HORMIGON

materiales, vida útil y criterios de conformidad
y su consideración en el reglamento
CIRSOC 201-2005

ALBERTO GIOVAMBATTISTA

INTI
Instituto
Nacional
de Tecnología
Industrial

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Breve historia de los reglamentos de hormigón en la Argentina 3

1.2. Capítulos del Reglamento que contienen los temas de materiales y procedimientos constructivos 7

1.3. Discusión pública y tratamiento de las observaciones 9

1.4. Consideraciones sobre un reglamento de seguridad estructural. Objetivos y contexto legal de su aplicación 10

1.5. Reglamentos Técnicos, sistemas jurídicos y hábitos culturales del país en que se aplican 10

1.6. Campo de aplicación 12

1.7. Otros reglamentos y normas necesarias para la aplicación del Reglamento CIRSOC 201-2005 13

1.8. Figuras legales utilizadas 14

1.9. Consideraciones adicionales acerca de los contenidos sobre materiales y procedimientos constructivos 14

1.10. Materiales y procedimientos constructivos. Planteo conceptual y modificaciones más significativas del Reglamento CIRSOC 201-2005 15

CAPÍTULO 2 - EL HORMIGÓN COMO MATERIAL ESTRUCTURAL 17

2.1. Introducción 19

2.2. La estructura del hormigón 19

2.2.1. Niveles de observación 21

2.2.2. Fases e interfases 23

2.3. Estructura interna y propiedades del hormigón 28

2.4. Consideraciones finales 36

2.5. Referencias 37

CAPÍTULO 3 - MATERIALES 39

3.1. Cementos 41
3.1.1. Introducción al estudio de los cementos 43
3.1.2. Cemento pórtland puro 45
3.1.2.1. Composición 45
3.1.2.2. Hidratación del cemento pórtland puro 49
- Hidratación de los aluminatos 49
- Hidratación de los silicatos 50
- Características fisicoquímicas del proceso de hidratación 50
- Estructura de la pasta hidratada 53
- Características de los productos de hidratación 55

3.1.2.3. Los componentes del clinker y su aporte a las propiedades ingenieriles 58
3.1.2.4. Tipos de cementos pórtland puros 60

3.1.3. Adiciones minerales 62
- Materiales Puzolánicos 64
- Cenizas volcánicas y sus tobas 66
- Tierras de diatomeas 66
- Cenizas volantes 66
- Humos de sílice (silica fume) 67
- Arcillas activadas por calcinación 67
- Ceniza de cáscara de arroz 67
- Escoria granulada de alto horno (granulated ground blast furnace slag – GGBFS) 68
- Filler calcáreo 68
- Normas IRAM de adiciones 69

3.1.4. Cementos pórtland con adiciones 69

3.1.5. Cementos especiales 70

3.1.6. Fabricación del cemento 70

3.1.7. Normalización de los cementos 74
3.1.7.1. Requisitos típicos de composición y características físicas 74
- Requisitos físicos 75
- Requisitos químicos 76
- Normas de especificación prescriptivas y normas prestacionales 77

3.1.7.2. Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) 77
- ASTM C 150-09 - Cementos pórtland (puros, sin adiciones) 78
- ASTM C 595-09 – Cementos mezcla 80
- ASTM C 1157 – Cementos hidráulicos basados en su comportamiento 82

3.1.7.3. Norma de la Comunidad Europea EN 197-1 (versión del año 2000) 84
3.1.7.4. Normas IRAM 88

3.1.8. Los cementos en el Reglamento CIRSOC 201-2005 91
- Normas de aplicación 91
- Transporte, manipuleo y acopio del cemento 92

3.1.9. Referencias 95

3.2. Agregados 97
3.2.1. Introducción 99
3.2.2. Forma y textura de los agregados 100
- Utilización de arenas de trituración 103

3.2.3. Granulometría de los agregados 104
- Módulo de finura 111
- Consideraciones sobre el tamaño máximo nominal del agregado grueso 111

3.2.4. Partículas lajosas y elongadas 113
3.2.5. Sustancias nocivas 113
- Material fino que pasa el tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200) 114
- Terrones de arcilla y partículas friables 115
- Ftanita (chert) como impurezas 116
- Conchillas 116
- Materias carbonosas 116
- Otras sustancias perjudiciales según norma IRAM 1649 116
- Cloruros 117
- Sulfatos 117
- Materia orgánica 117
- Límites de sustancias nocivas según el Reglamento CIRSOC 201-2005 118

3.2.6. Estabilidad de un agregado frente a ciclos de temperaturas de congelación y deshielo 118
3.2.7. Estabilidad de los agregados basálticos 120
3.2.8. Desgaste "Los Ángeles" del agregado grueso 121
3.2.9. Absorción y humedad superficial de los agregados 122
- Agregado seco a masa constante (A_{smc}) 122
- Agregado seco al aire 122
- Agregado saturado a superficie seca (A_{sss}) 122
- Agregado húmedo superficialmente 122
- Esponjamiento de los agregados 123

3.2.10. Manipuleo en obra de los agregados 124
- Segregación 124
- Contaminación 128
  Acopio de los agregados directamente sobre el suelo 128
  Aporte externo de material fino 128
  Arrastre de material fino por escurrimiento de agua a través del acopio 128
- Degradación 128
- Heterogeneidad en el contenido de humedad superficial 130

3.2.11. Referencias 131

Anexo. Ejemplos de Aplicación 133
- Ejemplo N° 1 133
- Ejemplo N° 2 134
- Ejemplo N° 3 136

3.3. Agua para el mezclado y curado del hormigón 139
3.3.1. Introducción 141
3.3.2. Norma IRAM 1601 142
3.3.3. Norma ASTM C 1602:2006 143
3.3.4. Manipuleo y acopio del agua de mezclado para morteros y hormigones 144
3.5.5. Referencias 144

3.4. Aditivos 145
3.4.1. Introducción al estudio de los aditivos 147
3.4.2. Reseña histórica 147
3.4.3. Terminología y Clasificación 150
3.4.4. Incorporadores de aire 153
3.4.5. Aditivos reductores del contenido de agua de mezclado 153
3.4.5.1. Lignosulfonatos 155
3.4.5.2. Superfluidificantes 156
- Naftalenos y melaminas sulfonadas
- Poliacrilatos y policarboxilatos 156

158
3.4.5.3. Evaluación de la compatibilidad entre el cemento y el aditivo 159
3.4.5.4. Condiciones de uso de los superfluidificantes 161
3.4.6. Aditivos modificadores del fraguado y la resistencia inicial 162
- Retardadores de fraguado 163
- Acelerantes 164

3.4.7. Otros aditivos 165
- Expansores 165
- Espumígenos o generadores de espuma 166
- Látex y resinas 166
- Inhibidores de acciones deletéreas 166
- Aditivos para hormigón proyectado 166

3.4.8. Síntesis de los aditivos existentes 167
3.4.9. Referencias 169

CAPÍTULO 4 - DURABILIDAD DEL HORMIGÓN Y VIDA EN SERVICIO DE LAS ESTRUCTURAS 171

4.1. Causas del deterioro del hormigón 175

4.2. Durabilidad y vida en servicio 177

4.3. La preocupación por la vida en servicio de las estructuras de hormigón 177

4.4.	Breve síntesis de la evolución de los reglamentos de seguridad estructural	181
•	La evolución en Argentina	185
4.5.	Importancia del agua y de la microestructura del hormigón en los procesos de deterioro	186
•	Permeabilidad	
•	Transporte por difusión	186
		191
4.6.	Lixiviación	193
4.7.	Ataque ácido con intercambio iónico	198
4.8.	Ataque por sulfatos	204
•	Mecanismos de transporte	200
•	Formación de etringita	201
•	Formación de yeso	202
•	Acción física por cristalización de sales	203
•	Ataque interno de sulfatos	204
4.9.	Ataque al hormigón en agua de mar	205
4.10.	Reacción álcali-sílice	206
•	Mecanismo de la RAS	208
•	Factores que afectan a la RAS	215
•	Influencia del cemento pórtland sin adiciones (CPN)	215
•	Influencia de los cementos compuestos o con adiciones minerales	216
•	Influencia de los agregados	217
•	Influencia de los aditivos	218
•	Influencia del medio ambiente	219
•	Antecedentes sobre la RAS en la Argentina	219
•	Métodos para determinar la reactividad potencial de los agregados	221
•	Agregados reactivos en Argentina	224
•	Niveles de afectación por RAS de una estructura	225
•	Antecedentes de obras afectadas por la reacción álcali - sílice en la Argentina	226
4.11.	Congelación y deshielo	229
•	Congelación de la pasta de cemento	232
•	Efecto del aire incorporado sobre la congelación y deshielo del hormigón	236
•	Congelación de agregados	238
•	Efecto de las sales descongelantes	239
4.12.	Corrosión de las armaduras	240
•	Esquema básico de la corrosión del acero en el hormigón	241
•	Corrosión por carbonatación	242
•	Corrosión por cloruros	243
•	Corrosión en espacios confinados	244
•	El avance del proceso de corrosión y la afectación de las estructuras	246
•	Protección de las barras de acero de las armaduras	248

- Rol de la fisuración en el hormigón de recubrimiento 249
- Algunos ejemplos de estructuras con corrosión de armaduras 250

4.13. Durabilidad y vida en servicio en el Reglamento CIRSOC 201-2005 254
- Aspectos generales 254
- Clasificación de los ambientes de exposición 256
- Especificaciones básicas del hormigón necesarias para obtener la vida en servicio del Proyecto 262
- Especificaciones adicionales para exposiciones a ciclos de congelación y deshielo 264
- Especificaciones adicionales por corrosión de las armaduras 264
- Especificaciones complementarias para exposición a sulfatos 266
- Ejemplos de aplicación de las especificaciones por durabilidad del Reglamento CIRSOC 201-2005 269
- Requisitos contenidos en el Reglamento CIRSOC 201-2005 para prevenir la reacción álcali-sílice (RAS) 270
- Uso de protecciones superficiales en ambientes con agresividad química 274

4.14. El planteo prestacional para prevenir la corrosión de armaduras 275
- El planteo probabilístico de la Federation International du Béton (FIB) 275
- Corrosión por carbonatación del hormigón. Modelo FIB 276
- Corrosión por cloruros 279
- Comentarios adicionales para el diseño prestacional para prevenir la corrosión 280

4.15. Referencias 281

Anexo– Ejemplos de elección de los parámetros de diseño por durabilidad, según el Reglamento CIRSOC 201-2005 287
- Ejemplo N° 1 287
- Ejemplo N° 2 288
- Ejemplo N° 3 289
- Ejemplo N° 4 290
- Ejemplo N° 5 292
- Ejemplo N° 6 293

CAPÍTULO 5 - ESPECIFICACIÓN Y CONTROL DE CONFORMIDAD DE LA RESISTENCIA 295

5.1. La naturaleza probabilística de la resistencia del hormigón 297
- Histograma de frecuencias y Curva de Gauss 299
- Algunas consideraciones sobre la aplicación del modelo de Gauss a la evaluación de la resistencia del hormigón 302

5.2. Resistencia especificada 303
- Edad de diseño del hormigón 306
- Implicancias tecnológicas y económicas de los valores adoptados para las resistencias especificadas 306

5.3. Resistencia potencial y resistencia efectiva 311

5.4. Criterios de conformidad de la resistencia potencial 311

5.5. Errores en la estimación de la resistencia de un lote 313
- Curvas de operación características (Curvas OC) 314
- Líneas de equiprobabilidad 317

5.6. Control de conformidad y criterios de conformidad en el Reglamento CIRSOC 201-2005 318
5.6.1. Conformidad con la resistencia especificada. Cantidad de ensayos y dimensiones de los lotes 320
5.6.2. Criterios de conformidad de resistencia para el Modo 1 de Control 321
5.6.3. Criterios de conformidad para el Modo 2 de Control 323

5.7. La resistencia media a utilizar para el diseño de la mezcla (dosificación) y la resistencia especificada 323

5.8. Evaluación del desarrollo de la resistencia efectiva 325
5.8.1. Método del ensayo de probetas moldeadas 327
5.8.2. Método de la madurez del hormigón 328
5.8.3. Ejemplo de aplicación del método de madurez del hormigón 329
5.8.4. Un ejemplo que ilustra sobre la información aportada por el método de madurez 331

5.9. Verificaciones a realizar cuando un lote no posee la resistencia potencial especificada 333

5.10. Referencias 334

CAPÍTULO 6 - HORMIGÓN FRESCO - PROPIEDADES 335

6.1. Introducción al estudio del comportamiento del hormigón fresco 337

6.2. Principios elementales de reología del hormigón y su relación con la trabajabilidad 337

6.3. Trabajabilidad 342

6.4. Ensayo de asentamiento 345

6.5. Ensayo de extendido 348

6.6. Ensayo de remoldeo 350

6.7. Consistencia y trabajabilidad en los Reglamentos de estructuras de hormigón 351

6.8. Aire intencionalmente incorporado 353

6.9. Contenido de material pulverulento que pasa el tamiz IRAM 300 µm 358

6.10. Exudación de agua 360

6.11. Contenido mínimo de cemento 364

6.12. Homogeneidad de una mezcla de hormigón 365

6.13. Tiempo de fraguado del hormigón 367

6.14. Influencia de la temperatura y del tiempo transcurrido desde el mezclado en las propiedades del hormigón fresco 369

6.15. Criterios y control de conformidad del hormigón fresco 372

6.16. Referencias 375

Anexo 6.1. Medición del contenido de aire total en el hormigón fresco. Método de presión. Equipo de Washington. Norma IRAM 1602 377

Anexo 6.2. Medición de la exudación de agua. Norma IRAM 1604 380

Anexo 6.3. Medición del tiempo de fraguado del hormigón, por el método de resistencia a la penetración. Norma IRAM 1662 384