

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i - iv
Índice Geral	v - x
Índice de Figuras.....	xi - xvi
Índice de Quadros	xvii - xx
Bibliografia.....	xxi - xxxii
Resumo	xxxiii - xxxiv
Preâmbulo	
Objectivos e Estrutura do Trabalho	
i. Introdução	xxxv
ii. Objectivos.....	xxxviii
iii. Metodologia.....	xxxix
iv. Estrutura do Trabalho.....	xli
Capítulo 1 - Sistemas Ligantes Antigos e Modernos (1-74)	
1.1. Aspectos Gerais	1
1.2. Cimentos Antigos	6
1.3. Cimentos Modernos do Tipo Portland	13
1.4. Os Cimentos de Base Alcalina	21
1.5. Zeólitos.....	26
1.5.1. Génese e Constituição Química	26
1.5.2. A Estrutura dos Zeólitos	29
1.5.3. Obtenção dos Zeólitos	32
1.5.4. Cinética e Mecanismos de Formação dos Zeólitos.....	36
1.5.5. Aplicações Industriais dos Zeólitos	37
1.6. Activação Alcalina	39
1.6.1. Aspectos Gerais	39
1.6.2. Escórias e Substâncias Activadoras.....	44
1.6.3. Activação Alcalina dos Metacaulinos.....	47
1.6.4. Activadores, Ordem de Mistura, Cura e Retracção	50
1.6.5. Possibilidades e Campos de Aplicação	55
1.7. Química dos Sistemas Geopoliméricos.....	57
1.8. Estrutura e Propriedades dos Geopolímeros.....	62

1.8.1. Caulinite e LTGS (Geopolímeros de Presa a Baixa Temperatura)	62
1.8.2. Cimentos Geopoliméricos e Reacção Álcalis-Sílica (RAS).....	67
1.8.3. Confinamento Iónico	71

Capítulo 2 – Materiais e Procedimentos de Ensaio (75-132)

2.1. Introdução	75
A – Os caulinos	75
B – Areias e Britas	75
C – Produtos de Adição.....	76
D – Caracterização dos Activadores	76
2.2. Caracterização das Matérias de Partida.....	76
A – Os Caulinos	76
A.1. – Selecção dos Caulinos	76
A.2. – Análises Químicas e Físicas dos Caulinos Seleccionados	78
A.2.1. – Caulino Mibal-A.....	78
A.2.2. – Caulino de Campados-A.....	80
A.2.3. – Caulino de Alvarelhos	81
A.3. – Análises por Difraccção de Raios X (DRX)	83
A.4. – Análises por Espectroscopia de Infra-Vermelho (EIV).....	86
A.5. – Análises por Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	89
B – Areias e Britas	92
B.1. – Origem.....	92
B.2. – Granulometrias, Massa Volúmica e Absorção de Água	93
C – Produtos de Adição.....	94
C.1. – Adição de Cal (Hidróxido de Cálcio).....	94
C.2. – Adição de Carbonato de Sódio (Na ₂ CO ₃).....	95
C.3. – Adição de Pó de Vidro.....	96
C.4. – Adição de Areia de Jales	98
D – Caracterização dos Activadores	101
D.1. – Activadores Simples.....	101
D.2. – Activadores Compostos	104
D.3. – Composição Química do Silicato de Sódio e Razões Ideais	105
2.3. Composições de Betões e Argamassas	107
2.3.1. Argamassas	107
2.3.2. Betões	109
2.4. Procedimentos de Ensaio	110
2.4.1. Ensaios de Flexão e Compressão Simples	110
2.4.2. Ensaio de Retracção	111
2.4.3. Determinação do Tempo de Presa	112
2.4.4. Determinação do Módulo de Elasticidade	113
2.4.5. Ensaios de Absorção de Água e Permeabilidade.....	114
- Absorção de Água por Imersão (Vácuo).....	114
- Absorção de Água por Imersão (Pressão Atmosférica)	115
- Absorção de Água por Capilaridade	116

- Ensaio de Permeabilidade à Água	118
- Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio.....	121
2.4.6. Ataques Químicos e de Desgaste	122
- Ataque pelos Ácidos	122
- Migração do Ião Cloro	123
- Desgaste na Câmara de Los Angeles	125
- Ensaio de Gelo-Desgelo.....	126
- Ensaio de Molhagem-Secagem	129
- Ensaio de Choque Térmico	130
- Ensaio de Resistência às Altas Temperaturas.....	131

Capítulo 3 – Técnicas Experimentais de Análise Usadas (133-150)

3.1. Generalidades.....	133
3.2. Difraccção de Raios-X (DRX).....	139
3.3. Espectroscopia de Absorção de Infra-Vermelhos por Transformadas de Fourier (EIV).....	142
3.4. Ressonância Magnética Nuclear – Estado Sólido (RMN)	144
3.5. Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM)	148

Capítulo 4 – Obtenção do Metacaulino (151-178)

4.1. Preliminares	151
4.2. Difractogramas de Raios-X	153
4.3. Análise dos Espectros de Infra-Vermelho.....	155
4.4. Análise Estrutural por Ressonância Magnética Nuclear e Determinação do Tempo Ideal de Exposição.....	162
4.5. Determinação da Temperatura Óptima de Tratamento.....	169
4.6. Caracterização Complementar dos Metacaulinos.....	174
4.6.1. Composição Química	174
4.6.2. Difraccção de Raios-X.....	176
4.6.3. Massa Volúmica do Metacaulino - Mibal	177
4.6.4. Superfície Específica (Blaine) do Metacaulino - Mibal.....	177

Capítulo 5 – Condições de Fabrico, Compactação e Cura dos Geopolímeros (179-216)

5.1. Introdução	179
5.2. Activadores Compostos <i>versus</i> Activadores Simples.....	180
5.2.1. Compacidade	180
5.2.2. Razões de Combinação	183
5.3. Reactividade da Areia de Jales	193
5.4. Estudo das Condições de Fabrico e Cura.....	194
5.4.1. Condições de Mistura, Trabalhabilidade e Compactação	194
5.4.2. Tempo de Presa e seu Controlo	199

5.4.3. Condições de Cura	205
5.4.4. Evolução das Reacções de Presa.....	212

Capítulo 6 – Comportamento Mecânico (217-312)

6.1. Introdução	217
6.2. Activação de Argamassas com NaOH (Activador Simples)	219
6.2.1. Activador NaOH 12M.....	220
6.2.1.1. Compressão Simples	220
6.2.1.2. Tracção por Flexão.....	224
6.2.2. Activador NaOH 15M.....	228
6.2.2.1. Compressão Simples	228
6.2.2.2. Tracção por Flexão.....	231
6.2.3. Activador NaOH 18M.....	236
6.2.3.1. Compressão Simples	236
6.2.3.2. Tracção por Flexão.....	238
6.2.4. Estudo das Relações entre as Resistências à Tracção e à Compressão	241
6.2.5. Efeito da Substituição Parcial de Metacaulino por Cal	242
6.3. Acção da Concentração do Activador.....	245
6.4. Evolução das Resistências em Idades Mais Avançadas	252
6.4.1. Resistências Mecânicas em Composições sem Cal	252
6.4.2. Resistências Mecânicas em Composições com Cal	259
6.5. Activação com Activador Composto (Silicato e Hidróxido de Sódio).....	266
6.5.1. Argamassas	266
6.5.2. Geobetões.....	269
6.5.3. Análise Microscópica de Provetes Fracturados de Geobetão	275
6.6. Análise Estatística	278
6.6.1. Parâmetros Estatísticos.....	278
6.6.2. Quadros de Resultados (Activador Simples).....	280
6.6.3. Cálculo dos Intervalos de Variação (Activador Simples)	285
6.6.4. Quadros de Resultados (Activador Composto)	305
6.6.5. Cálculo dos Intervalos de Variação (Activador Composto).....	308

Capítulo 7 – Avaliação da Durabilidade (313-352)

7.1. Introdução	313
7.2. Preparação dos Provetes. Retracção e Módulo Elástico	318
7.2.1. Determinação da Retracção de Provetes de Argamassa Geopolimérica, Geobetão e Betão CPN.....	320
7.2.2. Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão.....	322
7.3. Ensaio de Durabilidade.....	325
7.3.1. Ensaio de Absorção e Permeabilidade	325
- Absorção de Água por Imersão sob Vácuo	325
- Absorção de Água por Imersão à Pressão Atmosférica.....	326
- Absorção de Água por Capilaridade.....	327

- Ensaio de Permeabilidade à Água	329
- Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio.....	332
7.3.2. Ataques Químicos	333
- Ataque pelos Ácidos.....	333
- Migração do Ião Cloro.....	340
7.3.3 .Ensaio de Desgaste e Abrasão.....	341
- Ensaio de Los Angeles.....	341
- Ensaio de Gelo-Desgelo	343
- Ensaio de Molhagem-Secagem.....	345
- Ensaio de Choque Térmico.....	346
- Ensaio de Resistência às Altas Temperaturas	347

Capítulo 8 – Discussão (353-394)

8.1. Aspectos Gerais.....	353
8.1.1. Objectivos e Resultados.....	353
8.1.2. Materiais de Partida e Metacaulinos.....	355
8.1.3. Activadores.....	358
8.2. Manuseamento e Condições de Fabrico.....	360
8.3. Adição de Cal Apagada e Reacção Pozolânica	361
8.4. Incorporação de Areia de Jales e Pó de Vidro	366
8.5. Fabrico, Cura e Comportamento Mecânico	367
8.5.1. Adição de Carbonato de Sódio	367
8.5.2. Condições de Fabrico, Compactação e Cura.....	368
8.5.3. Activação Alcalina com Activadores Simples	369
8.5.4. Activação Alcalina com Activadores Compostos	372
8.5.5. Resistências Mecânicas.....	375
8.5.6. Estabilidade Dimensional e Módulo Elástico	377
8.6. Ensaio de Durabilidade.....	380
8.6.1. Absorção e Permeabilidade.....	380
8.6.2. Ataque pelos Ácidos	383
8.6.3. Migração do Ião Cloro.....	384
8.7. Ensaio de Desgaste e Abrasão	385
8.7.1. Ensaio de Los Angeles.....	385
8.7.2. Gelo-Desgelo	385
8.7.3. Molhagem-Secagem.....	386
8.7.4. Ensaio de Choque Térmico.....	388
8.7.5. Resistência às Temperaturas Elevadas.....	389
8.8. Análise Estatística	392

Capítulo 9. Conclusões (395-400)

9.1. Conclusões Finais.....	395
9.2. Principais Aplicações e Trabalhos Futuros	398

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 – Sistemas Ligantes Antigos e Modernos

Fig. 1.1. – Geopolimerização da Caulinite.....	25
Fig. 1.2. – Formação dos Zeólitos.....	27
Fig. 1.3. – Estrutura Zeolítica Típica.....	30
Fig. 1.4. – Estrutura da Sodalite	30
Fig. 1.5. – <i>USF</i> dos Zeólitos	31
Fig. 1.6. – Chabazite e Gemlinite	32
Fig. 1.7. – Estrutura Aberta dos Zeólitos	38
Fig. 1.8. – Esquema de Mistura	54
Fig. 1.9. – Quadro Geral das Aplicações.....	57
Fig. 1.10. – Aspectos Estruturais e Nomenclatura.....	59
Fig. 1.11. – Sialatos	60
Fig. 1.12. – Activação da Caulinite	61
Fig. 1.13. – Lâminas 1:1 e 2:1.....	63
Fig. 1.14. – Folhas de Caulinite	63
Fig. 1.15. – Estrutura do K-PSS	65
Fig. 1.16. – Resistências <i>versus</i> Temperatura.....	67
Fig. 1.17. – Reacção Álcalis-Agregado (expansão em mm/m)	69
Fig. 1.18. – Confinamento de Metais Pesados.....	72
Fig. 1.19. – Perdas de Contaminantes Radioactivos	72

Capítulo 2 – Materiais e Procedimentos de Ensaio

Fig. 2.1. – Difracção de Raios X – Mibal-A.....	84
Fig. 2.2. – Difracção de Raios X – Campados-A.....	84
Fig. 2.3. – Difracção de Raios X – Alvarelhos.....	85
Fig. 2.4. – Espectros de IV – Mibal (bandas de 400 a 4000 cm^{-1})	87
Fig. 2.5 – Espectros de IV – Campados (bandas de 400 a 4000 cm^{-1})	87
Fig. 2.6. – Espectros de IV – Alvarelhos (bandas de 400 a 4000 cm^{-1}).....	88
Fig. 2.7. – RMN de ^{27}Al – Mibal (caulino)	90
Fig. 2.8. – RMN de ^{27}Al – Mibal (15 min).....	90
Fig. 2.9. – RMN de ^{27}Al – Mibal (1 hora).....	91
Fig. 2.10. – Ensaio de Retraccção	111
Fig. 2.11. – Determinação do Tempo de Presa.....	112
Fig. 2.12. – Determinação do Módulo de Young.....	113
Fig. 2.13. – Bomba e Excicador.....	114
Fig. 2.14. – Ensaio de Capilaridade	117
Fig. 2.15. – Ensaio de Permeabilidade	118
Fig. 2.16. – Lagetas de Geobetão e Betão.....	119

Fig. 2.17. – Migração dos Cloretos	124
Fig. 2.18. – Ensaio dos Cloretos - Pormenor	125

Capítulo 3 – Técnicas Experimentais de Análise Usadas

Fig. 3.1. – Difractograma Típico do Metacaulino	134
Fig. 3.2. – Espectros de RMN de ^{27}Al e ^{29}Si no Metacaulino.....	136
Fig. 3.3. – Espectros de RMN do Alumínio e Silício (geopolímero)	137
Fig. 3.4. – Produção de Raios X.....	140
Fig. 3.5. – Acção dos Feixes de Raios X.....	141
Fig. 3.6. – Esquema Global de EIV	143

Capítulo 4 – Obtenção do Metacaulino

Fig. 4.1. – Difractogramas de Raios X.....	155
Fig. 4.2. – Espectros de IV de Caulino Mibal com Diferentes Tempos de Exposição (bandas de 400 a 1500 cm^{-1})	156
Fig. 4.3. – Espectros de IV de Caulino Mibal com Diferentes Tempos de Exposição (bandas de 3000 a 4000 cm^{-1})	157
Fig. 4.4. – Espectros de Infra Vermelho de Caulino Campados	159
Fig. 4.5. – EIV de Caulino Campados (banda de 500 a 1500 cm^{-1})	160
Fig. 4.6. – EIV de Caulino Campados (banda de 3000 a 4000 cm^{-1})	160
Fig. 4.7. – EIV de Caulino Alvarelhos (banda de 500 a 1500 cm^{-1})	161
Fig. 4.8. – EIV de Caulino Alvarelhos (banda de 3000 a 4000 cm^{-1}).....	161
Fig. 4.9. – RMN - Mibal ^{27}Al	163
Fig. 4.10. – RMN - Campados ^{27}Al	164
Fig. 4.11. – RMN - Alvarelhos ^{27}Al	165
Fig. 4.12. – RMN - Mibal ^{29}Si	166
Fig. 4.13. – Ligações Si(Q)	167
Fig. 4.14. – RMN - Campados ^{29}Si	168
Fig. 4.15. – RMN - Alvarelhos ^{29}Si	168
Fig. 4.16. – Critério de Murat-Bachiorrini	171
Fig. 4.17. – Diagramas de Variação das Resistências à Compressão.....	172

Capítulo 5 – Condições de Fabrico, Compactação e Cura dos Geopolímeros

Fig. 5.1. – Provete com Bolhas de Ar	181
Fig. 5.2. – Uso do Martelo	197
Fig. 5.3. – Retardadores de Presa.....	201
Fig. 5.4. – Acção do Gesso.....	203
Fig. 5.5. – Tempo de Presa com Variação da % de Cal.....	204
Fig. 5.6. – Provete Enterrado	211
Fig. 5.7. – Espectros de Infra-Vermelho do Geopolímero CB	213
Fig. 5.8. – Espectros de RMN do ^{27}Al (Geopolímero CB)	214
Fig. 5.9. – Espectros de RMN do ^{28}Si (Geopolímero CB)	214

Capítulo 6 – Comportamento Mecânico

Fig. 6.1. – NaOH-12M – Compressão Simples em Argamassas.....	221
Fig. 6.2. – NaOH-12M-SC – Evolução das Resistências à Compressão com a Idade.....	222
Fig. 6.3. – NaOH-12M-CC – Evolução das Resistências à Compressão com a Idade.....	223
Fig. 6.4. – NaOH-12M – Tracção por Flexão em Argamassas.....	225
Fig. 6.5. – NaOH-12M-SC – Evolução das Resistências à Tracção com a Idade.....	226
Fig. 6.6. – NaOH-12M-CC – Evolução das Resistências à Tracção com a Idade.....	227
Fig. 6.7. – NaOH-15M – Compressão Simples em Argamassas.....	229
Fig. 6.8. – NaOH-15M-SC – Evolução das Resistências à Compressão com a Idade.....	230
Fig. 6.9. – NaOH-15M-CC – Evolução das Resistências à Compressão com a Idade.....	231
Fig. 6.10. – NaOH-15M – Tracção por Flexão em Argamassas	232
Fig. 6.11. – NaOH-15M-SC – Evolução das Resistências à Tracção com a Idade.....	233
Fig. 6.12. – NaOH-15M-CC – Evolução das Resistências à Tracção com a Idade.....	233
Fig. 6.13. – NaOH-18M – Compressão Simples em Argamassas.....	237
Fig. 6.14. – NaOH-18M-SC – Evolução das Resistências à Compressão com a Idade.....	238
Fig. 6.15. – NaOH-18M – Tracção por Flexão em Argamassas	239
Fig. 6.16. – NaOH-18M-SC – Evolução das Resistências à Tracção com a Idade.....	240
Fig. 6.17. – Compressão Simples – Diferentes % de Substituição de Metacaulino por Cal.....	243
Fig. 6.18. – Tracção por Flexão – Diferentes % de Substituição de Metacaulino por Cal.....	244
Fig. 6.19. – 7 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	246
Fig. 6.20. – 14 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	247
Fig. 6.21. – 28 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	247
Fig. 6.22. – 7 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	248
Fig. 6.23. – 14 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	248
Fig. 6.24. – 28 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	248
Fig. 6.25. – 7 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	249
Fig. 6.26. – 14 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	249

Fig. 6.27. – 28 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	250
Fig. 6.28. – 7 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	250
Fig. 6.29. – 14 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	251
Fig. 6.30. – 28 dias – Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC.....	251
Fig. 6.31. – 12M-SC-Comp.0 (ACT/MC=1).....	253
Fig. 6.32. – 12M-SC-Comp.1 (ACT/MC=0.90).....	254
Fig. 6.33. – 12M-SC-Comp.2 (ACT/MC=0.85).....	255
Fig. 6.34. – 12M-SC-Comp.3 (ACT/MC=0.80).....	255
Fig. 6.35. – 12M-SC-Comp.4 (ACT/MC=0.75).....	256
Fig. 6.36. – 15M-SC-Comp.1 (ACT/MC=0.90).....	257
Fig. 6.37. – 15M-SC-Comp.2 (ACT/MC=0.85).....	257
Fig. 6.38. – 15M-SC-Comp.3 (ACT/MC=0.80).....	258
Fig. 6.39. – 15M-SC-Comp.4 (ACT/MC=0.75).....	258
Fig. 6.40. – 12M-CC-Comp.0 (ACT/MC=1).....	260
Fig. 6.41. – 12M-CC-Comp.1 (ACT/MC=0.90).....	261
Fig. 6.42. – 12M-CC-Comp.2 (ACT/MC=0.85).....	261
Fig. 6.43. – 12M-CC-Comp.3 (ACT/MC=0.80).....	262
Fig. 6.44. – 12M-CC-Comp.4 (ACT/MC=0.75).....	262
Fig. 6.45. – 15M-CC-Comp.0 (ACT/MC=1).....	263
Fig. 6.46. – 15M-CC-Comp.1 (ACT/MC=0.90).....	264
Fig. 6.47. – 15M-CC-Comp.2 (ACT/MC=0.85).....	264
Fig. 6.48. – 15M-CC-Comp.3 (ACT/MC=0.80).....	265
Fig. 6.49. – 15M-CC-Comp.4 (ACT/MC=0.75).....	265
Fig. 6.50. – Resistências à Compressão em Argamassas.....	268
Fig. 6.51. – Resistências à Compressão em Geobetões.....	270
Fig. 6.52. – Variação da Resistência com a Composição.....	271
Fig. 6.53. – Variação da Resistência com a Composição.....	272
Fig. 6.54. – Provetes Fracturados de Geobetão (esq.) e de Betão de CPN (dir.).....	276
Fig. 6.55. – SEM – Geobetão (partícula de areia).....	277
Fig. 6.56. – SEM – Betão CPN (Interface pasta-agregado).....	277
Fig. 6.57. – Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples.....	287
Fig. 6.58. – Intervalos de Variação a 90% - Tracção.....	287
Fig. 6.59. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%).....	288
Fig. 6.60. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%).....	288
Fig. 6.61. – Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples.....	290
Fig. 6.62. – Intervalos de Variação a 90% - Tracção.....	291
Fig. 6.63. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%).....	292
Fig. 6.64. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%).....	292
Fig. 6.65. – Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples.....	294
Fig. 6.66. – Intervalos de Variação a 90% - Tracção.....	295
Fig. 6.67. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%).....	296

Fig. 6.68. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%)	296
Fig. 6.69. – Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples.....	298
Fig. 6.70. – Intervalos de Variação a 90% - Tracção	299
Fig. 6.71. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)	300
Fig. 6.72. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%)	300
Fig. 6.73. – Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples.....	302
Fig. 6.74. – Intervalos de Variação a 90% - Tracção	303
Fig. 6.75. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)	304
Fig. 6.76. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%)	304
Fig. 6.77. – Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)	310
Fig. 6.78. – Tracção por Flexão (Valores mínimos com 95%)	310

Capítulo 7 – Avaliação da Durabilidade

Fig. 7.1. – Retracção de Provetes.....	321
Fig. 7.2. – Curva Tensão-Extensão (Argamassa)	323
Fig. 7.3. – Curva Tensão-Extensão (Geobetão)	323
Fig. 7.4. – Absorção por Capilaridade (Geobetão)	328
Fig. 7.5. – Absorção por Capilaridade (Betão)	329
Fig. 7.6. – Perda de Massa.....	335
Fig. 7.7. – Provede de Geobetão após Ataque pelo H ₂ SO ₄	336
Fig. 7.8. – Provede de Betão após Ataque pelo H ₂ SO ₄	336
Fig. 7.9. – Ataque pelos Ácidos, Vista Conjunta dos Provetes.....	337
Fig. 7.10. – Perda de Resistência Mecânica	338
Fig. 7.11. – Ataque Ácido – GB	339
Fig. 7.12. – Ataque Ácido – CPN	339
Fig. 7.13. – Geobetão (Ensaio de Los Angeles)	342
Fig. 7.14. – Percentagem de Desgaste	342
Fig. 7.15. – Provetes de Argamassa, Betão CPN e Geobetão	344
Fig. 7.16. – Geobetão com Granito (após ensaio)	349

ÍNDICE DE QUADROS

Capítulo 1 – Sistemas Ligantes Antigos e Modernos

Quadro 1.1. – Constituição Química dos Cimentos Antigos.....	12
--	----

Capítulo 2 – Materiais e Procedimentos de Ensaio

Quadro 2.1. – Caulino Mibal-A	80
Quadro 2.2. – Caulino Campados-A	81
Quadro 2.3. – Composição Qualitativa	81
Quadro 2.4. – Caulino Alvarelhos.....	82
Quadro 2.5. – Granulometria de Areias e Brita	93
Quadro 2.6. – Composição Química do Pó de Vidro	97
Quadro 2.7. – Composição Química das Areias de Jales.....	99
Quadro 2.8. – Granulometria da Areia de Jales.....	100
Quadro 2.9. – Concentração do Activador	103
Quadro 2.10. – Composição Química do Silicato de Sódio	105
Quadro 2.11. – Composição CB.....	107
Quadro 2.12. – Composições de Argamassa (sem cal).....	108
Quadro 2.13. – Composições de Argamassa (com cal)	108
Quadro 2.14. – Composições de Geobetão (por m ³)	109
Quadro 2.15. – Composição de Betão CPN.....	109
Quadro 2.16. – Condições do Ensaio	125

Capítulo 4 – Obtenção do Metacaulino

Quadro 4.1. – Composição da Argamassa Geopolimérica Simples	172
Quadro 4.2. – Resultados dos Ensaios à Compressão Simples	173
Quadro 4.3. – Valores do Coeficiente de Desordem C _d (cm ⁻¹).....	173
Quadro 4.4. – Composição Química dos Metacaulinos.....	175
Quadro 4.5. – Granulometria dos Metacaulinos	176
Quadro 4.6. – Superfície Específica Blaine (cm ² /gr).....	177

Capítulo 5 – Condições de Fabrico, Compactação e Cura dos Geopolímeros

Quadro 5.1. – Activadores Simples e Compostos	182
Quadro 5.2. – Resistências à Compressão Simples (r _d =1.85).....	184
Quadro 5.3. – Composições de Argamassa Consideradas	188
Quadro 5.4. – Razões entre os Principais Óxidos.....	189
Quadro 5.5. – Resistências à Compressão Simples (MPa)	189

Quadro 5.6. – Resistências à Compressão Simples (r_d variável)	190
Quadro 5.7. – Resistências Obtidas com Areia de Jales Natural e Moída	193
Quadro 5.8. – Tempos de Início e Fim de Presa	202
Quadro 5.9. – Compr. Simples (média de 3 ensaios).....	203
Quadro 5.10. – Tempos de Presa com Gesso	204
Quadro 5.11. – Tempos de Presa com Várias % de Cal.....	205
Quadro 5.12. – Cura a 80°C em Ambiente Saturado	208
Quadro 5.13. – Resistências à Compressão Simples	210

Capítulo 6 – Comportamento Mecânico

Quadro 6.1. – NaOH-12M – Resistências à Compressão Simples (MPa)	220
Quadro 6.2. – NaOH-12M – Resistências à Tracção (MPa)	224
Quadro 6.3. – NaOH-15M – Resistências à Compressão Simples (MPa)	228
Quadro 6.4. – NaOH-15M – Resistências à Tracção (MPa)	231
Quadro 6.5. – NaOH-18M – Resistências à Compressão.....	237
Quadro 6.6. – NaOH-18M – Resistências à Tracção.....	239
Quadro 6.7. – Razões R_t/R_c (sem cal).....	241
Quadro 6.8. – Razões R_t/R_c (com cal).....	242
Quadro 6.9. – NaOH-12M – Resistências à Compressão Simples (MPa)	243
Quadro 6.10. – NaOH-12M – Resistências à Tracção por Flexão (MPa)	244
Quadro 6.11. – Resistências em Idades Avançadas	253
Quadro 6.12. – Resistências em Idades Avançadas	260
Quadro 6.13. – Resistências à Compressão Simples (MPa).....	267
Quadro 6.14. – Compressão Simples do Geobetão (MPa).....	269
Quadro 6.15. – Tracção do Geobetão (MPa).....	272
Quadro 6.16. – Resistências Características em Compressão Simples	274
Quadro 6.17. – Razões entre Óxidos no Geobetão.....	274
Quadro 6.18. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples	280
Quadro 6.19. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples	280
Quadro 6.20. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples	281
Quadro 6.21. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples	281
Quadro 6.22. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples	282
Quadro 6.23. – Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção	282
Quadro 6.24. – Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção	283
Quadro 6.25. – Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção	283
Quadro 6.26. – Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção	284
Quadro 6.27. – Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção	284
Quadro 6.28. – Intervalos de Variação.....	286
Quadro 6.29. – Intervalos de Variação.....	287
Quadro 6.30. – Intervalos de Variação.....	290
Quadro 6.31. – Intervalos de Variação.....	291
Quadro 6.32. – Intervalos de Variação.....	294
Quadro 6.33. – Intervalos de Variação.....	295
Quadro 6.34. – Intervalos de Variação.....	298

Quadro 6.35. – Intervalos de Variação.....	299
Quadro 6.36. – Intervalos de Variação.....	302
Quadro 6.37. – Intervalos de Variação.....	303
Quadro 6.38. – Valores Comparados das Resistências.....	305
Quadro 6.39. – Resistências à Compr. Simples.....	306
Quadro 6.40. – Resistências à Compr. Simples.....	306
Quadro 6.41. – Resistências à Compr. Simples.....	306
Quadro 6.42. – Resistências à Compr. Simples.....	306
Quadro 6.43. – Resistências à Tracção	307
Quadro 6.44. – Resistências à Tracção	307
Quadro 6.45. – Resistências à Tracção	307
Quadro 6.46. – Resistências à Tracção	308
Quadro 6.47. – Intervalos de Variação.....	309
Quadro 6.48. – Intervalos de Variação.....	309

Capítulo 7 – Avaliação da Durabilidade

Quadro 7.1. – Valores de Ensaio	322
Quadro 7.2. – Ensaios de Absorção (geobetão)	325
Quadro 7.3. – Ensaios de Absorção (betão).....	326
Quadro 7.4. – Ensaios de Absorção (geobetão)	326
Quadro 7.5. – Ensaios de Absorção (betão).....	327
Quadro 7.6. – Ensaio de Capilaridade (geobetão)	327
Quadro 7.7. – Ensaio de Capilaridade (betão).....	328
Quadro 7.8. – Ensaio de Permeabilidade à Água (geobetão).....	330
Quadro 7.9. – Ensaio de Permeabilidade à Água (betão)	331
Quadro 7.10. – Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio (geobetão)	332
Quadro 7.11. – Ensaio de Permeabilidade ao Oxigénio (betão).....	332
Quadro 7.12. – Ataque pelo H ₂ SO ₄ (massas iniciais).....	333
Quadro 7.13. – Ataque pelo H ₂ SO ₄ (massas finais)	334
Quadro 7.14. – Perda de Massa (geobetão).....	334
Quadro 7.15. – Perda de Massa (betão)	334
Quadro 7.16. – Resistências Iniciais e Finais	338
Quadro 7.17. – Ataque Ácido durante 30 dias	339
Quadro 7.18. – Migração do Ião Cloro – Arg. Geopolimérica.....	340
Quadro 7.19. – Migração do Ião Cloro – Geobetão.....	340
Quadro 7.20. – Migração do Ião Cloro –Betão CPN	340
Quadro 7.21. – Desgaste de Los Angeles (%)	341
Quadro 7.22. – Ensaios de Gelo-Desgelo.....	343
Quadro 7.23. – Molhagem-Secagem	345
Quadro 7.24. – Choque Térmico	346
Quadro 7.25. – Ensaios à Temperatura (900°C) – Geobetão	348
Quadro 7.26. – Ensaios à Temperatura – Material Porcelânico em Brita e em Pó	351

