

INFLUENCIA DE LOS CICLOS HIELO-DESHIELO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO (CASO TUNJA)

Diego Fernando Páez Moreno*

Vicente Edilson Leal Moreno**

María Restrepo Burgos***

Recibido: 06/03/2007

Aceptado: 05/10/2009

RESUMEN

El presente artículo contiene el análisis de afectación de un agente de deterioro del concreto, conocido como ciclo hielo-deshielo, que se presenta en Tunja en época de heladas. En él se explica cómo el fenómeno afecta al concreto tanto cualitativa como cuantitativamente en propiedades físicas y mecánicas como porosidad, absorción y resistencia, y en su apariencia física. En la etapa de experimentación se empleó un grupo de 24 probetas cilíndricas de concreto, y se manejaron como variables de experimentación la relación agua/cemento y el tipo de curado, con las que se planteó una matriz de distribución. Para obtener resultados inmediatos se hizo la simulación de este proceso de forma acelerada, llevando los especímenes de concreto a períodos de hielo en la noche y de deshielo en el día, durante un tiempo continuo, en los que se manejaron dos ambientes: uno artificial (refrigerador - temperatura baja) y uno natural (ambiente).

Palabras clave: concreto, ciclo hielo-deshielo, resistencia, afectación por heladas

* Ingeniero Civil, Universidad Nacional (sede Bogotá). Magister Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor Asistente - Programa de Transporte y Vías - Facultad de Ingeniería - UPTC Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Tunja. Grupo de Investigación GRINFRAVIAL Cra 9 No.42*-05, diego.paez@uptc.edu.co 3002161981

** Ingeniero Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, vicente.leal@uptc.edu.co

*** Ingeniero Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, marililis@yahoo.com

INFLUENCE OF FREEZE-THAW CYCLES IN THE RESISTANCE CONCRETE (TUNJA CASE)

ABSTRACT

This article refers to the analysis of a concrete deterioration agent affectation, known as cycle ice - defrosting, which appears in Tunja at time of frosts. It is explained how the phenomenon qualitative and quantitatively affects the concrete in physical and mechanical properties like porosity, absorption, and resistance, as well as in its physical appearance. In the experimentation stage, a group of 24 cylindrical test tubes of concrete was used. Water/cement relation and type for curing were used as experimentation variables, with them a distribution matrix was proposed. In order to obtain immediate results, a simulation of this process in an accelerated way was made: concrete parts were taken to frosting periods at night and to defrosting periods during the day, at a continuous time in which two environments were used, an artificial one (refrigerator - low temperature) and a natural one (the environment).

Key Words: concrete, freeze thaw action, resistance, influenced by frost

INTRODUCCIÓN

El caso particular de la ciudad de Tunja capital del departamento de Boyacá, es la incidencia directa de una serie de fenómenos climáticos de tipo cíclico sobre la calidad del concreto que se elabora y emplea en la construcción de las estructuras de esta ciudad. Uno de estos, es el fenómeno originado en la época de las heladas, con bajas temperaturas en la madrugada y altas temperaturas en el día, que generan, a su vez, ciclos hielo-deshielo durante este periodo.

Con el desarrollo del proyecto se quiso observar y conocer cualitativa y cuantitativamente la degradación y afectación directa de los cambios de temperatura ocasionados por estos ciclos, sobre probetas de concreto en donde se han variado las condiciones de curado, en la resistencia del concreto empleado en la ciudad de Tunja y así obtener un registro de la información recolectada y de algunos parámetros de comportamiento con el fin de evaluar si este fenómeno le genera una afectación importante al concreto en cuanto a su calidad y resistencia.

Algunos autores han concluido en sus estudios que el concreto presenta afectaciones por el retardo del fraguado, y disminución de la resistencia cuando la temperatura del ambiente está por debajo de los 5° C como se muestra en Menéndez [1]. Adicionalmente, se han encontrado parámetros de afectación dentro de la estructura química del cemento a partir de los ciclos de enfriamiento que afectan de manera drástica la durabilidad del concreto con el tiempo como se muestra en Pigeon y Pleau [2].

1. DEFINICIONES INICIALES

La estructura porosa del concreto hace referencia al sistema conformado por todos los poros contenidos y su distribución en el interior de su masa. El comportamiento del concreto frente a

las diferentes acciones agresivas (físicas, químicas y biológicas) del medio está condicionado por el transporte de sustancias en el interior de su estructura porosa, como se muestra en Menéndez [1].

Dentro de la porosidad del concreto, la porosidad fundamental corresponde a los poros interconectados y representa el máximo contenido reversible en agua; en el caso de la pasta de cemento es del orden de un 20% o un 30%. Esta porosidad está relacionada con el transporte de líquidos, gases y el intercambio de sustancias disueltas de acuerdo con Menéndez [1].

Menéndez [1] considera dos parámetros fundamentales relacionados con el transporte de sustancias al interior de los poros: la porosidad fundamental y la distribución del tamaño de los poros; este último condiciona el tipo y velocidad de mecanismo de transporte.

Según el tamaño de los poros del concreto se clasifican en macroporos, poros capilares y microporos, (figura 1); los primeros corresponden a las burbujas de aire atrapadas naturalmente (poros de compactación) y/o a las incluidas intencionalmente (poros de aire ocluido); los segundos son los poros que se encuentran por fuera del gel de cemento, son de forma variable, y pueden o no estar interconectados y abiertos al exterior; y los últimos están constituidos por los poros de la pasta hidratada y endurecida. Usualmente estos poros no intercambian agua con el medio ambiente de acuerdo con Sánchez de Guzmán [3].

Los poros que están relacionados directamente con la durabilidad del concreto y el transporte de sustancias hacia este son los macroporos y los poros capilares. Los poros de gel, por su tamaño, son prácticamente no helables.

1.1 Durabilidad

La durabilidad del concreto está definida como la capacidad que tiene éste para resistir las acciones del entorno, medio ambiente que lo rodea, que le

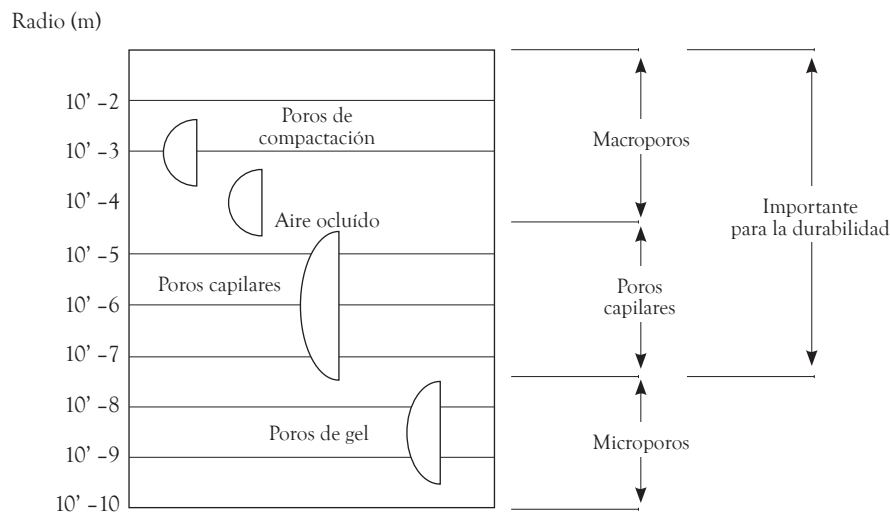


Figura 1. Esquema de la distribución del tamaño de poros en el hormigón

Fuente: [3], p37.

pueda generar cualquier proceso de deterioro. La durabilidad de cualquier estructura de concreto depende de diversos factores, tales como el diseño y cálculo de la estructura, los materiales empleados, las prácticas constructivas (mano de obra calificada) y los procesos de protección y curado, que se desarrollan en las diferentes etapas o procesos de consecución del proyecto. Dichos factores generan unas condiciones iniciales de resistencia frente a las sollicitaciones de servicio y establecen algunas características del concreto en el nivel externo y en el interno, textura superficial, estructura y microestructura o poros en el interior de la masa de concreto.

Al ser rebasada la capacidad de resistencia se generan sobreesfuerzos en la estructura que, a su vez, producen microfisuras y/o macrofisuras, que en conjunto con los poros, de acuerdo con su tipo, tamaño y distribución, crean un puente entre el ambiente que rodea al concreto y la estructura interna del mismo, estableciendo caminos ideales para los mecanismos de transporte de fluidos que en interacción con el clima (temperatura, presión, humedad) ocasionarán el inicio y/o propagación de deterioro del concreto por acciones físicas,

químicas y/o biológicas o del refuerzo (corrosión), que afecta el comportamiento de la estructura de concreto en aspectos importantes como resistencia, rigidez y permeabilidad del mismo.

1.2 Mecanismos de daño

El concreto, aunque es un material bastante resistente, no es invulnerable a los efectos del medio ambiente en el que se encuentre. El efecto prolongado de deterioro de los diferentes agentes o acciones sobre las estructuras de concreto ocasiona un descenso en los tiempos o períodos de vida útil y de servicio de las mismas.

Dentro de los diferentes mecanismos de deterioro del concreto, relacionados con el medio ambiente en el que se encuentre, se tienen: acciones físicas, químicas y biológicas.

Las acciones físicas son aquellas de las que se derivan los cambios volumétricos que experimenta el concreto en cualquiera de sus estados, debido a los cambios de humedad y/o de temperatura, y variaciones en la masa, que se ven reflejados principalmente en cambios en el peso unitario, la porosidad, permeabilidad y hermeticidad. Los

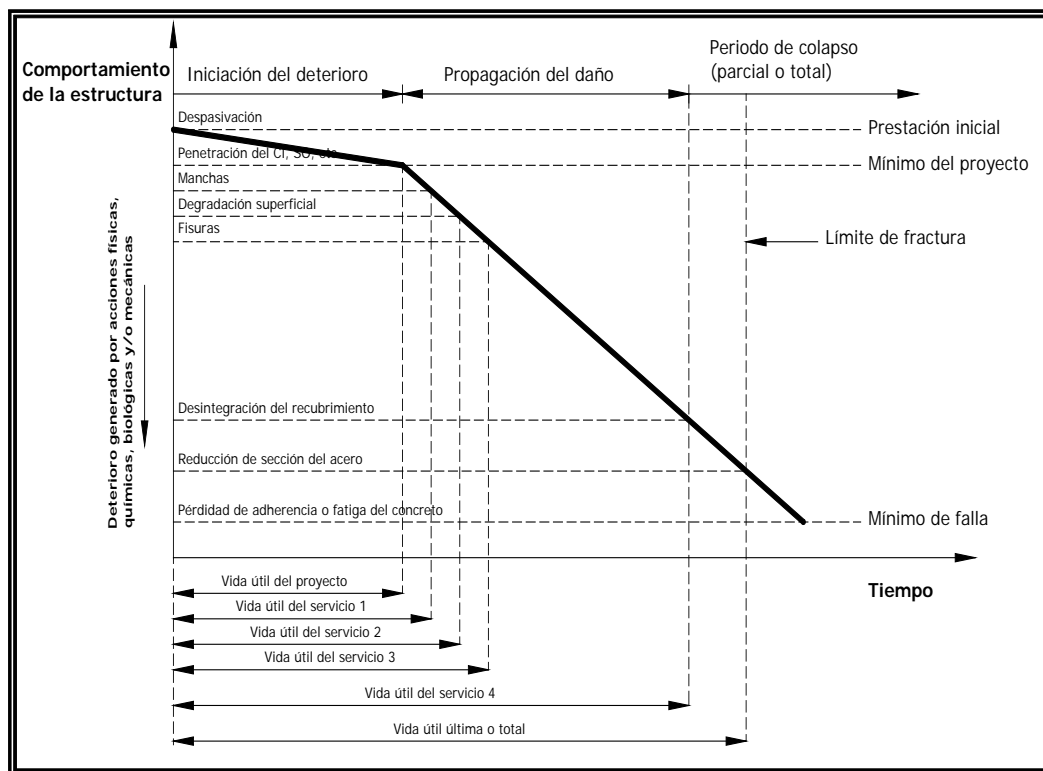


Figura 2: Comportamiento del concreto ante deterioro prolongado

Fuente: De [3], p16.

cambios volumétricos son causados por la contracción o dilatación del concreto, movimientos de la formaleta en la etapa de vaciado y/o fraguado, por la acción de heladas tempranas, cambios de humedad, cambios de temperatura o ataque por fuego. Sus efectos se ven reflejados en la formación de fisuras y grietas.

Un ciclo hielo-deshielo es un fenómeno cíclico de congelamiento y descongelamiento del agua contenida en los poros del concreto endurecido en periodos de tiempo determinados. Constituye uno de los agentes agresores más destructivos del concreto, ya que involucra y afecta tanto la pasta y los agregados individualmente como en conjunto según Menéndez [1].

El deterioro del concreto por el ciclo hielo-deshielo se da cuando al congelarse la masa de agua contenida en los poros (macroporos y poros

capilares) del mismo se expande hasta aproximadamente un 9% de su volumen en estado líquido, lo cual genera grandes esfuerzos de tracción en la masa de concreto (pasta y agregados), haciendo que se fracture por su baja resistencia a la tracción, y origine grietas o fisuras para liberar las tensiones producidas.

Como se aprecia en la figura 3, sus efectos abarcan la aparición de fisuras, descamación superficial, ensanchamientos, aumento en la porosidad, desagregación de la pasta y pérdida de masa. Cuanto más contenido de agua y altas condiciones de saturación del material, mayor es su incidencia destructiva.

En cuanto a procesos, cuando en la etapa de fraguado del concreto se alcanza un descenso significativo de temperatura del ambiente, específicamente por debajo de los 4°C de temperatura,

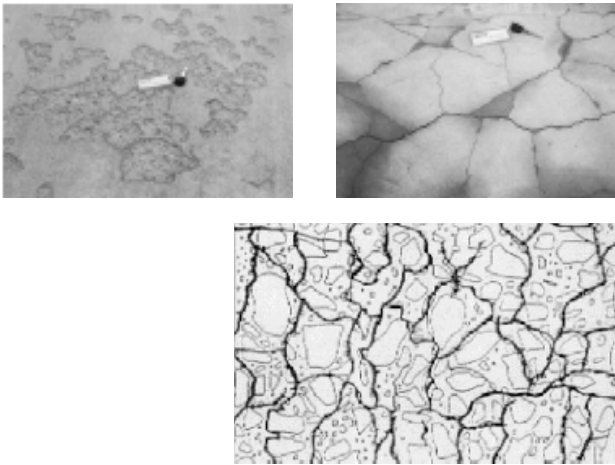


Figura 3. Efectos típicos en el concreto por la acción de los ciclos.

Fuente: [1].

se produce la interrupción del fraguado, y con el congelamiento del agua se bloquean los enlaces para la hidratación y reacción del cemento, es decir, se rompen los enlaces establecidos por los geles de cemento hidratado según Menéndez [1].

2. PROCESO EXPERIMENTAL

Con el proyecto se pretendió hacer una modelación de la afectación del fenómeno ciclos hielo-deshielo de forma acelerada, para lo cual se elaboró un grupo de 24 probetas cilíndricas de concreto manejando dos variables de experimentación aparte del ambiente, que fueron la variación en el tipo de curado y en la relación agua-cemento.

2.1 Diseño de las probetas

Para el diseño de las probetas de concreto se llevaron a cabo dos etapas: la caracterización de los materiales y el diseño de mezcla. Con la primera se definieron las cualidades y propiedades físicas de los materiales (agregado grueso y agregado fino), y con la segunda se definió la dosificación óptima de cada componente del concreto



Figura 4: Probetas elaboradas

Fuente: Elaboración propia

2.2 Variables de experimentación

Con el fin de encontrar valores comparativos del fenómeno se establecieron dos variables de experimentación: la relación agua/cemento y tipo de curado. Para la primera se determinaron dos relaciones; 0,5 (siendo éste un valor típico en los concretos) y 0,7 (como un valor extremo a manera de comparación, y caso especial); y para la segunda tres condiciones: sin curado, curado en laboratorio y curado en obra; con éste último se quiso simular esta actividad como realmente se lleva a cabo en una obra sobre los elementos de concreto.

La acción de curado de las probetas se llevó a cabo durante los primeros siete días después del vaciado, como lo estipula la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica con su NSR.98 [4] durante el periodo de deshielo de las probetas, 12 horas.

A continuación, se describen los diferentes tipos de curado utilizados durante la experimentación:

Sin curado: durante los primeros siete días contados a partir del día de vaciado, el suministro de agua fue nulo, las probetas estuvieron bajo techo protegidas del agua (lluvia).

Curado en obra: consistió en curado por riego (aspersión), queriendo simular la forma como se

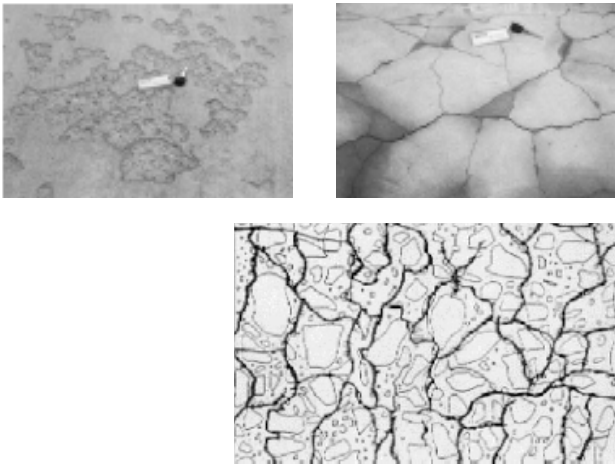


Figura 3. Efectos típicos en el concreto por la acción de los ciclos.

Fuente: [1].

se produce la interrupción del fraguado, y con el congelamiento del agua se bloquean los enlaces para la hidratación y reacción del cemento, es decir, se rompen los enlaces establecidos por los geles de cemento hidratado según Menéndez [1].

2. PROCESO EXPERIMENTAL

Con el proyecto se pretendió hacer una modelación de la afectación del fenómeno ciclos hielo-deshielo de forma acelerada, para lo cual se elaboró un grupo de 24 probetas cilíndricas de concreto manejando dos variables de experimentación aparte del ambiente, que fueron la variación en el tipo de curado y en la relación agua-cemento.

2.1 Diseño de las probetas

Para el diseño de las probetas de concreto se llevaron a cabo dos etapas: la caracterización de los materiales y el diseño de mezcla. Con la primera se definieron las cualidades y propiedades físicas de los materiales (agregado grueso y agregado fino), y con la segunda se definió la dosificación óptima de cada componente del concreto



Figura 4: Probetas elaboradas

Fuente: Elaboración propia

2.2 Variables de experimentación

Con el fin de encontrar valores comparativos del fenómeno se establecieron dos variables de experimentación: la relación agua/cemento y tipo de curado. Para la primera se determinaron dos relaciones; 0,5 (siendo éste un valor típico en los concretos) y 0,7 (como un valor extremo a manera de comparación, y caso especial); y para la segunda tres condiciones: sin curado, curado en laboratorio y curado en obra; con éste último se quiso simular esta actividad como realmente se lleva a cabo en una obra sobre los elementos de concreto.

La acción de curado de las probetas se llevó a cabo durante los primeros siete días después del vaciado, como lo estipula la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica con su NSR.98 [4] durante el periodo de deshielo de las probetas, 12 horas.

A continuación, se describen los diferentes tipos de curado utilizados durante la experimentación:

Sin curado: durante los primeros siete días contados a partir del día de vaciado, el suministro de agua fue nulo, las probetas estuvieron bajo techo protegidas del agua (lluvia).

Curado en obra: consistió en curado por riego (aspersión), queriendo simular la forma como se

lleva a cabo este proceso en las obras de construcción convencionales. El curado se hizo con la aplicación de agua a intervalos de tiempo variable, dependiendo de las condiciones climatológicas presentadas durante el día.

Curado en laboratorio: se trató de curado por inmersión, en donde las probetas estuvieron en contacto directo y permanente con el agua sumergidas en una tina con agua limpia de tal forma que las tapara completamente.

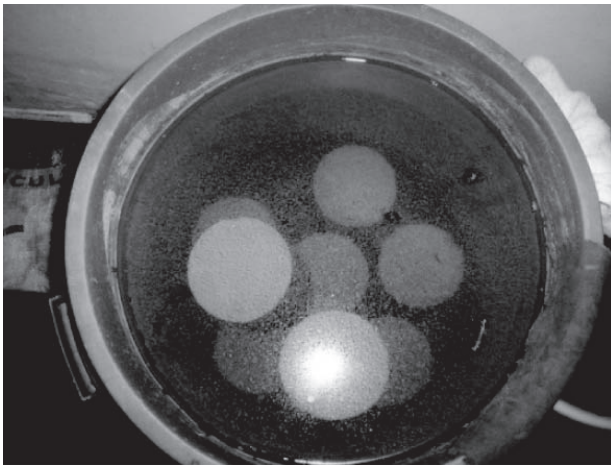


Figura 5: Probetas en curado en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia

2.3 Grupos de trabajo (probetas) – distribución

Se elaboró un grupo de 24 probetas cilíndricas de concreto distribuidas en subgrupos, de acuerdo con las variables de experimentación establecidas, de la siguiente forma:

- 12 probetas con una relación agua/cemento de 0,5, las cuales se subdividieron en 3 grupos de acuerdo con las condiciones de curado (curado en obra, curado en laboratorio y sin curado). Cada uno de estos se conformó por 4 especímenes, 3 de los cuales se afectaron con los ciclos dejando al restante como patrón.
- 12 probetas con una relación agua/cemento de 0,7, las cuales se subdividieron en 3 grupos de acuerdo con las condiciones de curado (curado en obra, curado en laboratorio y sin curado), siguiendo la misma distribución que el anterior. (figura 6)

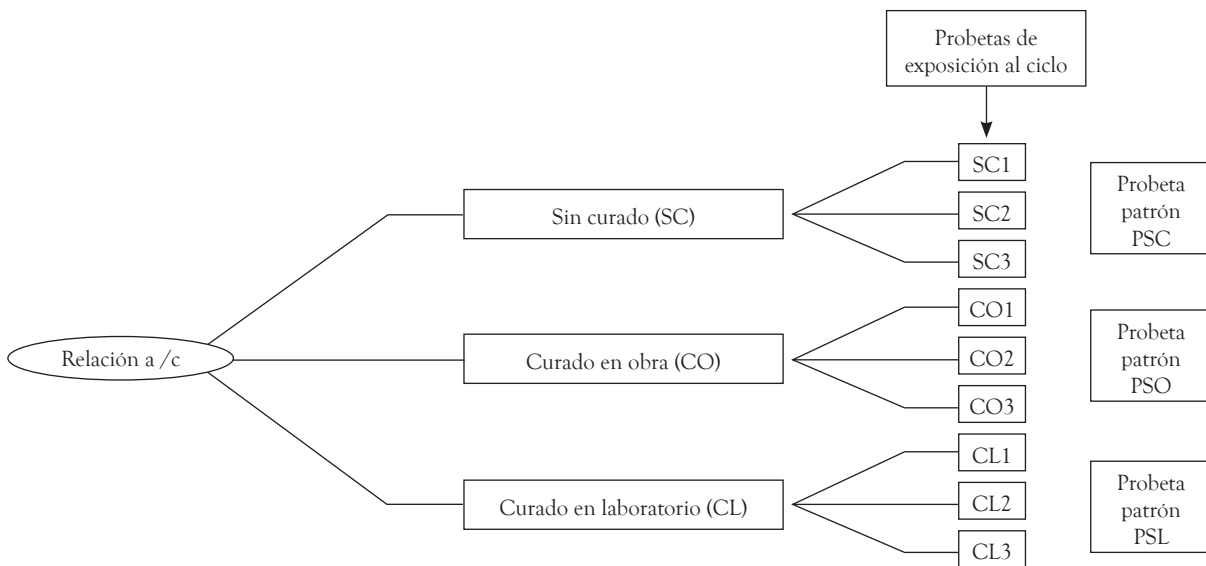


Figura 6: Esquema tipo para cada relación agua/cemento

Fuente: Elaboración propia



Artificial: -2°C hasta -8°C de temperatura
Natural: Temperatura ambiente



Tiempo del ciclo: 12 horas (noche)
Tiempo del ciclo: 12 horas (día)

Figura 7. Condiciones climáticas para la simulación del fenómeno

Fuente: Elaboración propia

2.4 Ciclos de exposición

La ciudad de Tunja, capital del departamento de Boyacá, presenta una serie de fenómenos climáticos de tipo cíclico como lo es el fenómeno de ciclo hielo-deshielo, durante los periodos de día y noche, en donde se experimentan temperaturas de -1.1°C a 25.2°C ^{*}, los cuales generan una incidencia directa sobre la calidad del concreto que se elabora y emplea en la construcción de las estructuras que se encuentran aquí.

Para simular el fenómeno natural se definieron dos etapas, hielo y deshielo, para las cuales se trabajaron dos condiciones climáticas, una artificial y otra natural. La artificial como representación de temperaturas bajo cero (etapa hielo) se obtuvo mediante la implementación de un congelador en donde se manejaron temperaturas desde -2 hasta -8 grados centígrados para generar un efecto de deterioro acelerado. Y la natural, etapa deshielo, representada por la temperatura ambiente. (figura 7)

El período de afectación de las probetas al ciclo de hielo-deshielo se constituyó en intervalos de 24 horas durante 71 días. La etapa de hielo abarcó 12 horas, comprendidas en la noche en donde las probetas permanecían en el congelador (ambiente artificial); la etapa de deshielo se llevó a cabo en el día, al ambiente natural completando el ciclo con las 12 horas restantes. Los ciclos de afectación empezaron inmediatamente después de desencofradas la probetas, para evaluar la incidencia de este en el concreto a edad temprana.

Se tomaron observaciones y registros de los cambios presentados por las probetas y en forma muy general anotaciones de las condiciones climáticas a las que estuvieron expuestas. Los cambios que se presentaron en las probetas fueron registrados en cada una de ellas localizándolas con colores y demarcándolas (figura 8).

Se desarrollaron dos tipos de ensayos: físico tal como toma de peso, dimensión, absorción y porosidad abierta; y mecánico, ensayo de resistencia a la compresión. Los más relevantes fueron absorción y porosidad abierta y resistencia a la compresión.

* Estación Meteorológica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

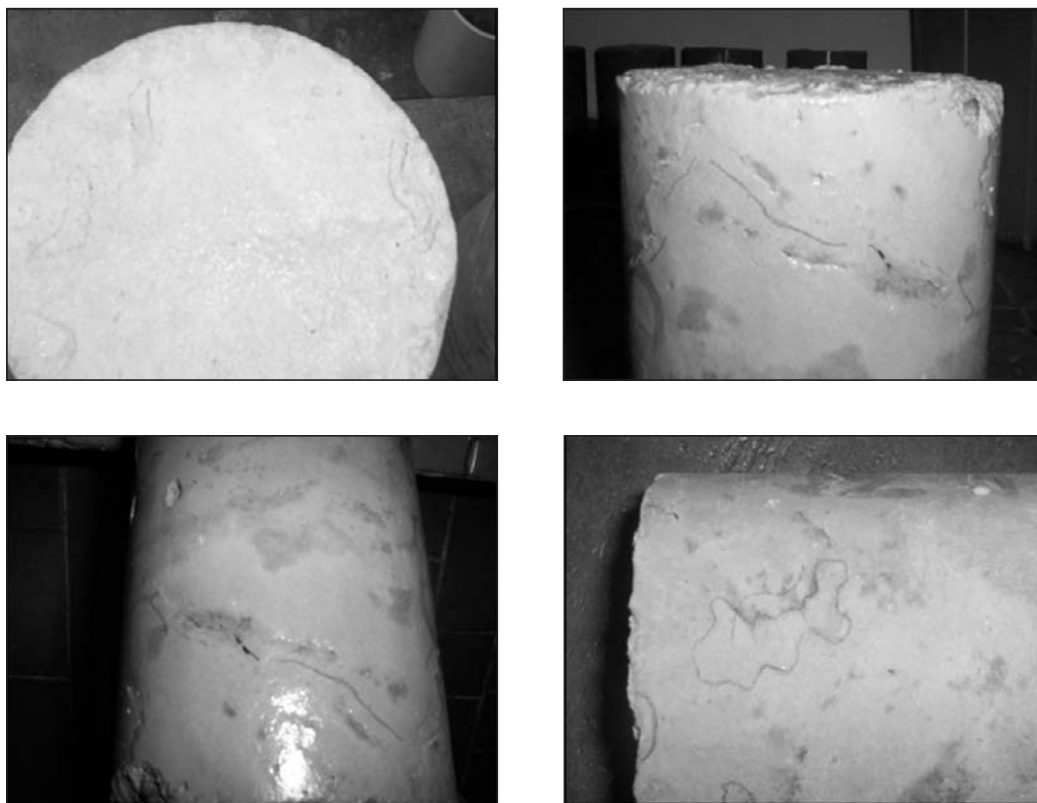


Figura 8: Demarcación y localización del deterioro de las probetas

Fuente: Elaboración propia

2.5 Ensayos de absorción y porosidad abierta

Para este ensayo y el enunciado en el numeral siguiente se utilizaron las normas técnicas colombianas referenciadas en [4-9].

Ensayo con el que se quiso medir la afectación de los ciclos a nivel de la microestructura del concreto. Estos ensayos se hicieron únicamente a las probetas afectadas, en cuatro ocasiones cada quince días. Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad, siguiendo el siguiente procedimiento: inicialmente se tomaron los pesos de cada probeta y a continuación se sometieron a un período de 24 horas de inmersión, al final del cual se registraban nuevamente los pesos de las mismas en dos condiciones, peso de la probeta saturada (peso en el agua) y peso de la probeta saturada superficialmente seca.

Los valores de absorción y porosidad abierta se hallaron mediante la aplicación de las siguientes expresiones:

$$A = \frac{(P_{sss} - P_s) * 100}{P_s} \quad (1)$$

Donde:

A: Absorción, en porcentaje

P_{sss}: Peso de la muestra saturada superficialmente seca

P_s: Peso seco de la muestra

$$PA = \frac{(P_{sss} - P_s) * 100}{(P_{sss} - P_m)} \quad (2)$$

Donde:

PA: Porosidad abierta, en porcentaje

P_{sss}: Peso de la muestra saturada superficialmente seca

P_s: Peso seco de la muestra

P_m: Peso sumergido de la muestra

2.6 Ensayos de resistencia a la compresión

Ensayo clave para definir la variación de la resistencia, objeto principal del proyecto. Estos ensayos se desarrollaron en las instalaciones del laboratorio de la Universidad, al finalizar la exposición de las probetas a los ciclos de hielo-deshielo.

Siguiendo la normativa correspondiente, inicialmente se refrentaron las probetas con mayor irregularidad en sus caras y las demás serían falladas con las láminas de neopreno para distribuir la carga sobre toda la superficie de las mismas, pero se notó que con las láminas de neopreno estaban presentando una falla irregular, al generarse desprendimientos y fisuras hacia los extremos de las probetas y no desde el centro, con fisuras verticales, como es normal.

Por consiguiente, se decidió refrentar la totalidad de las probetas para poder tener una adecuada correlación en los datos de resistencia. Las probetas fueron refrentadas con azufre en las instalaciones de la Universidad (figura 9)

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de deterioro físico de las probetas

Desde el inicio de los ciclos, las probetas presentaron afectación de la pasta, con el continuo desmoronamiento de la misma. La formación de fisuras se dio en todos los grupos pero con mayor incidencia en las probetas de relación agua/cemento de 0,7. Por la falta de humedad las probetas sin curado presentaron, además, fisuras por contracción, tanto en la cara superior como en el perímetro lateral. (figura 11)

A lo largo del proceso, las probetas de relación agua/cemento de 0,5 cambiaron su textura en algunas zonas alrededor del perímetro lateral, y fue más rugosa para las probetas sin curado, y áspera para las probetas de curado en laboratorio. Estas



Figura 9. Probetas antes del ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Especimen en proceso de falla

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Fisuras a lo largo del perímetro lateral.

Fuente: Elaboración propia

últimas presentaron fisuras y levantamiento (leves ensanchamientos) que más adelante algunos de ellos se convirtieron en descascamientos. De forma general, se dio la formación de poros superficiales en todas las probetas de este grupo (R a/c 0,5).

Con el paso del tiempo surgieron algunas



Figura 12: Levantamiento de la pasta.

Fuente: Elaboración propia



Figura 13: Descascamiento de la pasta.

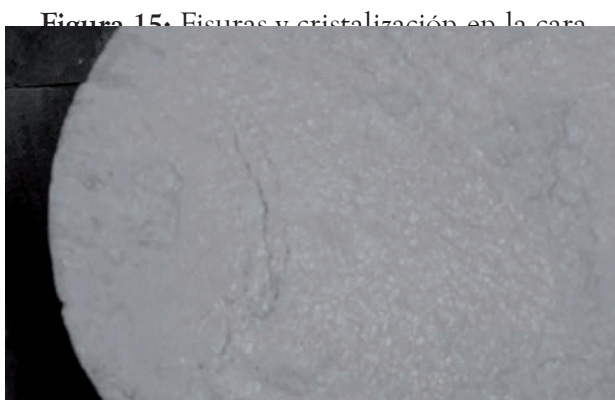
Fuente: Elaboración propia

fisuras y levantamientos, se dio la apertura de las fisuras iniciales (con mayor intensidad en la probeta de curado en laboratorio) y la textura siguió cambiando, y se generó una superficie mixta con zonas rugosas, ásperas y lisas, con poros superficiales.

Figura 14: Porosidad de las probetas.



Fuente: Elaboración propia



superior de las probetas

Fuente: Elaboración propia

Para las probetas de curado en laboratorio la superficie de la cara superior se tornó más irregular con hundimientos y protuberancias acentuadas, y cristalización de la pasta.

Figura 16: Cara superior no uniforme y con



hundimientos.

Fuente: Elaboración propia



Figura 17: Textura lisa y fisuras.

Fuente: Elaboración propia

Las probetas de relación agua/cemento de 0,7, conservaron una textura suave durante casi todo el período de exposición, con la aparición de un mayor número de fisuras de forma generalizada en todas las probetas, levantamientos y ligeros hundimientos en las probetas de curado en laboratorio, y aparición mínima de poros en la superficie de las probetas.

3.2 Análisis ensayos de absorción y porosidad abierta

Durante el proceso de experimentación, se desarrollaron cuatro ensayos de absorción y porosidad abierta. Para efecto del análisis, el primero de ellos (E0) no se tuvo en cuenta debido a que fueron diferentes las condiciones de humedad a las que estuvieron expuestas, con respecto a los otros ensayos.

- Probetas de relación agua/cemento 0,5

A continuación, se presentan las tablas y gráficas resultado de los ensayos de absorción y porosidad abierta realizados a estas probetas:

Tabla 1. Variación porcentual de la absorción

R a/c	Probeta	Absorción (%)		Δ%	Promedio Δ%
		E1	E3		
0,5	SC1	1,28	3,48	2,20	
	SC2	1,22	2,96	1,75	1,837
	SC3	1,39	2,95	1,56	
	CO1	1,90	3,43	1,53	
	CO2	2,02	3,33	1,31	1,543
	CO3	2,10	3,89	1,79	
	CL1	2,10	3,39	1,30	
	CL2	1,98	3,43	1,45	1,552
	CL3	1,74	3,66	1,91	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Datos de porosidad abierta de las probetas

R a/c	Probeta	Porosidad Abierta (%)			Porosidad Abierta promedio (%)		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
0,5	SC1	2,83	6,20	7,77			
	SC2	2,70	5,04	6,26	2,867	5,098	6,343
	SC3	3,07	5,15	6,43			
	CO1	4,18	7,01	7,45			
	CO2	4,47	6,82	7,24	4,530	6,915	7,346
	CO3	4,59	7,43	8,33			
	CL1	4,58	6,74	7,30			
	CL2	4,34	6,63	7,39	4,243	6,710	7,345
	CL3	3,81	6,76	7,83			
Tiempo transcurrido a la realización de cada ensayo (días)				27	43	71	

Fuente: Elaboración propia

De forma general, el aumento de la absorción y porosidad de un ensayo a otro fue disminuyendo con el tiempo, sugiriendo que la mayor variación se da en los primeros días de afectación y que con el tiempo el concreto se va acostumbrando al ciclo de afectación creando una leve resistencia al mismo. Los valores de porosidad y absorción aumentaron manteniendo o conservando la relación entre magnitudes en cada grupo.

La hipótesis de comportamiento prevista, de acuerdo con lo encontrado en la literatura, para los ensayos de absorción y porosidad, consistió en que las probetas con proceso de curado (en obra y en laboratorio) presentaran valores mayores que los de las probetas sin proceso de curado.

Los diferentes tipos de probetas presentaron una pérdida de masa durante todo el proceso de experimentación; las más afectadas fueron las probetas con curado en obra, seguidas por las de curado en laboratorio y por último las probetas sin curado. El comportamiento de cambio de masa de las probetas de este grupo fue similar en cada ensayo, con una tendencia descendente.

- Probetas de relación agua/cemento 0,7

Tabla 3. Absorción para relación agua/cemento de 0,7

R a/c	Probeta	Absorción (%)		$\Delta\%$	Promedio $\Delta\%$
		E1	E3		
0,7	SC1	1,80	4,64	2,84	2,974
	SC2	1,62	4,61	2,99	
	SC3	1,66	4,75	3,08	
	CO1	1,09	4,22	3,13	3,033
	CO2	1,30	4,27	2,97	
	CO3	1,29	4,29	3,00	
	CL1	1,56	4,74	3,17	3,153
	CL2	1,51	4,64	3,13	
	CL3	1,35	4,51	3,16	

Fuente: Elaboración propia

De manera general, al igual que el comportamiento de las probetas de relación a/c de 0,5, el aumento de la absorción y porosidad entre uno y otro ensayo fue disminuyendo con el tiempo. Los valores de porosidad y absorción aumentaron conservando la relación entre magnitudes en cada grupo.

Tabla 4. Datos de porosidad de las probetas con relación agua/cemento de 0,7

R a/c	Probeta	Porosidad Abierta (%)			Porosidad Abierta promedio (%)		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
0,7	SC1	3,91	8,12	9,79	3,678	8,092	9,787
	SC2	3,53	8,06	9,78			
	SC3	3,60	8,55	9,94			
	CO1	2,38	7,87	8,91	2,819	8,102	9,002
	CO2	2,83	8,10	9,05			
	CO3	2,80	8,34	9,05			
	CL1	3,39	9,29	9,94	3,114	8,864	9,752
	CL2	3,27	8,97	9,75			
	CL3	2,96	8,76	9,57			
Tiempo transcurrido a la realización de cada ensayo (días)				29	45	73	

Fuente: Elaboración propia

Los valores de absorción son superiores a los presentados con la R a/c: 0,5; esto se cree porque la cantidad de agua utilizada en el diseño de mezcla fue mayor y por lo tanto hay mayor cantidad de poros saturables, afectables por los ciclos. La hipótesis de comportamiento prevista para esta relación fue la misma que para el grupo anterior.

Los diferentes tipos de probetas presentaron una pérdida de masa durante todo el proceso de experimentación; las más afectadas fueron las probetas con curado en obra, seguidas por las probetas sin curar y por último las de curado en laboratorio. El comportamiento de cambio de masa de las probetas de este grupo fue similar en cada ensayo, con una tendencia descendente.

3.3 Análisis de los ensayos de resistencia a la compresión

Después de realizados los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros afectados por

los ciclos hielo-deshielo, se obtuvo la siguiente información:

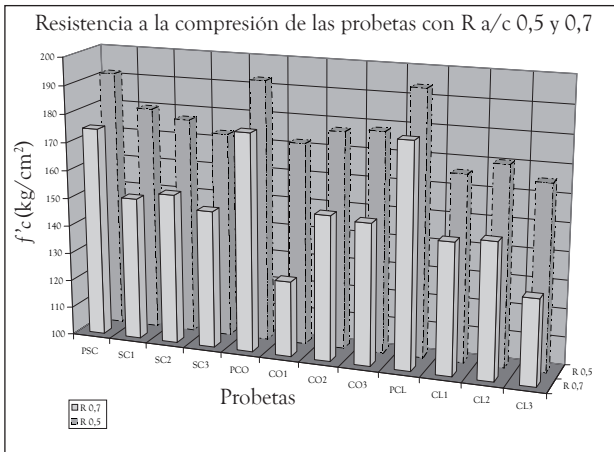


Figura 18. Variación de la resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Variación de la resistencia a la compresión de las probetas afectadas con respecto a las probetas patrón.

R a/c	Probeta	Resistencia a la compresión (Kg./cm²)	Δ%
0,5	PSC	191,66	
	SC	176,71	7,8
	PCO	192,83	
	CO	175,86	8,8
	PCL	194,02	
	CL	167,37	13,7
0,7	PSC	174,62	
	SC	151,10	13,5
	PCO	177,65	
	CO	150,91	15,1
	PCL	179,44	
	CL	147,41	17,9

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de resistencia del grupo de probetas de R a/c: 0,7 fueron aproximadamente un 14% más bajas que los de las probetas de R a/c: 0,5, debido al deterioro por el mayor contenido de agua en esta mezcla.

De acuerdo con los resultados obtenidos, para la resistencia trabajada, se encontró que el ciclo sí afecta de manera importante la resistencia a compresión del concreto, durante los primeros meses de edad del material; siendo coherentes con la teoría, este agente (los ciclos hielo-deshielo) es de los más destructivos del concreto.

La tendencia de los resultados de resistencia en las probetas patrón frente al tipo de curado fue normal, es decir, entre mejor proceso de curado tuvo el concreto mayor fue su resistencia a la compresión. En cuanto a la tendencia de la resistencia de las probetas afectadas se dio el caso contrario: entre mejor proceso de curado del concreto, menor fue la resistencia a la compresión.

El curado aumenta la efectividad del fenómeno, reduciendo la resistencia a la compresión del concreto.

Los valores de la resistencia también están afectados por las propiedades de los agregados que conforman el concreto, ya que el ciclo afecta sus elementos de forma individual y en conjunto, propiciándoles deterioro interno debido a la fatiga que puede generar el ciclo de hielo-deshielo.

4. DISCUSIÓN

- Se cumplió con el objetivo general del proyecto de encontrar la variación de la resistencia a la compresión del concreto frente a la acción de los ciclos hielo-deshielo, para el caso Tunja, y se encontró lo siguiente:
 - La variación de la resistencia a la compresión de probetas afectadas frente a las probetas patrón con R a/c: 0,5 fue de 7,8%, 8,8% y 13,7% para las probetas sin curar,

curadas en obra y curadas en laboratorio, respectivamente.

- La variación de la resistencia a la compresión de probetas afectadas frente a las probetas patrón con $R_{a/c}$: 0,7 fue de 13,5%, 15,1% y 17,9% para las probetas sin curar, curadas en obra y curadas en laboratorio, respectivamente.
- Se comprobó que el ciclo hielo-deshielo durante el periodo de afectación (2 meses aproximadamente) y variables definidas (curado, $R_{a/c}$ y medio ambiente), como caso particular para la ciudad de Tunja, afecta el concreto a diferentes niveles, externo e interno, en su apariencia y en sus propiedades físicas y mecánicas.
- Según los resultados de resistencia a la compresión obtenidos frente a los tipos de curado, la variación no es muy grande, lo que indicaría que no es necesario un buen proceso de curado, pero sería una concepción errónea ya que aunque se alcance la resistencia diseñada, en el aspecto físico se ocasionaría el inicio de un deterioro por la aparición de fisuras, que afectarían su durabilidad.
- Se corroboró que el alto contenido de agua dentro de la mezcla de concreto propicia un mayor porcentaje de deterioro a la estructura de concreto, evidenciado en los resultados de resistencia a la compresión, absorción, porosidad abierta y pérdida de masa.
- Se observó que para el caso tratado, la afectación del ciclo es considerable a edad temprana del concreto, con un deterioro físico acentuado en condiciones de alta humedad (probetas con curado por inmersión-curado en laboratorio).
- Para evitar el deterioro del concreto, a edad temprana, ocasionado por los ciclos hielo-deshielo que se presentan en la ciudad de Tunja, el concreto debe protegerse en horas de la noche con elementos adecuados (plásticos,

telas, mantos, etc.) y en el día debe tener un buen proceso de curado.

Además, otra de las medidas correctivas aconsejables es trabajar con relaciones agua/cemento bajas implementando la inclusión de aire.

- Se considera conveniente que los diseños de concreto manejen la variable de durabilidad y no únicamente la de resistencia mecánica, ya que siempre el concreto se verá expuesto a ambientes agresores como el clima y la contaminación.
- Se recomienda en futuras investigaciones acerca del deterioro causado por ciclos hielo-deshielo lo siguiente:
 - Empezar a desarrollar investigaciones de la afectación de este agente (ciclo hielo-deshielo) frente a otro tipo de materiales de construcción, tales como, adobe, mortero, asfalto, entre otros.
 - Estudiar el comportamiento del módulo de elasticidad y la rigidez del concreto afectado por los ciclo hielo-deshielo.
 - Analizar cómo se da el transporte de sustancias y/o agentes de deterioro (físico, químico y/o biológico) en el interior de la estructura del concreto afectado por los ciclos hielo-deshielo.
 - Buscar un sistema de refrigeración que permita el ajuste exacto de la temperatura que se quiere trabajar (control ambiental).
 - Realizar los ensayos de caracterización física y/o mecánica a intervalos de tiempo más cortos, con el fin buscar las curvas representativas del deterioro que causa el agente agresor.
 - Manejar un mayor número de especímenes de ensayo para evitar la dispersión de los datos y asegurar confiabilidad de los resultados.

- Evaluar el ciclo en diferentes partes del departamento donde se presenten ambientes particulares que lo puedan propiciar.
- Los resultados obtenidos con el desarrollo del proyecto no son definitivos como respuesta de los ciclos hielo-deshielo, son sólo un primer paso en el análisis de este fenómeno, pretenden ser la base para futuras investigaciones en este campo.

REFERENCIAS

- [1] E. Menéndez, "Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia de los materiales de construcción a los ciclos hielo-deshielo," *Revista Cemento Hormigon*, enero 2005, http://www.cemento-hormigon.com/contenidoPag.asp?id_rep=752, 2005].
- [2] M. Pigeon, and R. Pleau, *Durability of concrete in cold climates. Modern Concrete Technology Series*, Londres: E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hill, 1995.
- [3] D. Sánchez de Guzmán, *Durabilidad y patología del Concreto*, Bogotá: Asocreto, 2003.
- [4] NSR.98 NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE Standard c.5.11, 1998.
- [5] NTC 92. *Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados*, 1995.
- [6] NTC 174. *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto*, 2000.
- [7] NTC 504. *Refrentado de especímenes cilindros de concreto*, (1995-11-29), 2000.
- [8] NTC 673. *Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto*, 2000.
- [9] NTC 1377. *Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*, 1994.