
Sumário

1	Cimento Portland	1
	Histórico	1
	Fabricação do cimento Portland	2
	Composição química do cimento Portland	8
	Hidratação do cimento	13
	Silicatos de cálcio hidratados	14
	Aluminato tricálcico hidratado e a ação do sulfato de cálcio	17
	Pega	19
	Falsa pega	20
	Finura do cimento	20
	Estrutura do cimento hidratado	26
	Volume dos produtos de hidratação	26
	Poros capilares	32
	Poros de gel	33
	Resistência mecânica do gel de cimento	34
	Água retida na pasta de cimento hidratada	36
	Calor de hidratação do cimento	37
	Influência do teor de compostos nas propriedades do cimento	41
	Efeito dos álcalis	46
	Efeitos da fase vítrea no clínquer	48
	Ensaio de propriedades do cimento	49
	Consistência da pasta normal	49
	Tempo de pega	50
	Expansibilidade	51
	Resistência do cimento	53
	Referências	57
2	Materiais cimentícios	62
	Classificação dos materiais cimentícios	62
	Tipos de cimento	66
	Cimento Portland comum	69
	Cimento Portland de alta resistência inicial	71
	Cimentos Portland de alta resistência inicial especiais	73

Cimento Portland de baixo calor de hidratação	76
Cimento Portland resistente a sulfatos	77
Cimento Portland branco e pigmentos	78
Cimento Portland de alto-forno	81
Cimento supersulfatado	84
Pozolanas	85
Sílica ativa	89
Fílers	90
Outros cimentos	91
Escolha do cimento a utilizar	93
Cimento de elevado teor de alumina	94
Conversão do cimento de elevado teor de alumina	98
Propriedades refratárias do cimento de elevado teor de alumina	105
Referências	107

3 Propriedades dos agregados **111**

Classificação geral dos agregados	111
Classificação dos agregados naturais	113
Amostragem	115
Forma e textura das partículas	117
Aderência do agregado	123
Resistência do agregado	124
Outras propriedades mecânicas dos agregados	127
Massa específica	130
Massa unitária	132
Porosidade e absorção do agregado	133
Teor de umidade do agregado	137
Inchamento do agregado miúdo	140
Substâncias deletérias nos agregados	142
Impurezas orgânicas	142
Argila e outros materiais finos	143
Contaminação por sais	145
Partículas instáveis	145
Estabilidade de volume do agregado	148
Reação álcali-sílica	150
Ensaio para a verificação da reatividade do agregado	151
Reação álcali-carbonato	153
Propriedades térmicas do agregado	154
Análise granulométrica	155
Curvas granulométricas	158
Módulo de finura	162
Requisitos de granulometria	162
Granulometrias práticas	170
Granulometria de agregados miúdos e graúdos	172
Agregados grandes e pequenos	175
Granulometria descontínua	178
Dimensão máxima do agregado	180

Pedras de mão	183
Manuseio do agregado	183
Agregados especiais	184
Agregado reciclado de concreto	184
Referências	186
4 Concreto fresco	190
Qualidade da água de amassamento	190
Massa específica do concreto fresco	193
Definição de trabalhabilidade	194
A necessidade de trabalhabilidade suficiente	195
Fatores que afetam a trabalhabilidade	196
Medida da trabalhabilidade	198
Abatimento de tronco de cone	198
Ensaio do fator de compactação	201
Ensaio de fluidez da ASTM	203
Ensaio de remoldagem	203
Ensaio Vebe	203
Ensaio da mesa de espalhamento	205
Ensaio de penetração de bola e ensaio de adensabilidade	206
Ensaio K de Nasser	207
Ensaio dos dois pontos (Ensaio Tattersall)	208
Comparação dos ensaios	208
Tempo de enrijecimento do concreto	212
Efeito do tempo e da temperatura na trabalhabilidade	212
Segregação	214
Exsudação	216
A mistura do concreto	218
Betoneiras	219
Uniformidade da mistura	221
Tempo de mistura	222
Mistura manual	225
Concreto dosado em central	226
Redosagem de água	228
Concreto bombeado	229
Bombas de concreto	230
Uso do bombeamento	231
Requisitos para o concreto bombeado	232
Bombeamento de concreto com agregado leve	236
Concreto projetado	236
Concretagem submersa	239
Concreto com agregado pré-colocado	240
Vibração do concreto	241
Vibradores internos	242
Vibradores externos	243
Mesas vibratórias	243
Outros vibradores	244

Revibração	245
Concreto tratado a vácuo	246
Fôrmas drenantes	248
Análise do concreto fresco	248
Concreto autoadensável	250
Referências	251
5 Aditivos	257
Benefícios dos aditivos	257
Tipos de aditivos	257
Aditivos aceleradores	259
Aditivos retardadores	264
Aditivos redutores de água	267
Superplastificantes	270
Natureza dos superplastificantes	271
Efeitos dos superplastificantes	271
Dosagem de superplastificantes	274
Perda de trabalhabilidade	275
Compatibilidade cimento-superplastificante	277
O uso dos superplastificantes	278
Aditivos especiais	278
Aditivos impermeabilizantes	279
Aditivos bactericidas e similares	280
Observações sobre o uso de aditivos	280
Referências	281
6 Resistência do concreto	285
Relação água/cimento	285
Água efetiva na mistura	289
Relação gel/espaço	290
Porosidade	293
Compactos de cimento	300
Influência das propriedades do agregado graúdo na resistência	300
Influência da relação agregado/cimento na resistência	303
Natureza da resistência do concreto	305
Resistência à tração	305
Fissuração e ruptura na compressão	307
Ruptura sob estado múltiplo de tensões	309
Microfissuração	314
Interface agregado-pasta de cimento	316
Efeito da idade na resistência do concreto	318
Maturidade do concreto	320
Relação entre as resistências à compressão e à tração	324
Aderência entre o concreto e a armadura	327
Referências	327

7	Outras características do concreto endurecido	334
	Cura do concreto	334
	Métodos de cura	339
	Ensaio em agentes de cura	343
	Duração da cura	343
	Colmatação autógena	344
	Variabilidade da resistência do cimento	345
	Variações das propriedades do cimento	348
	Fadiga do concreto	351
	Resistência ao impacto	360
	Propriedades elétricas do concreto	363
	Propriedades acústicas	367
	Referências	370
8	Efeitos da temperatura no concreto	375
	Influência da temperatura inicial na resistência do concreto	375
	Cura a vapor à pressão atmosférica	382
	Cura a vapor à alta pressão (autoclavagem)	386
	Outros métodos de cura térmica	390
	Propriedades térmicas do concreto	390
	Condutividade térmica	391
	Difusividade térmica	392
	Calor específico	394
	Coefficiente de dilatação térmica	394
	Resistência do concreto a altas temperaturas e ao fogo	401
	Módulo de elasticidade do concreto a altas temperaturas	404
	Comportamento do concreto ao fogo	404
	Resistência do concreto a temperaturas muito baixas	407
	Concreto massa	410
	Concretagem em tempo quente	415
	Concretagem em tempo frio	418
	Operações de concretagem	420
	Referências	423
9	Elasticidade, retração e fluência	429
	Relação tensão-deformação e módulo de elasticidade	429
	Expressões para a curva tensão-deformação	434
	Expressões para o módulo de elasticidade	435
	Módulo de elasticidade dinâmico	437
	Coefficiente de Poisson	438
	Variações de volume nas primeiras idades	440
	Retração autógena	442
	Expansão	443

Retração por secagem	444
Mecanismo de retração	444
Fatores que influenciam a retração	446
Influência da cura e das condições de conservação	452
Previsão da retração	454
Retração diferencial	456
Fissuração induzida pela retração	458
Movimentação de umidade	460
Retração por carbonatação	462
Compensação da retração pelo uso de cimentos expansivos	464
Tipos de cimentos expansivos	465
Concreto com retração compensada	466
Fluência do concreto	467
Fatores que influenciam a fluência	470
Influência da tensão e da resistência	473
Influência das propriedades do cimento	475
Influência da umidade relativa do ambiente	476
Outras influências	480
Relação entre a fluência e o tempo	484
Natureza da fluência	488
Efeitos da fluência	492
Referências	494

10 Durabilidade do concreto **502**

Causas da durabilidade inadequada	502
Transporte de fluidos no concreto	503
Influência do sistema de poros	504
Escoamento, difusão e sorção	504
Coeficiente de permeabilidade	505
Difusão	506
Coeficiente de difusão	506
Difusão através do ar e da água	506
Absorção	507
Ensaio de absorção superficial	508
Sortividade	509
Permeabilidade do concreto à água	510
Ensaio de permeabilidade	514
Ensaio de penetração à água	515
Permeabilidade ao ar e ao vapor	516
Carbonatação	518
Efeitos da carbonatação	519
Velocidade de carbonatação	519
Fatores que influenciam a carbonatação	521
Carbonatação de concretos com cimentos compostos	523
Medida da carbonatação	525
Aspectos adicionais da carbonatação	526
Ataque por ácidos	526

Ataque por sulfatos	529
Ataque por sulfatos com formação de taumasita	530
Formação da etringita tardia	530
Mecanismos de ataque	530
Mitigação do ataque por sulfatos	532
Ensaio de resistência a sulfatos	534
Eflorescências	535
Efeitos da água do mar no concreto	536
Deterioração por sais	538
Seleção de concretos para a exposição à água do mar	539
Desagregação por reação álcali-silica	539
Medidas preventivas	541
Abrasão do concreto	543
Ensaio de resistência à abrasão	543
Fatores que influenciam a resistência à abrasão	544
Resistência à erosão	546
Resistência à cavitação	546
Tipos de fissuras	548
Referências	552
11 Efeitos do gelo e degelo e de cloretos	559
Ação do congelamento	559
Comportamento das partículas de agregado graúdo	565
Incorporação de ar	567
Características do sistema de vazios de ar	569
Exigências de ar incorporado	570
Fatores que influenciam a incorporação de ar	573
Estabilidade do ar incorporado	575
Incorporação de ar por microesferas	576
Determinação do teor de ar	577
Ensaio de resistência do concreto ao gelo e degelo	578
Efeitos adicionais da incorporação de ar	581
Efeitos de agentes descongelantes	583
Ataque por cloretos	585
Mecanismo de corrosão induzida por cloretos	586
Cloretos no concreto	588
Ingresso de cloretos	590
Limites do teor de cloretos	592
Fixação dos íons cloreto	593
Influência dos cimentos compostos sobre a corrosão	594
Fatores adicionais influentes sobre a corrosão	595
Espessura do revestimento da armadura	597
Ensaio de penetrabilidade do concreto por cloretos	597
Interrupção da corrosão	598
Referências	599

12	Ensaio em concreto endurecido	605
	Ensaio de resistência à compressão	605
	Ensaio em corpos de prova cúbicos	606
	Ensaio em corpos de prova cilíndricos	607
	Ensaio em cubos equivalentes	608
	Efeitos das condições das bases do corpo de prova e do capeamento	609
	Capeamentos não aderentes	611
	Ensaio de resistência à compressão	613
	Ruptura de corpos de prova à compressão	615
	Efeito da relação altura/diâmetro na resistência de corpos de prova cilíndricos	616
	Comparação entre as resistências de corpos de prova cilíndricos e cúbicos	619
	Ensaio de resistência à tração	620
	Ensaio de resistência à tração na flexão	621
	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	624
	Influência da condição de umidade durante o ensaio sobre a resistência	626
	Influência do tamanho do corpo de prova sobre a resistência	627
	Influência do tamanho sobre os ensaios de resistência à tração	629
	Influência do tamanho sobre os ensaios de resistência à compressão	632
	Tamanho do corpo de prova e do agregado	636
	Ensaio em testemunhos	637
	Uso de testemunhos de pequenas dimensões	639
	Fatores influentes na resistência dos testemunhos	640
	Relação entre a resistência de testemunhos e a resistência da estrutura	644
	Ensaio de corpos de prova cilíndricos moldados no local	645
	Influência da velocidade de aplicação de carga sobre a resistência	646
	Ensaio com cura acelerada	648
	Utilização direta da resistência acelerada	651
	Ensaio não destrutivo	652
	Ensaio de dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão	653
	Ensaio de resistência à penetração	656
	Ensaio de arrancamento (<i>pull-out test</i>)	657
	Ensaio de instalação posterior	659
	Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica	659
	Outras possibilidades de ensaios não destrutivos	662
	Método da frequência de ressonância	663
	Ensaio sobre a composição do concreto endurecido	664
	Teor de cimento	664
	Determinação da relação água/cimento original	664
	Métodos físicos	665
	Variabilidade dos resultados	665
	Distribuição da resistência	665
	Desvio padrão	669
	Referências	670

13	Concretos especiais	678
	Concretos com diferentes materiais cimentícios	678
	Aspectos gerais do uso de cinza volante, escória granulada de alto-forno e sílica ativa	679
	Aspectos relativos à durabilidade	680
	Variabilidade dos materiais	681
	Concreto com cinza volante	682
	A influência da cinza volante nas propriedades do concreto fresco	683
	Hidratação da cinza volante	684
	Evolução da resistência do concreto com cinza volante	686
	Durabilidade de concretos com cinza volante	688
	Concretos com escória granulada de alto-forno	691
	Influência da escória granulada de alto-forno no concreto fresco	691
	Hidratação e desenvolvimento da resistência do concreto com escória de alto-forno	691
	Durabilidade de concreto com escória granulada de alto-forno	694
	Concreto com sílica ativa	696
	Influência da sílica ativa nas propriedades do concreto fresco	697
	Hidratação e desenvolvimento da resistência do sistema cimento Portland-sílica ativa	699
	Durabilidade do concreto com sílica ativa	702
	Concreto de alto desempenho	704
	Propriedades dos agregados no concreto de alto desempenho	706
	Concreto de alto desempenho no estado fresco	707
	Compatibilidade entre o cimento Portland e o aditivo superplastificante	708
	Concreto de alto desempenho no estado endurecido	710
	Ensaio de concreto de alto desempenho	715
	Durabilidade do concreto de alto desempenho	715
	O futuro do concreto de alto desempenho	717
	Concreto leve	718
	Classificação dos concretos leves	719
	Agregados leves	722
	Agregados naturais	722
	Agregados artificiais	722
	Especificações para agregados leves	725
	Efeito da absorção de água pelo agregado leve	727
	Concreto com agregados leves	729
	Concreto com agregados leves no estado fresco	729
	Resistência do concreto com agregados leves	730
	Aderência entre o agregado leve e a matriz	732
	Propriedades elásticas do concreto com agregados leves	733
	Durabilidade de concreto com agregados leves	735
	Propriedades térmicas de concretos com agregados leves	737
	Concreto celular	738
	Concreto celular autoclavado	740
	Concretos sem finos	741
	Concreto para cravação de pregos	744
	Comentários sobre concretos especiais	745
	Referências	746

14 Dosagem de concretos	754
Aspectos econômicos	755
Especificações	756
O processo de dosagem	758
Resistência média e resistência “mínima”	759
Variabilidade da resistência	763
Controle de qualidade	769
Fatores que controlam a dosagem	771
Durabilidade	771
Trabalhabilidade	774
Dimensão máxima do agregado	775
Granulometria e tipo de agregado	776
Consumo de cimento	777
Proporções da mistura e quantidades por betonada	777
Cálculo pelo volume absoluto	779
Misturas de agregados para obtenção de granulometria padrão	780
Método americano de dosagem	784
Exemplo	787
Dosagem de concreto com abatimento zero	788
Dosagem para concreto fluido	788
Dosagem de concretos de alto desempenho	790
Dosagem de concretos com agregados leves	791
Exemplo	793
Método britânico de dosagem	794
Exemplo	797
Outros métodos de dosagem	798
Considerações finais	801
Referências	802
Normas brasileiras citadas	805
Normas americanas importantes	813
Normas britânicas e europeias importantes	817
Índice de nomes	823
Índice	841