

# Sumário

## A durabilidade do concreto

### Capítulo 1 - Introdução - 1

Referências - 7

### Capítulo 2 - Mecanismos físicos de degradação do concreto - 9

2.1 Introdução - 9

2.2 Retração - 10

2.2.1 Retração plástica - 10

2.2.1.1 Evitando fissuras por retração plástica - 16

2.2.1.2 Evitando fissuras por assentamento plástico - 17

2.2.2 Retração por secagem - 18

2.2.2.1 Pressão de capilaridade - 19

2.2.2.2 Efeitos das partículas de gel - 20

2.2.2.3 Retração de agregado - 21

2.2.2.4 Retração em função do tempo - 22

2.2.2.5 Fatores de controle da retração por secagem - 25

2.2.2.6 Fissuras resultantes da retração - 32

2.2.3 Retração autógena - 41

2.2.4 Reduzindo o problema de fissuras resultantes de retração - 44

2.3 Fissuras térmicas - 47

2.3.1 Expansão e contração térmicas - 47

2.3.2 Fissuras resultantes de contração térmica - 50

2.3.3	Fatores que influenciam a contração térmica inicial	- 52
2.3.3.1	Condições ambientais	- 52
2.3.3.2	Práticas de construção	- 53
2.3.3.3	Composição do concreto	- 55
2.3.4	Evitando fissuras térmicas	- 63
2.4	Ataque de congelamento-degelo	- 66
2.4.1	Mudanças de volume de água	- 66
2.4.2	Ação de formação de gelo no concreto	- 67
2.4.2.1	Scaling	- 73
2.4.2.2	D-cracking	- 76
2.4.2.3	Pipocamentos (pop-outs)	- 79
2.4.3	Evitando danos do ataque de congelamento-degelo	- 79
2.4.3.1	Misturas de incorporação de ar	- 79
2.4.3.2	Efeitos da incorporação de ar	- 81
2.4.3.3	Perda de ar incorporado	- 85
2.4.3.4	Fatores que afetam o conteúdo de ar e os parâmetros de espaços de ar	- 89
2.4.3.5	Outras estratégias	- 93
2.5	Abrasão e erosão	- 95
2.5.1	Mecanismos de abrasão e erosão	- 96
2.5.2	Fatores que influenciam a resistência à abrasão e erosão	- 103
2.5.3	Desenvolvendo resistência à abrasão	- 107

### **Capítulo 3 - Mecanismos químicos de degradação do concreto - 125**

3.1	Introdução	- 125
3.2	Ataque de sulfatos	- 125
3.2.1	Sulfatos no meio ambiente	- 125
3.2.1.1	Água do mar	- 125

- 3.2.1.2 Solo e água do subsolo - 126
- 3.2.1.3 Outras fontes - 128
- 3.2.2 Ataque de sulfato convencional - 128
- 3.2.3 Fatores que influenciam na resistência do concreto ao ataque de sulfato convencional - 132
  - 3.2.3.1 Concentração do sulfato - 132
  - 3.2.3.2 Temperatura - 133
  - 3.2.3.3 Composição do cimento - 133
  - 3.2.3.4 Propriedades de permeação - 137
  - 3.2.3.5 Conteúdo de cimento - 138
- 3.2.4 Ataque de sulfato de magnésio - 138
- 3.2.5 Fatores que influenciam na resistência do concreto ao ataque de sulfato de magnésio - 139
  - 3.2.5.1 Concentração do sulfato - 140
  - 3.2.5.2 Temperatura - 140
  - 3.2.5.3 Composição do cimento - 141
- 3.2.6 Formação de taumasita - 141
- 3.2.7 Fatores que influenciam a formação da taumasita - 143
  - 3.2.7.1 Temperatura - 143
  - 3.2.7.2 Condições de água do subsolo - 143
  - 3.2.7.3 Composição do cimento - 145
- 3.2.8 Evitando o ataque de sulfato - 146
- 3.2.9 Formação retardada de etringita - 150
  - 3.2.9.1 Evitando a formação retardada de etringita - 151
- 3.3 Reações álcali-agregados - 152
  - 3.3.1 Reação álcali-sílica - 152
  - 3.3.2 Reação álcali-carbonato - 153
  - 3.3.3 Reação álcali-silicato - 154
  - 3.3.4 Expansão e fissura causada por reações álcali-agregado - 154

3.3.4.1	Conteúdo alcalino	- 155
3.3.4.2	Temperatura	- 158
3.3.4.3	Tamanho e forma das partículas	- 159
3.3.4.4	Umidade	- 163
3.3.4.5	Fator A/C	- 163
3.3.4.6	Escala de tempo para fissuras	- 164
3.3.5	Fontes de álcalis	- 170
3.3.5.1	Cimento Portland	- 170
3.3.5.2	Outros constituintes do cimento	- 170
3.3.5.2.1	Cinza volante	- 170
3.3.5.2.2	Escória granulada de alto-forno	- 172
3.3.5.2.3	Fumo de sílica	- 173
3.3.5.2.4	Água	- 173
3.3.5.2.5	Agregados	- 175
3.3.5.2.6	Ingredientes químicos	- 176
3.3.5.2.7	Fontes externas	- 176
3.3.6	Reatividade dos agregados	- 176
3.3.6.1	Reação álcali-sílica	- 176
3.3.6.1.1	Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	- 177
3.3.6.1.2	Opala	- 177
3.3.6.1.3	Vidro vulcânico	- 178
3.3.6.1.4	Vidro artificial	- 178
3.3.6.2	Reação álcali-silicato	- 178
3.3.6.3	Reação álcali-carbonato	- 179
3.3.6.3.1	Dolomita (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	- 179
3.3.6.3.2	Magnesita (MgCO <sub>3</sub> )	- 179
3.3.7	Identificando reações álcali-agregados	- 179

3.3.8	Evitando a reação álcali-agregado	- 182
3.3.8.1	Limitando a exposição à umidade	- 182
3.3.8.2	Limitando os níveis de álcalis	- 183
3.3.8.3	Ingredientes	- 183
3.3.8.4	Materiais pozolânicos e hidráulicos latentes	- 185
3.3.8.4.1	Cinza volante	- 186
3.3.8.4.2	Escória granulada de alto-forno	- 186
3.3.8.4.3	Fumo de sílica	- 187
3.3.8.4.4	Metacaulim	- 187
3.4	Ataque de ácido	- 187
3.4.1	Percolação do concreto por água	- 188
3.4.2	Ambientes ácidos	- 189
3.4.3	Mecanismos de ataque de ácidos	- 191
3.4.4	Fatores que influenciam as taxas de ataque de ácido	- 195
3.4.4.1	Fatores ambientais	- 195
3.4.4.2	Fatores materiais	- 198
3.4.5	Ação de ácidos específicos	- 201
3.4.5.1	Ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> )	- 201
3.4.5.2	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	- 202
3.4.5.3	Ácido acético (CH <sub>3</sub> COOH)	- 203
3.4.5.4	Ácido oxálico	- 203
3.4.5.5	Resorcinol	- 203
3.4.6	Identificando o ataque de ácidos	- 204
3.4.7	Conseguindo resistência a ácidos	- 205
3.4.7.1	Padrões	- 205
3.4.7.2	Resistência melhorada a ácidos pelo planejamento da mistura	- 206
3.4.7.3	Concreto modificado com polímero	- 207

3.4.7.4 Coberturas protetoras - 208

Referências - 210

**Capítulo 4- Corrosão do reforço de aço no concreto - 229**

4.1 Introdução - 229

4.2 Corrosão do aço no concreto - 230

4.2.1 Corrosão de metais - 230

4.2.2 Química da corrosão galvânica - 230

4.2.3 Passivação - 233

4.2.4 Corrosão do aço no concreto reforçado - 233

4.3 Infiltração de cloretos no concreto - 240

4.3.1 Cloretos no meio ambiente - 240

4.3.2 Mecanismos de ingresso - 241

4.3.2.1 Difusão - 241

4.3.2.2 Fluxo - 249

4.3.2.3 Ação capilar - 251

4.3.3 Ligação de cloretos - 254

4.3.4 Papel do cloreto na corrosão - 259

4.3.5 Proteção contra a corrosão induzida por cloretos - 263

4.3.5.2 Inibidores de corrosão e outros ingredientes de misturas - 267

4.3.5.3 Materiais alternativos de reforço - 269

4.3.5.4 Cobrimento de reforço - 273

4.3.5.5 Fibras - 275

4.3.5.6 Coberturas de superfície - 275

4.4 Carbonatação - 276

4.4.1 Reação de carbonatação - 276

4.4.2 Fatores que influenciam as taxas de carbonatação - 280

4.4.3 Mudanças nas propriedades físicas - 289

4.4.4 Evitando a carbonatação - 292

Referências - 297

## **Capítulo 5 - Especificação e planejamento de concreto durável - 305**

5.1 Introdução - 305

5.2 Concreto como meio permeável - 306

5.2.1 Porosidade - 306

5.2.2 Fissuras - 311

5.2.3 Absorção - 311

5.2.4 Fluxo - 312

5.2.5 Difusão - 313

5.3 Cimento - 315

5.3.1 Cimento Portland - 318

5.3.2 Escória granulada de alto-forno - 322

5.3.3 Cinza volante - 324

5.3.3.1 CV de silício - 324

5.3.3.2 CV calcária - 326

5.3.4 Fumo de sílica - 327

5.3.5 Calcário - 328

5.3.6 Pozolanas - 328

5.4 Agregados - 329

5.4.1 Agregado natural - 329

5.4.2 Agregado reciclado - 333

5.4.3 Escória de alto-forno resfriada a ar - 335

5.4.4 Agregados leves - 336

5.5 Ingredientes de misturas - 338

- 5.5.1 Superplastificantes e redutores de água - 338
- 5.5.2 Agentes incorporadores de ar - 340
- 5.5.3 Seladores de umidade - 340
- 5.5.4 Inibidores de corrosão - 343
- 5.5.5 Ingredientes redutores de expansão de álcali-agregados - 343
- 5.6 Fibras - 344
- 5.7 Especificando concreto durável - 345
  - 5.7.1 Concreto designado - 346
  - 5.7.2 Concreto planejado - 347
  - 5.7.3 Concreto prescrito, prescrito por norma e proprietário - 348
  - 5.7.4 Especificação para durabilidade: concreto designado - 348
    - 5.7.4.1 Carbonatação - 349
    - 5.7.4.2 Ataque de congelamento-degelo - 352
    - 5.7.4.3 Ataque químico - 352
  - 5.7.5 Especificação para durabilidade: concreto planejado - 353
    - 5.7.5.1 Cloretos e carbonatação - 356
    - 5.7.5.2 Ataque de congelamento-degelo - 357
    - 5.7.5.3 Ataque químico - 358
  - 5.7.6 Especificação para RA - 359
  - 5.7.7 Especificação para o controle de reação álcali-sílica - 361
  - 5.7.8 Especificação para controle de encolhimento por secagem - 361
- 5.8 Planejamento de mistura de concreto - 361
- 5.9 Concreto especial - 366
  - 5.9.1 Concreto auto-adensável - 366
  - 5.9.2 Concreto de alta resistência - 367
  - 5.9.3 Concreto espumoso - 368
  - 5.9.4 Concreto leve e pesado - 369



Referências - 371

**Capítulo 6 - Construção de estruturas de concreto duráveis - 377**

6.1 Introdução - 377

6.2 Superfície de concreto - 377

6.2.1 Fôrmas de permeabilidade controlada - 378

6.2.2 Acabamento de superfície - 381

6.3 Cura - 382

6.4 Sistemas de proteção de superfícies - 392

6.4.1 Camadas de película para superfícies - 392

6.4.2 Seladores de superfícies - 395

6.4.3 Impregnantes hidrofóbicos - 396

6.4.4 Screeds - 399

6.4.5 Películas protetoras - 403

6.5 Proteção catódica - 404

6.5.1 Proteção catódica por corrente impressa - 405

6.5.1.1 Anodos - 407

6.5.1.2 Operação - 408

6.5.1.3 Monitoramento - 409

6.5.2 Proteção catódica galvânica - 412

Referências - 414

**Capítulo 7 - Utilização, reparo e manutenção de estruturas de concreto - 419**

7.1 Introdução - 419

7.2 Utilização de estruturas - 420

7.2.1 Estados limites - 420

7.2.2 Aspectos da durabilidade que influenciam a utilização - 423

7.2.3	Durabilidade e desempenho	- 423
7.2.4	Reparos para manutenção da utilização	- 426
7.3	Avaliação de estruturas	- 426
7.3.1	Processo de avaliação	- 427
7.3.2	Preveno a deterioração futura	- 435
7.4	Testes in situ	- 449
7.4.1	Medição de cobrimento	- 450
7.4.2	Absorção à superfície	- 452
7.4.3	Permeabilidade	- 458
7.4.4	Potencial de meia célula	- 459
7.4.5	Resistência de polarização linear	- 461
7.4.6	Resistividade	- 464
7.4.7	Resistência à abrasão	- 465
7.5	Testes em laboratório	- 466
7.5.1	Análise química	- 466
7.5.1.1	Cloretos	- 471
7.5.1.2	Sulfatos	- 475
7.5.1.3	Álcalis (sódio e potássio)	- 476
7.5.1.4	Carbonatação	- 476
7.5.2	Características de vazios de ar	- 477
7.5.3	Teste de expansão latente	- 478
7.6	Produtos de reparo do concreto	- 479
7.7	Métodos de reparo	- 482
7.7.1	Proteção contra ingresso	- 483
7.7.2	Controle de umidade	- 484
7.7.3	Restauração do concreto	- 484
7.7.4	Reforço estrutural	- 485

7.7.5	Aumento da resistência física e química	- 485
7.7.6	Preservando ou restaurando a passividade	- 485
7.7.7	Aumentando a resistividade	- 486
7.7.8	Controle catódico e proteção catódica	- 486
7.7.9	Controle de áreas anódicas	- 487
7.7.10	Planejando estratégias para reparo e reabilitação	- 487
7.8	Reabilitação de estruturas de concreto	- 487
7.8.1	Extração eletroquímica de cloretos	- 488
7.8.2	Realcalinização	- 493
7.8.3	Inibidores migratórios de corrosão	- 496
	<b>Índice</b>	<b>- 505</b>