ASPECTOS DE LA EVALUACION DEL DESEMPEÑO EN EL CONCRETO

Ing. Rodrigo Quimbay Herrera, MSc

Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia, Maestria en Ingeniería Civil, Ingeniería y Gerencia de la construcción, Universidad de Los Andes. Docente en extension facultad de ingenieria, Universidad Nacional de Colombia. Cursos de intercambio tecnologico Instituto Chileno del Hormigón ICH, Ministerio de la construccion de Cuba Micons y Universidad de Sherbrooke, Quebec Canada. Se ha desempeñado como Jefe de investigación y Desarrollo, Central de Mezclas, Cemex-Colombia, asesor de Concretera Tremix S.A. y de constructoras nacionales. Experiencia docente, asesoría y coordinación de Proyectos de Grado Universidades Nacional, Piloto, Javeriana, Militar, America y Minuto de Dios. Conferencista de la Reunion del concreto Asocreto, Jornadas de Estructuras de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y de las Jornadas de Pavimentos y mantenimiento vial. Miembro del comité Tecnico de construcción sostenible y del concreto del Icontec, del comité internacional C09 ASTM y del comité internacional de construcción ISO TC-71. Gerente de la firma ARQCONSTRUCCION dedicada a la Consultoría en gestion y construcción, innovación en materiales, concretos y estructuras, instrumentación y patología de estructuras, interventoría y Supervisión Técnica.

II Foro de Normalización de concretos Icontec (Bogota, 2009)

PROBLEMAS TIPICOS EN LA CONSTRUCCCION:

- FALTA DE REPRESENTATIVIDAD DE PROBETAS (Cilindros, nucleos, viguetas)
- BAJA RESISTENCIA DEL CONCRETO
- FALTA DE AGILIZACION DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS
- PRESENCIA DE FISURAS EN EL CONCRETO Y DEMAS ANORMALIDADES
- FALTA DE CONTROL EN DESARROLLO DE OPERACIONES
- DEFECTOS DE LO CONSTRUIDO vs. DISEÑADO
- AUMENTO DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL
- AFECTACION A LA VIDA UTIL DE LA ESTRUCTURA

CONSTRUCCIÓN DURABLE Y CAUSAS DE COLAPSO, ref. CEB (Comité Europeo del Concreto)

Proyecto	42%
Ejecución	29.5%
Materiales	14.5%
Uso	8.3%
Causas naturales	5.7%

QUE SE DEBE IMPLEMENTAR PARA BUSCAR DURABILIDAD Y BUEN DESEMPEÑO

- Supervisión Técnica aplicada (Titulo I, NSR-09)
- Normativa y especificaciones por desempeño (ref. CSA, iniciativa P2P)
- Plan de aseguramiento de calidad y diseño por desempeño (normativa nal. e inal.)
- Control de especificaciones (actualizada conforme ISO y EN)
- Control de materiales usados (especificación por comportamiento)
- Control de procesos constructivos (monitoreo, ejecución, mejoramiento)

- SGC - Certificación del Sistema de Gestión de calidad y control de aplicacion
- Control de calidad en el proyecto construido, evaluación de Vida Útil de la estructura

CONSIDERAR LA RELACION:

CALIDAD ↕ DESEMPEÑO
↕
DURABILIDAD

Causas de incertidumbres en la construcción

1-Diseño
2-Materiales
3-Procesos constructivos

- Concepción del proyecto inadecuada
- Resistencia de los materiales baja o muy variable
- Acciones en la edificación imprevistas o menospreciadas
- Proceso de Calculo y estudios no adecuados o actualizados
- Características geométricas reales muy diferentes a las diseñadas
- Disposición adecuada de refuerzos en los elementos
- Procesos constructivos adecuados
- Deformaciones excesivas de la estructura
- Fenómenos patológicos del concreto
- Comportamientos dinamicos y cambiantes (influencia de la variacion del clima, de la mano de obra, cambios e improvisaciones durante la construcción, etc)

ASPECTOS DE LA VARIABILIDAD EN CONSTRUCCIÓN Y SUS CAUSAS

- Reproducibilidad y Repetibilidad de ensayos
- Representatividad del control de calidad
- Secuencia del procesos constructivo-optimizacion
- Curva de aprendizaje de procesos constructivos
- Variabilidad en materiales, mano de obra y equipos
- CONSTRUCTIBILIDAD diversa y variaciones
- Comportamientos estocasticos y dinamicos
- Factores climáticos y económicos
- Factores imprevistos en obra

GESTION DE LA CALIDAD EN CONSTRUCCIÓN (Cambio de Paradigmas)

Implica evaluación de la CALIDAD DEL CONCRETO-DESEMPEÑO y su EVALUACION IN SITU, abandonar el enfoque correctivo-prescriptivo tradicional

- PREVENTIVO = ACCIONES (Plan de calidad, monitoreo,durabilidad, ensayos no destructivos, Inspección de materiales, supervisión completa y seguimiento de procesos en obra y lab., monitoreo SGC y SGD)-------MONITOREO PREVENTIVO IN SITU

- CORRECTIVO = ACCIONES (pruebas minimas para cumplir, ensayos destructivos, falta de reproducibilidad, baja exactitud, Toma de decisiones posteriores sobre probetas de ensayos prescriptivos, pobre SGC)-------CONTROL CORRECTIVO DE PROBETAS

EL CONCRETO ES UN MATERIAL DINAMICO, EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN ES UNICO

La resistencia del concreto depende de la resistencia de la pasta, de un buen proceso de hidratación y curado, de la resistencia de los agregados y de la adherencia de la interface pasta-agregados. El proyecto de construcción es único en sus características de diseño, especificaciones, materiales, ejecución, contexto de desarrollo y control, personal, equipo (Aun para los proyectos de construcción industrializada la variación medida puede ser de un 25%)

VARIABILIDAD DEL CONCRETO (CVAR %):

- Variabilidad de la Materia Prima
- Variabilidad del Proceso de Producción
- Variabilidad de los ensayos de control

CVAR = CV(MP) + CV(Pprod) + CV(ens)

PROBLEMAS TIPICOS EN COLOMBIA

1-EVALUACION DEL CONCRETO DELEGADA (Sin monitoreo al laboratorio)
2-CONTROL Y VARIABILIDAD CENTRADA EN RESISTENCIA SOBRE PROBETAS
3-INCERTIDUMBRE NO CONTEMPLADA NI EVALUADA
4-REPRODUCIBILIDAD DE RESULTADOS DE RESISTENCIA NO CONTROLADA
5-ACREDITACION DE ENSAYOS Y CERTIFICACION SIN SOSTENIBILIDAD
6-VISION CORRECTIVA – ENSAYOS PRESCRIPTIVOS EN LA NORMATIVA
7-POCO USO DEL CONTROL NO DESTRUCTIVO – NDT IN SITU
8-ALTERACION DE LA UNIFORMIDAD DEL CONCRETO EN OBRA
9-ALTA VARIABILIDAD DEL CONCRETO EN EL ELEMENTO ESTRUCTURAL
10-FALTA DE MECANISMOS DE CONTROL EN LA REALIDAD DE LOS PROCESOS
11-FALTA DE COMPETENCIA, CAPACITACION Y GESTION DE CALIDAD DE LOS CONTRATISTAS DE CONSTRUCCION

NORMAS PRINCIPALES IMPLICADAS EN EL CONTROL DEL CONCRETO

- NTC 454 Toma de muestras de concreto
- NTC 396 Ensayo de asentamiento del concreto
- NTC 5222 Ensayo de flujo libre del concreto
- NTC 550 Elaboracion y curado de especimienes de obra
- NTC 1377 Elaboracion y curado de especimienes de laboratorio
- NTC 673 Ensayo de resistencia a compresion de cilindros
- NTC 2275 Evaluación estadistica de la resistencia
- NTC 3756 Estimacion resistencia in situ (Madurez-calorimetria in situ)
- NTC 3318 Produccion de concreto
- NTC 5551 Durabilidad de concreto (prescriptiva)

CONSIDERACIONES DE LA NORMATIVA PARA CONTROL DEL CONCRETO

NTC 454 TOMA DE MUESTRAS DE CONCRETO

- Toma de la muestra en el tercio medio del camion.
- Altura maxima de descarga de 1 mt.
- Volumen de la muestra suficiente (28 lts).
- Toma de muestra de cilindros max. a los 15 minutos.
- (NSR-10 :2 cilindros para diametro de 15 cms, 3 cilindros para diam de 10 cms, 1 vez/dia, 1 vez c/40 m3, 200m2 losas o muros).
- Representatividad adecuada de la muestra.
- Frecuencias de muestreo de manejabilidad : variacion de consistencia, compañar muestreo de resistencia.
- Control termico: influencia climas extremos, masivos, medicion de factor de maduracion.
- Tiempo de espera y descargue minimos.

NTC 673 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS

- Correcta ejecucion – representatividad del control – calidad del resultado
- Adecuada informacion y toma de decisiones adecuada en obra
- Variables del ensayo dinamicas y cambiantes en los ensayos destructivos
- EFICIENCIA DEL ENSAYO E = r / R (NIST-93) CALIDAD DEL RESULTADO
- Repetibilidad (r)
- Reproducibilidad (R), variación ref. ASTM del 14% máximo interlaboratorios!
- Incertidumbre------EFECTO COMBINADO DE LAS VARIABLES INCIDENTES EN EL ENSAYO DESTRUCTIVO
- Programas interlaboratorios continuos.

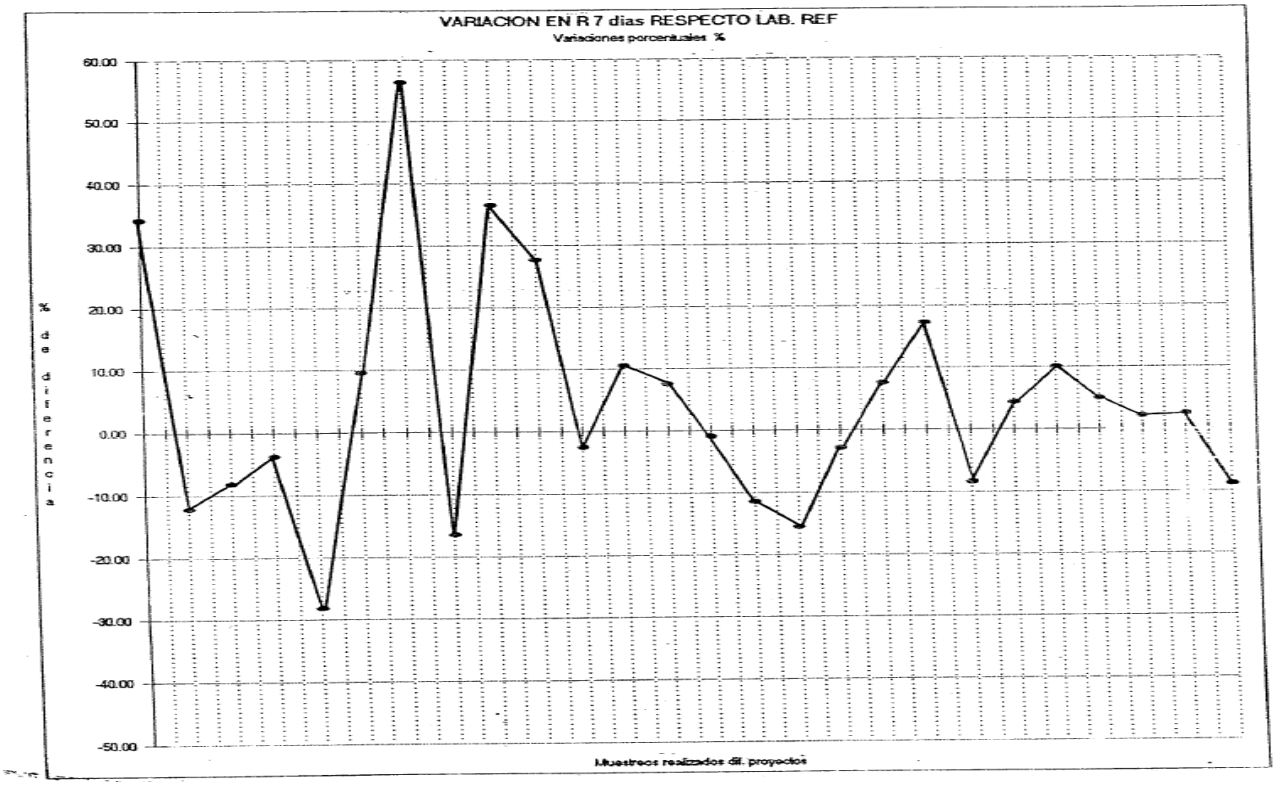
RESULTADOS INTERLABORATORIOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE CONCRETO (Bogota, D.C.)

- Variaciones entre distintos laboratorios apreciables, variando hasta un 25%, con una variación promedio de un 16% aprox. (Interlaboratorios Diamante-Samper, 1997).
- Variaciones debidas a diferentes laboratorios en un mismo proyecto (un mismo concreto) de hasta un 56%!! (Tesis maestria Univ. Andes, 1999).
- Comportamiento dinamico (caótico) de las diferencias entre resultados de resistencia de un mismo concreto evaluado por dos laboratorios acreditados diferentes.
- Se corrobora el efecto de las variables presentes en ensayos destructivos sobre el concreto (dinamicas y cambiantes, mas de 35 variables).
- Se verifica la baja EFICIENCIA DEL ENSAYO de resistencia a compresión de cilindros de concreto y su efecto sobre la CALIDAD DEL CONTROL
- Se evidencia la baja calidad de los resultados en los ensayos destructivos por la falta de repetibilidad (r) y reproducibilidad (R)
- Se comprueba la existencia de alta Incertidumbre------EFECTO DE LAS VARIABLES INCIDENTES EN EL ENSAYO

Variables que afectan el resultado del ensayo de resistencia a compresión en cilindros, ref. "Metodologia de evaluación del control de calidad del concreto mediante cilindros" Uniandes 1999, Quimbay.

	VARIABLES QUE AFECTAN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE DE CILINDROS DE CONCRETO.			
	ASPECTO ESPECIFICO		**CAUSA DE LA VARIACION**	**EFECTO POTENCIAL**
1	***Procedimientos inadecuados de muestreo***	1	Segregación	BAJA
		2	Exudación	BAJA
		3	Adición de agua	BAJA
		4	Adición de aditivo	SUBE
		5	Sitio inadecuado de muestreo	BAJA
		6	Compactación anormal de cilindros	BAJA O SUBE
		7	Confección inadecuada cilindro	BAJA O SUBE
		8	Remezclado del concreto en el camion antes de la toma de muestra	BAJA O SUBE
2	***Variaciones debidas a las ecnicas de elaboración de nuestras***	9	Material del molde	BAJA
		10	Demora en la toma de muestra	BAJA
		11	Porción de toma respecto al camión	BAJA O SUBE
		12	Remezclado manual del concreto antes de confeccionar los cilindros	SUBE
	Manejo y curado de cilindros recien elaborados	13	Golpes a probetas recien elaboradas	BAJA
		14	Exposición de moldes recien fundidos a la intemperie	BAJA O SUBE
		15	Temperatura inicial de los cilindros de concreto dentro de los moldes	BAJA O SUBE
		16	Demora en desencofrar los cilindros	BAJA
	Moldes de calidad deficiente	17	Relación altura - diametro del cilindro	BAJA O SUBE
		18	Cilindros no verticales	BAJA
		19	Cilindros de la misma muestra con diferentes diametros	BAJA O SUBE
		20	Cilindro con valores de diametro medidos diferentes	BAJA O SUBE
3	***Cambios en el curado de las probetas***			
	Variación de Temperatura	22	Temperatura de curado en obra	BAJA O SUBE
		23	Temperatura inicial de los cilindros de concreto (primeras 24 horas)	BAJA O SUBE
		24	Cambios de temperatura antes de falla	BAJA O SUBE
	Humedad variable	25	Humedad curado en la obra	BAJA O SUBE
		26	Humedad inicial cilindros en molde	BAJA O SUBE
		27	Cambios de humedad antes de falla	BAJA O SUBE
	Retraso en la entrega de las probetas	28	Edad exacta de falla	BAJA O SUBE
4	***Procedimientos de ensayo deficientes***	29	Tipo de refrentado	BAJA O SUBE
		30	Velocidad de carga	BAJA O SUBE
		31	Tipo de falla presentada	BAJA O SUBE
		32	Densidad del cilindro	BAJA O SUBE
		33	Excentricidad de carga en el cilindro	BAJA
		34	Lectura del dial con baja exactitud	BAJA O SUBE

Variacion en los resultados de resistencia a compresión en cilindros a 7 dias para un mismo tipo de concreto en diferentes proyectos de construccion, ref. "Metodologia de evaluación del control de calidad del concreto mediante cilindros", Maestria en Ingenieria Civil, UniAndes 1999, Quimbay Rodrigo.



EVALUACIÓN ESTADISTICA DEL CONCRETO

- Evaluacion estadistica de la resistencia del concreto (NTC 2275, ACI 214, variabilidad)
- Evaluacion estadistica del desempeño del concreto (Durabilidad, variabilidad)
- Evaluacion estadistica de parametros de control especificos (Analisis dinamico)
- INTERPRETACION ADECUADA de parametros conforme contexto de analisis

ASPECTOS DE LA EVALUACIÓN ESTADISTICA DEL CONCRETO

- Coef. de Variacion interno - Cvi en probetas (menor 4%)
- Promedios moviles (3 resultados consecutivos)
- Carta de control adecuadas – analisis historico (histogramas)
- Coeficiente de Variacion con muestras representativas
- Variacion diferente conforme tipo de probeta (forma, tamaño)
- Demoras en el envio de muestras al lab.(Var. Curado) – control tiempo real
- Suposicion errada de porcentajes de desarrollo de Resistencia
- Variacion intrinseca mayor de muestras a edad temprana
- Falta de analisis para toma de decisiones adecuadas
- Confusion con representatividad de cilindros de obra
- Variacion mayor en concretos de mayor resistencia
- Incertidumbre en materiales, produccion, muestreo y pruebas
- Ensayo y personal certificado (ACI, ASTM , NTC)

CRITERIOS EN LA EVALUACIÓN CONFORME NSR-98 y NSR-10

- Resultados del ensayo de cilindros para determinar cumplimiento de la resistencia especificada.
- Uso en control de calidad, aceptacion del concreto (un resultado es el promedio de minimo 2 cilindros).
- Entender que es herramienta para analisis de resistencia potencial (cilindros con curado estandar) y para analisis de variabilidad.
- Criterios de aceptacion:

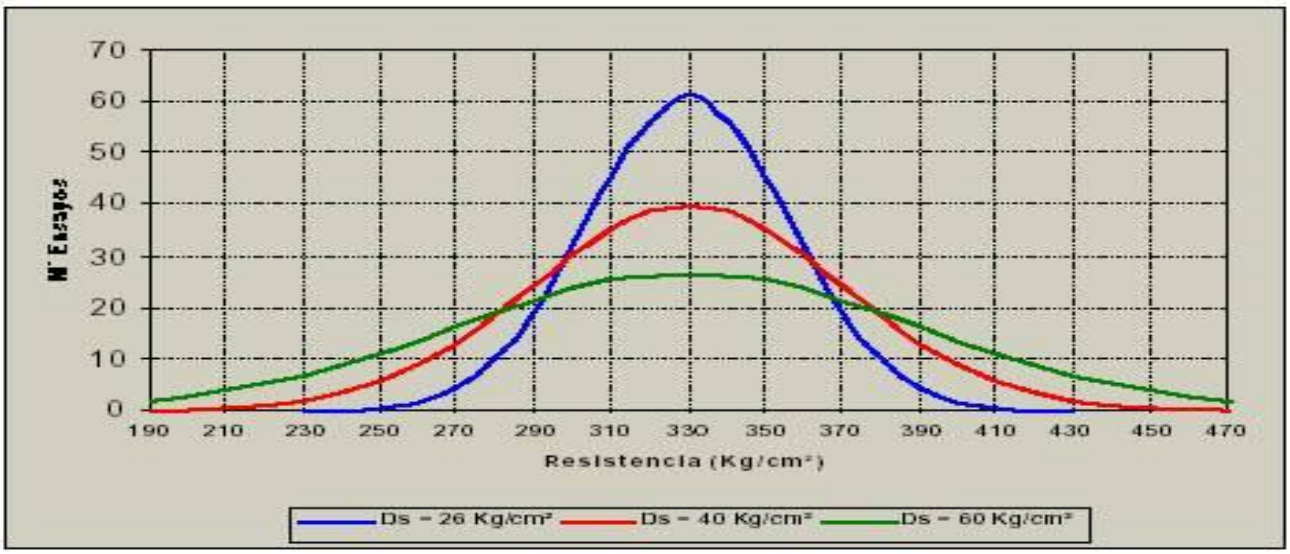
1. El promedio de tres ensayos consecutivos es igual o superior a f`c
2. Ningun ensayo de resistencia debera ser inferior a f`c en 500 psi (3.5MPa)
3. Ningun ensayo debera variar en mas de 0.10f`c (Concretos f`c mayor a 5000 psi o 35 Mpa)

- Reproducibilidad entre resultados de diferentes laboratorios para el mismo concreto maximo del 13% (Esto no se cumple en Colombia, pues tenemos mas del 25%!).

CONSIDERACIONES EN EL ANALISIS ESTADISTICO DE LA RESISTENCIA

- Numero de resultados suficiente por tipo y nivel de resistencia
- Analisis del promedio móvil conforme NSR
- Datos por debajo de f`c en 3.5 MPa (500 PSI)
- Muestreo aleatorio real
- Calidad de resultados adecuada
- Desviacion maxima obtenida
- Coeficientes de variacion aceptables
- Considerar incertidumbre en el resultado
- Evaluación historica - interlaboratorios y diferencias
- Considerar el avance de normalización de control
- Considerar la mecánica estadística – variaciones interlaboratorios
- Analisis con varias técnicas de ensayo (Mixtos)
- Evaluación estadística de la estructura-realidad ensayos in situ
- Involucrar la variable durabilidad del concreto (caracterizarla)

Curva de distribución normal de frecuencia para resultados de resistencia a compresión del concreto en el análisis estadístico NTC 2275.



CRITERIOS A ACTUALIZAR

- Diseño del concreto con base en desempeño: Carbonatacion, absorcion superficial, permeabilidad a cloruros, retraccion, ataque quimico, resistencia a desgaste, absorcion maxima, resistencia in situ.
- Control con base en desempeño: Instrumentacion y monitoreo in situ, análisis de durabilidad, determinación de vida útil, retroalimentación de diseños
- Uso de materiales cementantes adicionales ecoeficientes
- Analisis de compatibilidad cementante-aditivo y nuevas tecnologias
- Mejoramiento de criterios de diseño de mezcla y abandono de criterios tradicionales
- Uso eficiente de materias primas y optimización de produccion
- Menor contaminacion (emisiones bajas) – concreto verde
- Uso de materiales avanzados de matriz cementicia (CAR, CUAD)
- Sistemas integrados informatizados de control del desempeño en obra

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CONCRETO (In situ)

- Evaluacion de la resistencia del concreto (in situ)
- Evaluacion del contenido de aire real in situ
- Evaluacion de penetracion de agentes nocivos
- Estimacion de la relacion a/cmte, Ccmte, matriz
- Resistencia a sulfatos
- Proteccion contra la corrosión (recubrimiento-fisuramiento)
- Trabajabilidad adecuada (control en colocación)
- Perdida de trabajabilidad de la mezcla (efectos)
- Control térmico del concreto (control de parámetros in situ)
- Control de hidratación (Factor de madurez del concreto-desmolde-descimbre)
- Densidad colocada (compactación, contenido de aire real)
- Retraccion real presentada
- Modulo de Elasticidad in situ
- Fluencia
- Reaccion alcali-silice (prevención)
- Resistencia a la abrasion

ESTABLISHED TEST METHODS APPLICABLE TO PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Property	ASTM Standard	Required lead time
Compressive strength	C 31 and C 39	35 days to obtain materials and make and test concrete mixtures at ages up to 28 days
Compressive strength in-place	C 900 and C 1074	
Density (unit weight), yield, and air content of fresh concrete	C 138	
Density of fresh and hardened structural lightweight concrete	C 567	
Early-age strength	C 39	
Flexural strength	C 78	
Density, absorption, and permeable voids in hardened concrete	C 642	
Shrinkage	C 157	180 days. Can assess at earlier ages based on prior tests
Resistance to freezing and thawing	C 666	90 days
Modulus of elasticity	C 469	35 days
Creep	C 512	1 to 2 years
Splitting tensile strength	C 496	35 days
Scaling	C 672	90 days
Alkali-silica reaction, to evaluate aggregates	C 1260 C 1293	2 weeks 1 year
Alkali-silica reaction, to evaluate mixture	C 227 CSA A23.2-28A[9]	3 to 6 months 2 years
Alkali-silica reaction, to evaluate job combinations except when low-alkali cement is used	C 1567	2 weeks
Alkali content	Chemical analysis	Specify in contract documents

ENSAYOS ADICIONALES RELACIONADOS CON LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL CONCRETO CONFORME NORMAS TECNICAS COLOMBIANAS

ENSAYO	NORMA TECNICA
A19 - REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI AGREGADO MÉTODO QUIMICO	A19 - NTC-175
A20 - REACTIVIDAD POTENCIAL ÁLCALI AGREGADO MÉTODO DE BARRAS DE MORTERO	A20 - ASTM C 1260
A21 - ENSAYO DE PETROGRAFÍA EN EL AGREGADO	A21 - ASTM C 295
L027 - MÉTODO PARA LA DENSIDAD, ABSORCIÓN Y CONTENIDO DE VACIOS PERMEABLES	L027 - ASTM C 642
L028 - ENSAYO DE CONTRACCIÓN DEL CONCRETO	L028 - ASTM C 157 - NTC-3938
L031 - ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL CONCRETO EN AGUA	L031 - NTC-4483
RESISTENCIA A PENETRACION DE ION CLORURO EN CONCRETO	ASTM C 1202
ENSAYO ACELERADO DE CARBONATACION EN CAMARA (4 SEMANAS EN AMBIENTE CON CONCENTRACION CONSTANTE DE CO2 DE 4 A 5%)	N.A

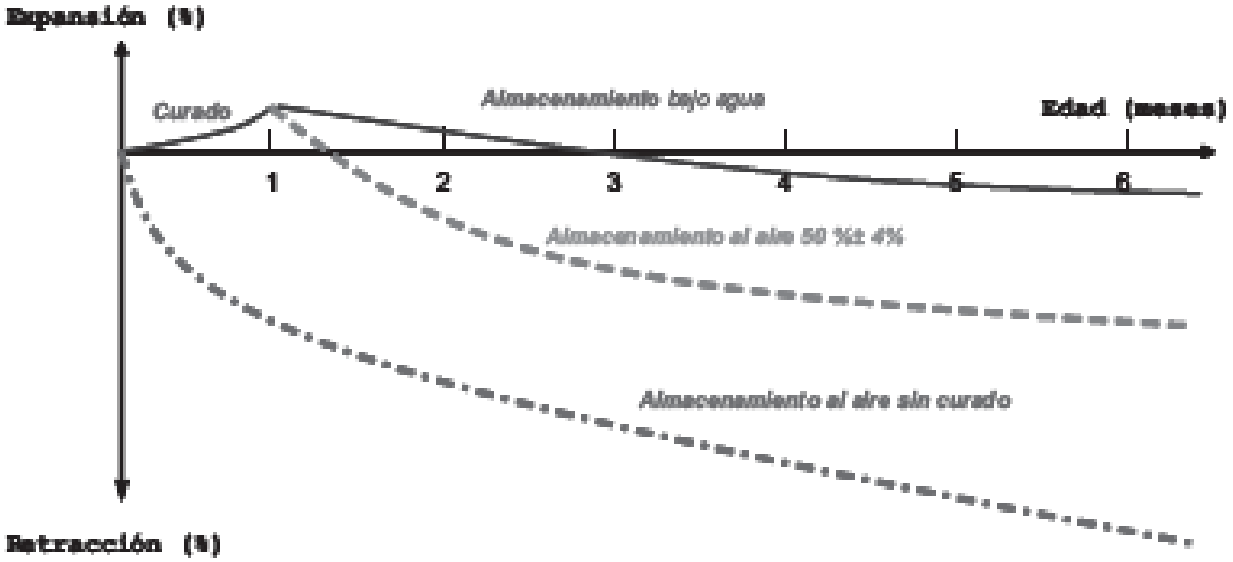
QUE INTERESA EN EL CONCRETO ACTUALMENTE CONFORME NROMATIVA INTERNACIONAL - NRMCA

Fresh Concrete
Workability
Slump
Response to vibrator
Pumpability
Finishability
Segregation
Bleeding
Air Content
Stability of air bubbles
Uniformity of mixing
Consistency of properties
Temperature
Yield

Transition
Rate of slump loss
Time to initial set
Time to final set
Rate of strength gain (compression)
Rate of strength gain (tension)
Rate of stiffness gain
Time to frost resistance
Tolerable rate of evaporation
Plastic Shrinkage
Drying Shrinkage
Temperature changes

Hardened State
Compressive strength
Tensile strength
Flexural strength
Shear strength
Fatigue strength
Fracture toughness
Elastic properties
Shrinkage
Creep
Porosity
Pore size distribution
Permeability
Air void system
Frost Resistance
Abrasion resistance
Sulfate resistance
Acid resistance
Alkali-resistance
Thermal volume change
Heat capacity
Thermal conductivity
Electrical conductivity
Density
Radiation absorption
Color
Texture
Cost

EVALUACIÓN TIPICA DE LA RETRACCION DEL CONCRETO CON CURADO VARIABLE



TIPOS DE CURADO DEL CONCRETO CONFORME CSA (Canadian Standard Association)

Tableau 2 - Régimes de cures admissibles

Type de cure	Nom	Description
1	Cure de base	3 jours à une température ≥ 10°C **ou** pendant le temps nécessaire pour atteindre 40 % de la résistance spécifiée.
2	Cure supplémentaire	7 jours à une température ≥ 10°C **et** pendant le temps nécessaire pour atteindre 70 % de la résistance spécifiée. Avec l'utilisation de fumée de silice, on doit recourir à des méthodes de cure additionnelles.
3	Cure prolongée	Période de cure par voie humide de 7 jours. Les types de cure acceptables sont les nappes d'eau, l'arrosage continu, les matériaux absorbants ou les toiles maintenues continuellement mouillées.

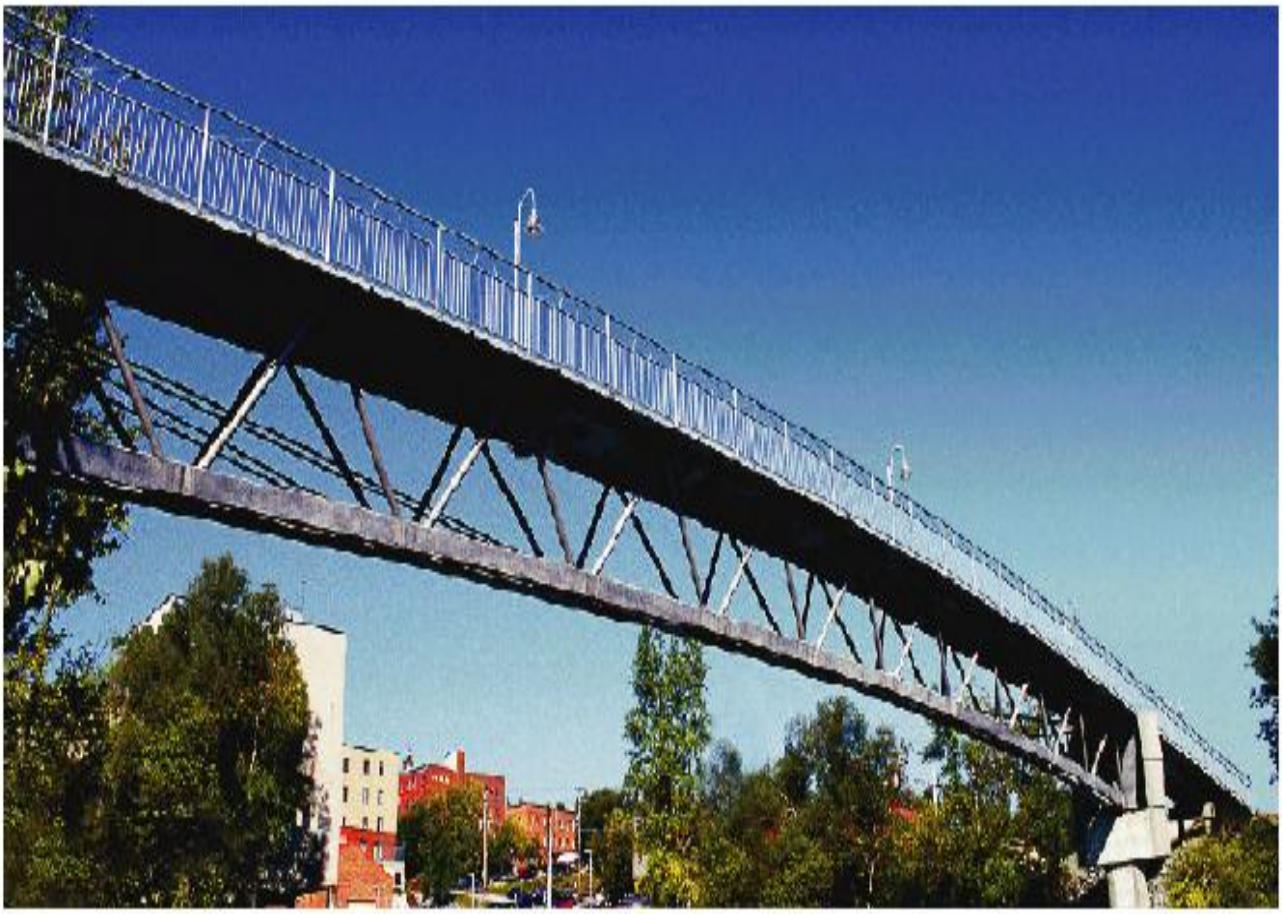
Tableau 20 de la référence 6-5.

Tableau 1 - Type de cure selon le contenu en ciment et en ajouts cimentaires en relation avec la classe d'exposition du béton

Classes d'exposition	Béton régulier	Béton à fort dosage d'ajouts cimentaires (catégorie 1*)	Béton à fort dosage d'ajouts cimentaires (catégorie 2*)
C-XL	3	3	3
C-1 ou A-1	2	3	2
C-2 ou A-2	2	2	2
C-3 ou A-3	1	2	2
C-4 ou A-4	1	2	2
F-1	2	3	2
F-2	1	2	2
N	1	2	2

Tableau 2 de la référence 6-5

CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO-SHERBROOKE, QUEBEC, CANADA (CONCRETO CON RESISTENCIA DE DISEÑO DE 350 MPa-50.000 PSI, Vida util durabilidad de 100 años)



Pedestrian-Bikeway Bridge
Sherbrooke, PQ