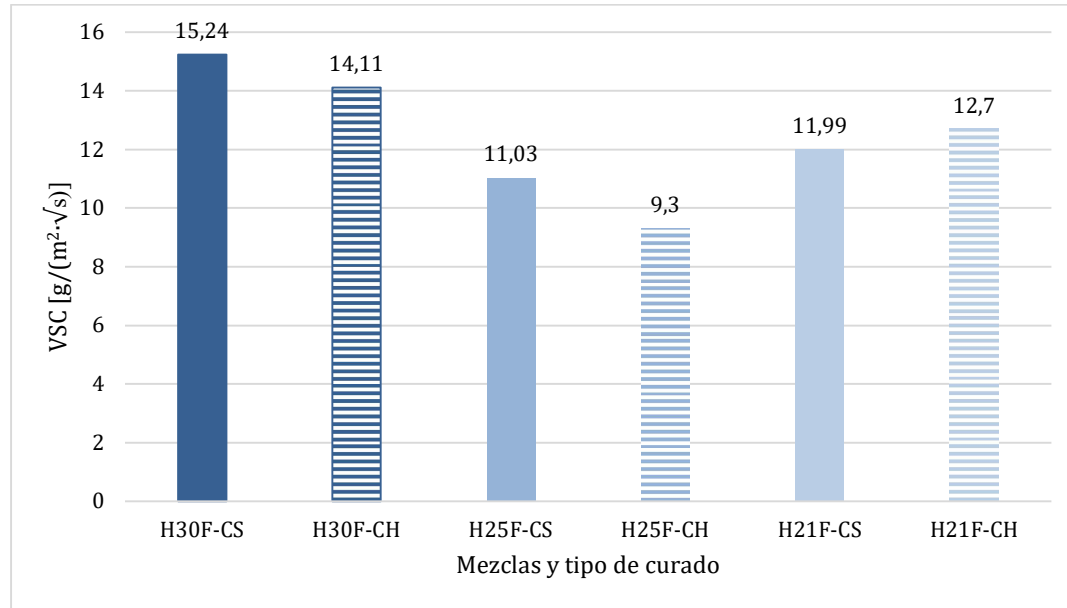


Figura 39. Valores promedio de velocidad de succión capilar para hormigones con cemento CPF 40, discriminada por tipo de curado.

En el comportamiento de H25F y H21F, se observa que los valores de VSC son similares entre ambos en régimen de curado seco, mientras que la diferencia se hace más marcada bajo curado húmedo, donde H25F presenta una reducción del 10,7% respecto del CS, mientras que el hormigón H21F muestra una leve inversión de la tendencia (CH>CS en aproximadamente 5,9%). Esta inversión se asocia a la mayor sensibilidad de las mezclas de baja categoría resistente a las desviaciones del ensayo.

Al igual que en el caso de la resistencia a compresión, y en concordancia con la literatura, se observa un efecto más significativo del curado en hormigones de mayor nivel resistente.

En la Figura 40 se presentan los valores promedios de VSC para los hormigones elaborados con cemento portland puzolánico (CPP 40 ARS), agrupados según el régimen de curado. En primer lugar, se observan tasas de VSC sensiblemente inferiores a sus pares con cemento CPF: 32% y 50% para curado seco y 30% y 47% para curado húmedo, para los niveles H25 y H21 respectivamente. Esta diferencia evidencia el efecto positivo de la adición puzolánica en el confinamiento de la estructura de poros capilares.

En el caso de los hormigones bajo curado húmedo, no se observa una diferencia significativa entre ambos niveles resistentes, mientras que, bajo curado seco, si se observa un peor desempeño del hormigón H25. Este comportamiento sugiere que la falta de un curado húmedo adecuado afecta diferencialmente a los hormigones puzolánicos según el nivel resistente.

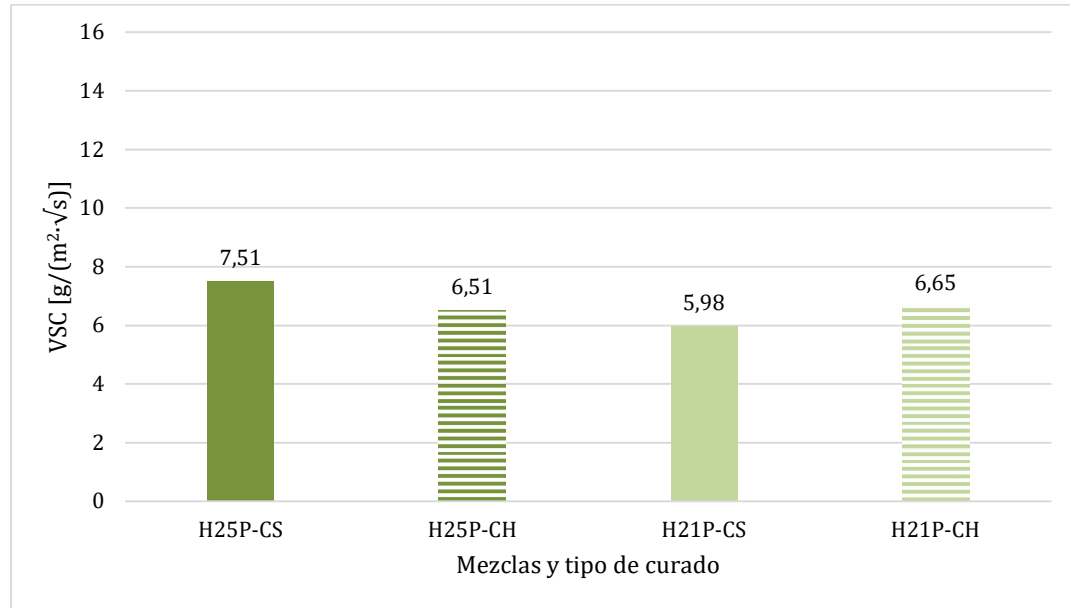


Figura 40. Velocidad de succión capilar para hormigones con cemento CPP 40 ARS, discriminada por tipo de curado.

En tres de las cinco mezclas evaluadas (H30F, H25F y H25P) se observa una menor tasa de VSC con el curado húmedo, que es lo esperable desde el punto de vista teórico. Sin embargo, en las dos mezclas de menor categoría resistente (H21F y H21P) se registra una inversión de esta tendencia.

De esta manera, los resultados obtenidos permiten establecer dos conclusiones parciales: en primer lugar, el tipo de cemento constituye el factor de mayor incidencia sobre la velocidad de succión capilar; en segundo lugar, el efecto del curado húmedo sobre el VSC es claramente positivo en mezclas de mediana y alta resistencia, pero su impacto se diluye en mezclas de baja resistencia donde la mayor sensibilidad a las condiciones experimentales puede llegar a invertir el efecto teórico esperado.

4.2.3. Ensayo de Absorción y Densidad (Norma ASTM C642)

En la Figura 41 se presentan los valores de absorción obtenidos mediante el ensayo de absorción y densidad (Norma ASTM C642) para cada mezcla evaluada, discriminados según el régimen de curado aplicado. Las barras sólidas corresponden a probetas sometidas a curado seco (CS) y las barras con trama horizontal a probetas con curado húmedo (CH).

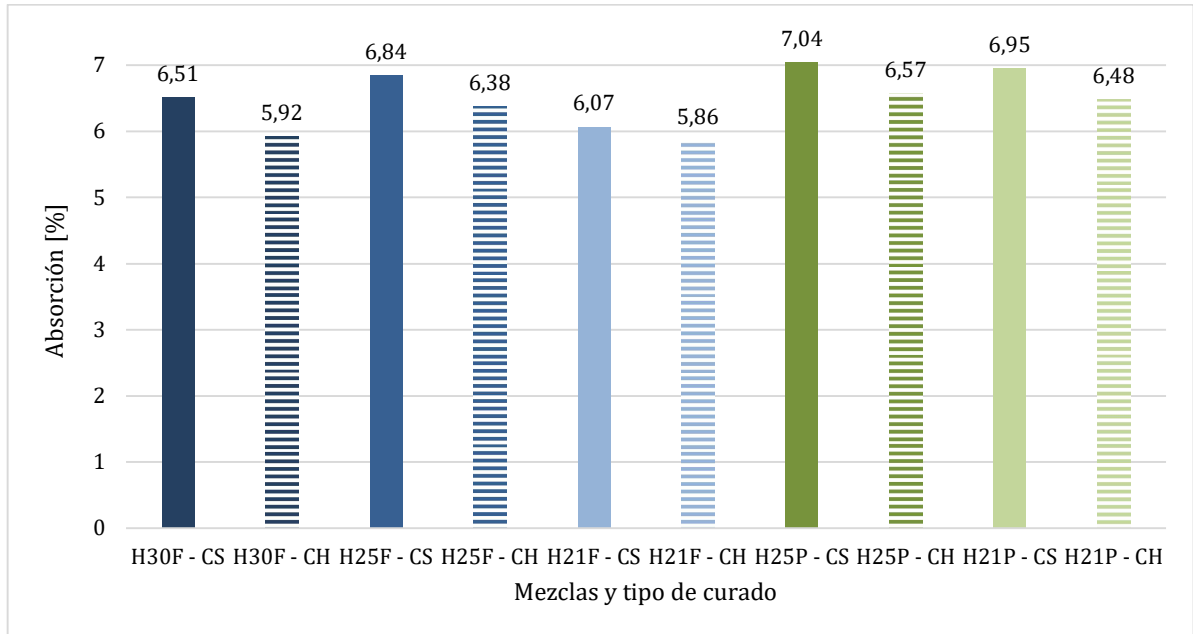


Figura 41. Absorción de agua [%] para las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el régimen de curado, según norma ASTM C642.

En términos generales, según el tipo de cemento, puede observarse una mayor absorción por parte de los hormigones con CPP, lo que indicaría una mayor porosidad de los mismos frente a su equivalente. En segundo lugar, puede observarse que, para todos los grupos, los hormigones con curado húmedo tuvieron una absorción inferior a equivalente con curado seco, nuevamente indicando un efecto del curado en la porosidad final del hormigón.

En cuanto al efecto según el nivel resistente del hormigón, se encuentra aquí un resultado errático, ya que debería esperarse una menor absorción de agua para hormigones de mayor nivel resistente. Sin embargo, se observa para hormigones con CPF una tendencia inversa, mientras que para hormigones CPP se observa lo mismo, pero de forma más acotada.

En la Figura 42 se presentan los valores de densidad aparente determinados a partir del mismo ensayo (Norma ASTM C642), para todos los hormigones y bajo ambos regímenes de curado.

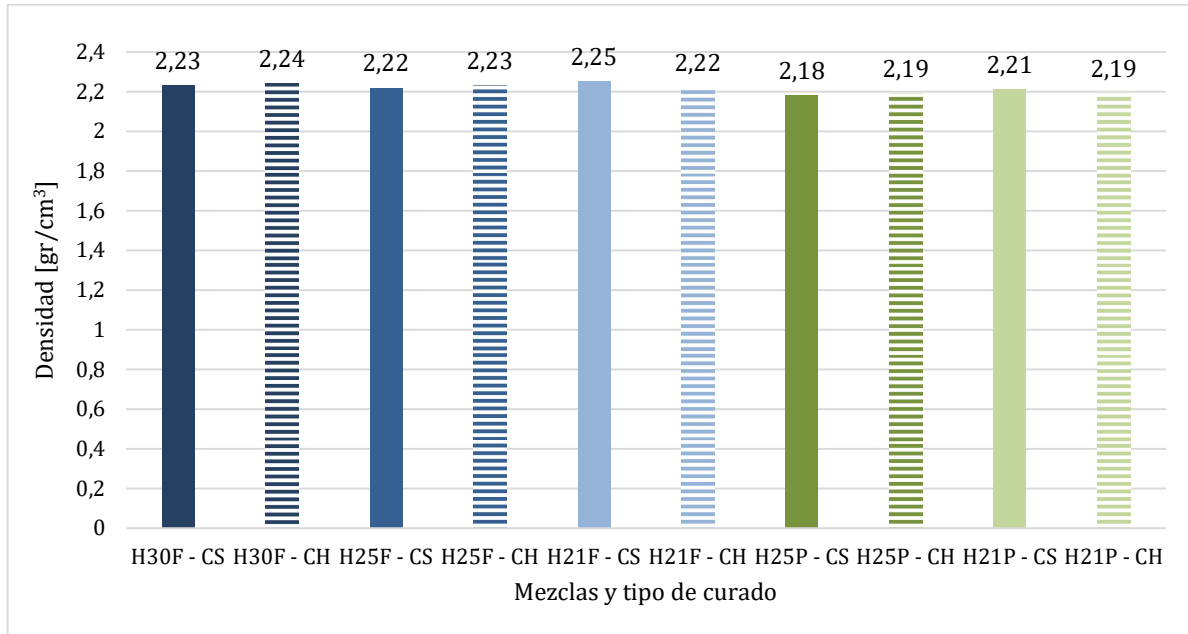


Figura 42. Densidad aparente [kg/m³] de las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el régimen de curado, según norma ASTM C642.

Los resultados obtenidos son análogos a los obtenidos para la absorción, indicando un efecto preponderante del tipo de cemento. En este caso el efecto del tipo de curado presenta una tendencia más errática. Al igual que con los resultados de absorción, el análisis en función del nivel resistente del hormigón muestra una evidencia contraria a la esperada, lo que sugiere algún defecto experimental, o alguna afectación de las muestras durante el ensayo. Sin embargo, todas las densidades obtenidas se encuentran dentro del rango habitual para hormigones industriales de estas características.

4.3. Correlaciones

En el presente apartado, con el objetivo de identificar tendencias para profundizar en la interpretación de los resultados, se analizan las correlaciones entre los principales parámetros evaluados en el programa experimental: la velocidad de succión capilar, la absorción y la resistencia a la compresión.

En la Figura 43 se compara la tasa de VSC con la absorción de cada mezcla. Para los hormigones con cemento puzolánico (CPP) se observa una mayor absorción, aunque a la vez una menor VSC. Este comportamiento puede atribuirse a una diferente configuración de la matriz porosa, según el tipo de cemento utilizado.

Es decir, el efecto puzolánico de esta adición no proviene solamente de una disminución de la porosidad total, sino que además produce una modificación de la conectividad de poros y de la tortuosidad de la red porosa. Esto puede explicar que un hormigón presente una mayor absorción total – asociada a una mayor porosidad total – pero que a la vez manifieste una absorción capilar mucho más lenta, asociada a una red porosa más tortuosa, tal como es señalado por diversos autores.

A las edades de 28 a 45 días en que se realizaron los ensayos, el efecto puzolánico no se encuentra aún desarrollado en su totalidad, mientras que el efecto “dilución” del clinker – al reemplazar parte del mismo por puzolanas – contribuye a la mayor absorción registrada en estos hormigones. Los resultados indican, en consecuencia, que la adición puzolánica tuvo un efecto más acelerado en la absorción capilar del hormigón que en su permeabilidad.

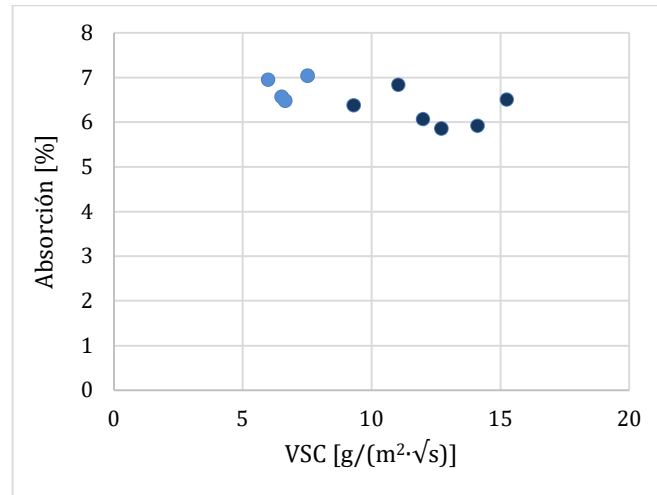


Figura 43. Correlación entre la velocidad de succión capilar y la absorción para las cinco mezclas evaluadas, discriminadas según el tipo de cemento empleado (puntos oscuros: cemento CPF 40; puntos claros: cemento CPP 40 ARS).

En la Figura 44 se observa una correlación entre la resistencia a compresión y la absorción, mostrándose una buena correlación inversa. Esto se explica porque una menor resistencia del material corresponde a una menor sección efectiva para soportar las cargas, es decir, una matriz con mayor cantidad de vacíos (mayor porosidad), lo cual se refleja directamente en una mayor capacidad de absorción de agua.

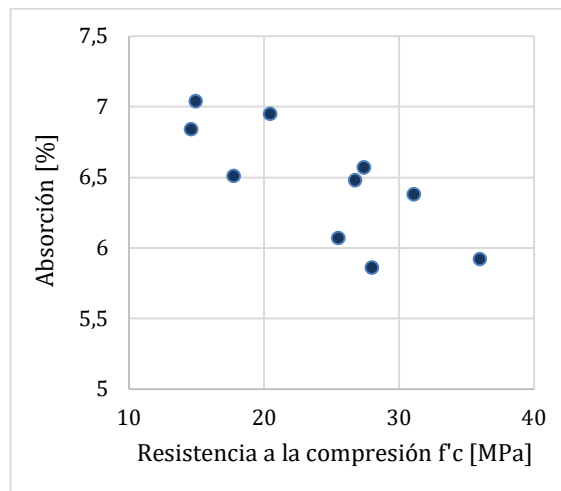


Figura 44. Correlación entre Resistencia a la Compresión y Absorción.

Por el contrario, al comparar en la Figura 45 los resultados de resistencia a la compresión con los de velocidad de succión capilar, no se observa una correlación clara. Esto se atribuye a que, tal como se mencionara anteriormente, la velocidad de succión capilar no se encuentra únicamente relacionada con la porosidad total, sino fundamentalmente con la forma y tortuosidad de la red porosa. En consecuencia, hormigones de similar resistencia a la compresión pueden presentar valores de velocidad de succión capilar diferentes según las características de su estructura porosa.

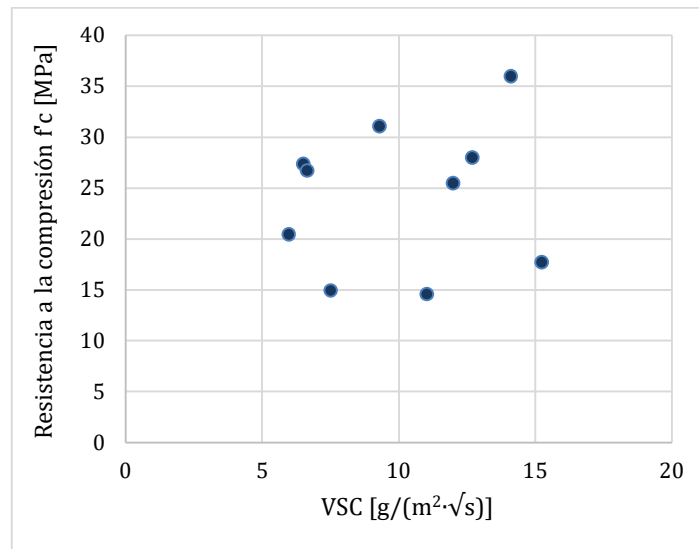


Figura 45. Correlación entre VSC y Resistencia a la Compresión.

5. Conclusiones

En el presente trabajo, se evaluaron experimentalmente las propiedades mecánicas, físicas y de transporte de cinco hormigones de origen comercial elaborados en la región, abarcando tres categorías resistentes (H21, H25 y H30) y dos tipos de cemento de uso habitual (CPF 40 con filler calcáreo y CPP 40 ARS con adiciones puzolánicas). Las cinco mezclas se ensayaron bajo dos regímenes de curado con el objetivo de evaluar la incidencia de las distintas variables sobre el comportamiento del material. A partir de los resultados obtenidos y del análisis desarrollado, se presentan las siguientes conclusiones del trabajo:

- Si bien el ensayo de VSC presentó resultados superiores a los niveles esperados, los datos permitieron extraer resultados comparativos entre las diferentes mezclas.
- En términos generales, se observó un efecto significativo del tipo de curado en los parámetros evaluados. En condiciones de curado húmedo se obtuvieron, en general, mayores resistencias a la compresión, menores tasas de VSC y menores valores de absorción.
- Los efectos del tipo de curado en todas las propiedades evaluadas fueron más pronunciados en hormigones de mayor nivel resistente, o en aquellos con cemento CPP.
- En términos de resistencia, los hormigones curados bajo el régimen seco no alcanzaron, en ningún caso, las resistencias características del hormigón comercial. Asimismo, en

términos de durabilidad, los hormigones curados bajo el régimen seco presentaron peores características de transporte, siendo este efecto aún más pronunciado en los hormigones de mayor nivel resistente.

- Se observó un comportamiento diferenciado según el tipo de cemento empleado. En términos mecánicos, los hormigones con cemento puzolánico CPP 40 ARS mostraron un desempeño levemente inferior al de sus pares con cemento CPF 40. Sin embargo, en términos de durabilidad, el cemento puzolánico mostró un comportamiento significativamente mejor. Este efecto evidencia el efecto de las reacciones puzolánicas en la matriz porosa del material. La hidratación puzolánica puede producir una desconexión de poros o una mayor tortuosidad, reduciendo fuertemente el mecanismo de transporte de absorción capilar, sin modificar sustancialmente la porosidad total del material.
- El análisis de correlaciones demostró que la resistencia a la compresión correlaciona de manera inversa con la absorción del hormigón, permitiendo utilizar este parámetro mecánico como indicador indirecto de la calidad del material.

5.1. Estudios futuros

Producto del análisis de los resultados obtenidos y de las observaciones realizadas durante todo el desarrollo del procedimiento experimental, se presentan a continuación propuestas de mejora para futuras repeticiones de los ensayos presentados.

- Mejorar el procedimiento de manipulación y de corte de las probetas, garantizando superficies regulares, a fin de eliminar posibles vías preferenciales de ingreso de agua.
- Implementar ventilación forzada durante el procedimiento de secado, asegurando una distribución uniforme del flujo de aire dentro de la estufa y, por ende, una mayor estabilidad térmica del proceso.
- Mejorar el proceso de impermeabilización de las probetas.
- Controlar de manera activa las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio durante el periodo de ensayo.
- Ampliar el programa experimental a edades mayores, considerando que las reacciones puzolánicas continúan desarrollándose más allá de los 28-45 días.
- Extender el análisis a otras propiedades de transporte vinculadas a clases de exposición específicas.

El trabajo realizado en el marco de esta tesis y los resultados obtenidos, pueden servir como punto inicial de un proceso de desarrollo de capacidades técnicas en el Laboratorio de Hormigones (LHO) de la Universidad Nacional del Comahue, para implementar este tipo de ensayos de control de durabilidad que resultan altamente relevantes para el sector y en la región.

Bibliografía

- Zambrano Navarrete, Luis Daniel, Alava Santos, Ronnie Jefferson, Ruíz Párraga, Wilter Enrique, & Menéndez Menéndez, Edgar Antonio. (2022). Aplicación de métodos de curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón. *Gaceta Técnica*, 23(1), 35-47. Epub 26 de julio de 2022. <https://doi.org/10.51372/qacetatecnica231.4>.
- Garín, L., Santilli, A., & Pedoja Ingold, E. (2012). Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, (10), 109–114. Recuperado a partir de <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/369>.
- Mehta, P. (2001). Reducing the Enviromental Impact of Concrete. *Concrete International*, 61-66.
- Shafiq, N. y Cabrera, J.G. (2004). Effects of initial curing condition on the fluid transport properties in OPC and fly ash blended cement concrete. *Cement & Concrete Composites*, 381-387.
- Taus, V. L. y Zega, C. J. (2006). SUCCIÓN CAPILAR EN HORMIGONES RECICLADOS EXPUESTOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO., (págs. 21-30).
- Taus, V. L., & Zega, C. J. (2006). Succión capilar en hormigones reciclados expuestos a diferentes condiciones de curado. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*; no. 13, 21-30.
- Toirac Corral, J. (2009). LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN, CONDICIÓN NECESARIA PERO NO. *Ciencia y Sociedad*, vol. XXXIV, núm. 4, 463-504.
- 1536, I. (1978). *Hormigón fresco de cemento. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- 1546, I. (-N. (1992). *IRAM 1546: Hormigón. Método de ensayo de compresión*.
- 201, I. (-R. (2013). *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón – CIRSOC 201*. Buenos Aires: INTI - CIRSOC.
- ASTM. (2013). *ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA; Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM International. (2014). *ASTM C231: Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. West Conshohocken, PA; Estados Unidos: ASTM International.
- Basheer, L., Kropp, J. y Cleland, D.J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, 93-103.
- He, Z.-M., Long, G.-C. y Xie, Y.-J. (2012). Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of steam-cured concrete. 1155-1162.
- IRAM. (1978). *IRAM 1536: Hormigón fresco de cemento. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (1992). *IRAM 1546. Hormigón de Cemento Portland. Método de Ensayo de Compresión*.
- IRAM. (2004). *Hormigón. Preparación y curado en laboratorio de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (2004). *IRAM 1534: Hormigón. Preparación y curado en laboratorio de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*.

- IRAM. (2004). *IRAM 1871: Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (2012). *IRAM 1562: Hormigón fresco de cemento. Método para la determinación de la densidad (masa de la unidad de volumen) y el cálculo del rendimiento y del contenido de aire (gravimétrico)*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (2013). *IRAM 1546: Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM. (2017). *IRAM 50001: Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.